



**Université Sidi Mohammed Ben Abdellah**  
**Faculté des Sciences Dhar El Mahrz-Fès**  
**Centre d'Etudes Doctorales**  
**"Sciences et Technologies"**

**Formation Doctorale : DSIP**

**Discipline : Physique**

**Spécialité : Didactique des Sciences Physiques**

**Laboratoire : Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en  
Didactique des Sciences et Techniques (LIRDIST)**

## **THESE DE DOCTORAT**

Présentée par

Adnane MAMANE

### **INNOVATION DANS L'ENSEIGNEMENT DE LA DECROISSANCE RADIOACTIVE AU SECONDAIRE : CONCEPTION D'OUTIL TICE ET MODELISATIONS MATHEMATIQUES**

Soutenue le 27 septembre 2019 devant le jury composé de :

<b>Pr. Moncef ZAKI</b>	<b>FSDM-Fès</b>	<b>Président</b>
<b>Pr. Nadia BENJELLOUN</b>	<b>FSDM-Fès</b>	<b>Directrice de thèse</b>
<b>Pr. Abdellatif CHIADLI</b>	<b>ENS-Rabat</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Pr. Ahmida CHIKHAOUI</b>	<b>ENS-Fès</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Pr. Mabrouk BENHAMOU</b>	<b>FSM-Meknès</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Pr. Haddou AOUNI</b>	<b>FSDM-Fès</b>	<b>Examineur</b>
<b>Pr. Lotfi AJANA</b>	<b>ENS-Fès</b>	<b>Examineur</b>

Année universitaire : 2018-2019

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ الْعَلِیْمِ الْحَكِیْمِ

وَصَلَّى اللّٰهُ وَبَارَكَ عَلٰی نَبِیْنَا مُحَمَّدٍ وَآلِیْمِیْنِ وَعَلٰی اٰلِهِ وَصَحَابَتِهِ وَجَمْعِیْنِ

## REMERCIEMENTS

Ce travail est le fruit d'une réflexion personnelle longue et ancienne. Elle m'a accompagné de loin, mais autrement tout au long de ces fructueuses et belles années de thèse. Ce fut et est, une aventure scientifique que j'ai l'honneur de partager toujours avec de nombreuses personnes. Je leur témoigne reconnaissance, et je leur adresse mes sincères remerciements pour ce que je deviens aujourd'hui.

Distinctivement, je remercie ma directrice de thèse, Madame Nadia BENJELLOUN, Professeure à la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz Fès, pour ses directives, ses encouragements et son soutien indéfectible, sans lesquels je n'aurais pu soutenir ma thèse. Par ses qualités humaines et scientifiques, elle conjugue entre l'art, la finesse et la perspicacité du conseil. Merci Ma Professeure.

Je remercie les membres des trois équipes affiliées au Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Didactique des Sciences et Techniques (LIRDIST) l'incubateur de ma thèse, pour être des personnes exceptionnellement actives, au même titre que les chercheurs et doctorants de la formation doctorale Didactique des Sciences et Ingénierie Pédagogique (DSIP) et des formations complémentaires communes et spécifiques, pour leurs précieuses contributions dans l'accomplissement de ce travail.

Mes vifs remerciements s'adressent aux membres du jury qui me font l'honneur d'examiner ce travail. Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Le Professeur Moncef ZAKI, à la fois président du jury et directeur du laboratoire LIRDIST dans lequel ce travail a connu son évolution académique. Je remercie Messieurs Les Professeurs Abdellatif CHIADLI, Ahmida CHIKHAOUI et Mabrouk BENHAMOU, les rapporteurs de ma thèse. Et je remercie les examinateurs de ce travail, Messieurs Les Professeurs Haddou AOUNI et Lotfi AJANA.

Ma gratitude va également envers le professeur Said CHBIROU, et les professeurs des sciences physiques et les directions des lycées Mohamed AJANA, Ibn ROUMI et KASBA de Meknès, ainsi que leurs élèves membres des groupes d'expérimentation de ce travail. Je les remercie de m'avoir apporté, si généreusement

leur soutien, et d'avoir témoigné l'engagement nécessaire pour la réalisation d'une partie de cette recherche.

Je tiens à remercier tout particulièrement :

Ma mère et mon défunt père pour m'avoir appris à la fois, le bien fondé des justes valeurs et le plaisir de s'y accorder. Mes sœurs, mon frère et ma grande famille pour l'amour particulièrement généreux qu'ils m'ont toujours témoigné.

Mon épouse Awatif et nos perles Marwa, Amina, Mahmoud et Hidaya, pour m'avoir soutenu tout au long de ce travail par leurs amours inconditionnels. C'est particulièrement à eux que je dois le statut de docteur. C'est sûr que les moments dérobés durant ces années de ma thèse seront le rubis à valoriser dans l'avenir.

Ma reconnaissance va également à mes collègues, pour leur générosité d'esprit, leur amitié sans faille. Particulièrement, mes amis de l'ENSAM Meknès, je ne saurais les remercier assez pour tout ce qu'ils m'ont apporté.

Je remercie, enfin, toutes les personnes m'ayant aidée de près ou de loin, sans que je ne puisse les citer. Qu'elles acceptent mes sincères remerciements.

“ La philosophie est écrite dans ce livre immense perpétuellement ouvert devant nos yeux (je veux dire : l'Univers), mais on ne peut le comprendre si l'on n'apprend pas d'abord à connaître la langue et les caractères dans lesquels il est écrit. Il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et d'autres figures géométriques sans l'intermédiaire desquelles il est humainement impossible d'en comprendre un seul mot ”

*Galileo GALILEE (1564 ; 1642)*

## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	3
TABLE DES MATIERES .....	6
INTRODUCTION GENERALE .....	12
PREMIER CHAPITRE : ETAT DE L'ART DES LIENS ENTRE LA PHYSIQUE ET LES MATHEMATIQUES .....	19
A// INTRODUCTION .....	20
B// LIENS ENTRE LA PHYSIQUE ET LES MATHEMATIQUES .....	20
I. Chronologie des liens entre la physique et les mathématiques .....	21
1. Naissance des vocabulaires spécifiques aux sciences classiques .....	21
2. De l'ère des mathématiques utilitaires aux mathématiques abstraites .....	21
3. Du baconisme à la séparation des mathématiques pures des autres sciences classiques .....	22
4. Appropriation d'une mathématisation de la physique .....	23
5. L'ère de l'informatique : .....	24
II. Dimension épistémologique .....	25
1. Les mathématiques sont-elles un langage de la physique ? .....	25
2. Les mathématiques sont-elles pour la physique un courant de pensée, un outil, ou des correspondances ? .....	26
3. Obstacles épistémologiques .....	28
III. Points de vue didactique des liens de la physique et des mathématiques .....	30
1. L'enseignement de la physique doit-il être expérimental ou théorique ? .....	30
2. La formation interdisciplinaire mathématique - physique des professeurs ....	32
3. Enseignement de la décroissance radioactive par analogies : .....	34
IV. TICE entre besoins didactiques et obstacles à son intégration .....	35
1. Exemples d'utilisations des TICE dans l'enseignement de la physique .....	35
2. Typologie de l'usage des TICE .....	35
3. TICE, obstacles, alternatives et instruments d'évaluation du degré d'intégration .....	36
C// CONCLUSION .....	38
DEUXIEME CHAPITRE : PROBLEMATIQUE DE LA RECHERCHE .....	40
TROISIEME CHAPITRE : CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE .....	46
A// INTRODUCTION .....	47

B//	PARADIGME DE LA RECHERCHE.....	47
I.	Aperçu sur les grandes théories de l'apprentissage .....	48
II.	Concepts théoriques de référence.....	51
1.	Ingénierie didactique.....	51
2.	Registre.....	52
3.	Espace de réalité.....	53
4.	Cadre de rationalité .....	54
5.	Cadre d'intelligibilité .....	55
6.	Modèle.....	56
7.	Modélisation.....	57
C//	METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE.....	58
I.	Axes généraux de la recherche.....	58
II.	Elaborations mathématiques du ModLI et du ModL2 <sup>t</sup> et élaboration d'un nouvel outil TICE .....	59
1.	Aperçu sur la loi de décroissance radioactive .....	59
1.1.	Définition .....	59
1.2.	Evolution temporelle d'un échantillon de radioélément .....	60
2.	Elaboration du ModLI.....	61
2.1.	Expression de N(t) pour $t=nt_{1/2}$ et $n \in \mathbb{N}$ .....	61
2.2.	Expression approchée de N(t) sur $I_n$ dans le cadre du ModLI.....	62
2.3.	Expression approchée de t sur $I_n = ](n-1)t_{1/2}, nt_{1/2}]$ dans le cadre du ModLI .....	63
3.	Elaboration du ModL2 <sup>t</sup> .....	63
3.1.	Expression exacte de N(t) dans le cadre du ModL2 <sup>t</sup> .....	64
3.2.	Comparaison des courbes du ModL <sup>e</sup> t et du ModL2 <sup>t</sup> .....	64
3.3.	Expression exacte du temps t pour ModL2 <sup>t</sup> .....	65
4.	Elaboration du nouvel outil TICE SimulP200.....	65
III.	Le questionnaire.....	65
1.	Elaboration du questionnaire :.....	66
2.	L'administration du questionnaire :.....	66
3.	Analyse du questionnaire :.....	67
IV.	Questions cadres et hypothèses de la recherche.....	67
1.	Questions cadres de la recherche : .....	67
2.	Hypothèses de la recherche :.....	67

V.	Ingénierie didactique.....	68
D//	CONCLUSION.....	69
QUATRIEME CHAPITRE : EXPLORATION DE LA DEPENDANCE ENTRE L'ENSEIGNEMENT-APPRENTISSAGE DE LA PHYSIQUE ET LES RESSOURCES TICE A LA DISPOSITION DES LYCEENS MAROCAINS .....		
A//	INTRODUCTION .....	73
B//	QUESTIONS DE RECHERCHE DE L'ETUDE EXPLORATOIRE.....	73
C//	METHODOLOGIE DE L'ETUDE EXPLORATOIRE .....	74
D//	RESULTATS ET DISCUSSION DE L'ETUDE EXPLORATOIRE .....	76
I.	Informations personnelles sur les élèves .....	76
II.	Dispositifs logistiques des connectivités aux lycées : .....	77
III.	Préférences des élèves relatives aux ressources qu'ils mobilisent via internet pour la physique :.....	78
IV.	Préférences des élèves relatives aux sites web qu'ils sollicitent lors de la recherche internet pour la physique :.....	79
V.	Préférences des élèves sur l'approche de l'établissement de l'expression analytique de la loi de décroissance radioactive .....	79
VI.	Etude statistique.....	80
1.	Remarque :.....	80
2.	Tests d'indépendances de chi2 entre la branche de l'élève et les autres variables : .....	80
2.1.	Pour les tests d'indépendances chi2 négatifs.....	81
2.2.	Pour les tests d'indépendances chi2 positifs.....	81
a.	Croisement entre la branche de l'élève et sa scolarité :.....	81
b.	Croisement entre la branche de l'élève et les contenus qu'il consulte pour les recherches internet sur la physique :.....	82
3.	Tests d'indépendance de chi2 entre les contenus consultés sur la physique par les élèves et les autres variables :.....	85
3.1	Pour les tests d'indépendances chi2 négatifs.....	85
3.2	Pour les tests d'indépendances chi2 positifs.....	85
4.	Tests d'indépendances chi2 entre les sites web fréquentés par les élèves pour la physique et les autres variables :.....	88
4.1	Pour les tests d'indépendances chi2 négatifs.....	89
4.2	Pour les tests d'indépendances chi2 positifs.....	89
E//	CONCLUSION.....	91
CINQUIEME CHAPITRE : ETUDES D'EXPERIMENTATIONS POUR ModLI ET ModL2t... 93		



A//	INTRODUCTION .....	94
B//	METHODOLOGIE DES ETUDES D'EXPERIMENTATIONS.....	94
	I. Niveau ciblé .....	94
	II. Modalités d'intervention.....	95
C//	EXPERIMENTATION RESULTATS ET DISCUSSION .....	95
	I. Présentation de notre ressource TICE et organisation.....	95
	II. Analyse a priori.....	96
	1. Observations didactiques .....	96
	2. Pré-test 1.....	99
	2.1 Présentation de SimulP200 :.....	99
	2.2 Enoncé du pré-test 1.....	100
	2.3 Activités attendues .....	101
	2.4 Résultats.....	101
	2.5 Grille d'analyse .....	102
	3. Post-test 1 .....	104
	3.1 Organisation.....	104
	3.2 Enoncé.....	104
	3.3 Réponses attendues et résultats.....	105
	3.4 Grille d'analyse .....	106
	4. Conclusion .....	107
	III. Etude d'expérimentation relative au modèle de linéarisation par intervalle "ModLI" de la loi de la décroissance radioactive .....	107
	1. Test 2 (1 <sup>ère</sup> partie) .....	107
	1.1 Enoncé.....	107
	1.2 Réponses attendues.....	108
	1.3 Résultats et discussion .....	108
	2. Test 2 (2 <sup>ème</sup> partie) .....	109
	2.1 Énoncé.....	109
	2.2 Réponses attendues.....	109
	2.3 Résultats et discussion .....	110
	3. Conclusion .....	110
	IV. Etude d'expérimentation relative au modèle de la loi de la décroissance radioactive en puissance à base 2 du temps "ModL2" .....	112
	1. Modalités d'intervention .....	112

2.	Pré-test 3.....	112
2.1.	Énoncé.....	112
2.2.	Réponses attendues.....	112
2.3.	Résultats et discussion.....	113
3.	Post-test 3.....	113
3.1	Énoncé.....	113
3.2	Réponses attendues.....	113
3.3	Résultats et discussion.....	114
4.	Conclusion.....	114
V.	Conclusion.....	115
D//	CONCLUSION.....	116
SIXIEME CHAPITRE : ETUDES DE VALIDATION DU ModLI ET DU ModL2 <sup>t</sup> .....		118
A//	INTRODUCTION.....	119
B//	ORGANISATION.....	119
C//	EXPERIMENTATION RESULTATS ET DISCUSSION.....	120
I.	Première étape : passage en revue des modèles existants de la décroissance radioactive.....	120
II.	Deuxième étape : analyse a priori.....	125
1.	Observations didactiques objets d'analyse a priori.....	125
2.	Pré-test 4.....	125
2.1	Enoncé.....	125
2.2	Réponses attendues.....	125
2.3	Résultats et discussion.....	126
3.	Post-test 4.....	126
3.1	Enoncé.....	126
3.2	Réponse attendue.....	127
3.3	Résultats et discussion.....	127
4.	Conclusion.....	128
III.	Troisième étape : étude de validation du ModLI.....	128
1.	Pré-test 5.....	128
1.1	Enoncé.....	128
1.2	Réponses attendues.....	131
1.3	Résultats et discussion.....	131
2.	Post-test 5.....	132

2.1	Enoncé .....	132
2.2	Réponse attendue .....	133
2.3	Résultats et discussion .....	133
3.	Conclusion .....	133
IV.	Quatrième étape : étude de validation du ModL2 <sup>t</sup> .....	134
1.	Présentation du ModL2 <sup>t</sup> .....	134
2.	Pré-test 6.....	135
2.1	Enoncé .....	135
2.2	Réponses attendues .....	135
2.3	Résultats et discussion .....	136
3.	Post-test 6.....	137
3.1	Enoncé .....	137
3.2	Réponse attendue .....	137
3.3	Résultats et discussion .....	137
4.	Conclusion .....	138
D//	CONCLUSION.....	138
	CONCLUSION GENERALE.....	142
	REFERENCES .....	147
	ANNEXE.....	153
1.	A propos des tests relatifs à l'élaboration du questionnaire.....	153
2.	Axes d'items du questionnaire.....	153
3.	Le questionnaire.....	155
4.	Code source Python de SimulP200.....	156
5.	Exemples de productions des élèves au cours des tests.....	158

## INTRODUCTION GENERALE

L'histoire des sciences physiques, celles des mathématiques, et leurs épistémologies, s'accordent sur l'existence d'une relation particulière entre la physique et les mathématiques. Cette relation est reconnue universellement, par la fréquence des témoignages explicites liant l'histoire des deux disciplines. Là, nous citons la célèbre et limpide affirmation du mathématicien et physicien G.Galilée. Il affirme que : *''La philosophie est écrite dans ce livre immense perpétuellement ouvert devant nos yeux (je veux dire : l'Univers), mais on ne peut le comprendre si l'on n'apprend pas d'abord à connaître la langue et les caractères dans lesquels il est écrit. Il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et d'autres figures géométriques sans l'intermédiaire desquelles il est humainement impossible d'en comprendre un seul mot''* (LÉVY-LEBLOND, 2014). En effet, les mathématiques figurent en physique comme la composante indissociable et insubordonnée dans l'élaboration des contenus sous leurs formes les plus expressives : symboles, formules, formes géométriques et graphes, historiquement de fondements mathématiques ((LÉVY-LEBLOND, 2014), (Kuhn, 1975), (Kastler, 1977)). Cependant, un long chemin est parcouru pour arriver à ce fait actuellement établi. Des questions et leurs réponses se rapportant aux liens entre la physique et les mathématiques, ont toujours suscité de la matière à débattre. Il en découle des affirmations du genre : les mathématiques jouent la fonction d'outils dans la physique, selon P.Langevin (BENSAUDE VINCENT, 2005), et selon G.Galilée et R.Descartes (LÉVY-LEBLOND, 2014) ; Les mathématiques sont un langage de la physique, selon G.Galilée, W.Heisenberg, H.Poincaré,... (LÉVY-LEBLOND, 2014) ; Gaston Bachelard parle des mathématiques comme étant un courant de pensée en physique (Rosmorduc, 1987). Tandis que J.J.Hopwood, A.Einstein et G.Bachelard érigent leurs liens au status de relation de constitution (LÉVY-LEBLOND, 2014).

Par ailleurs, les théories d'apprentissage ne manquent pas de mettre au clair le challenge entre percepts concrets et percepts abstraits, parmi le processus de conceptualisation dans la vie consciente de chaque individu (Piaget, 1967). Et comme la dimension abstraite reste un élément structural du processus de la construction de

tout un savoir (OMNÈS, 2014), le degré d'abstraction diffère d'un champ de connaissance à un autre. Les mathématiques sont connues pour leur caractère fondamentalement abstrait, de leurs objets et événements (Duhem, 1989). Du côté de la physique, il y a une cohabitation entre manipulations d'objets et d'événements réels, et cogitations abstraites sur d'autres ((MÉHEUT, 2005), (Beaufils, 1999)).

Des études faites en toutes sortes de formations (pour élèves ou pour professeurs) énumèrent la dimension interdidactique des mathématiques et de la physique, et relèvent la consistance de l'aspect interdisciplinaire, et de sa transcendance dans les représentations des contenus de chacune des deux disciplines ((Grau, 2000), (Bednarz & Perrin-Glorian, 2003), (Robardet, 1998), (Malafosse, 2003)). Ces études énumèrent aussi, les intersections, les spécificités et les complémentarités, entre les conditions optimales, pédagogiques et didactiques, des déroulements de l'enseignement et de l'apprentissage de la physique, utilisant les mathématiques, et vice versa. Dans cette optique, R.DUVAL (Duval, 1995) évoque pertinemment, le concept de registres dans ses dimensions sémiotiques et sémantiques. De même, le concept d'espace de réalité est un autre bijou qui a été créé par D.MALAFOSSE et al (Malafosse, Lerouge, & Dusseau, 2000), en réponse au besoin incessant de la distinction entre les "objets de la réalité" et les "objets du physicien". Ils enlèvent ainsi, tout amalgame entre l'espace de réalité et le concept de cadre. De la lumière est mise sur cette dernière notion de cadre par D.MALAFOSSE et al (Malafosse, Lerouge, & Dusseau, 2001). Ils ont développé la définition suivante : *"un cadre de rationalité est un ensemble cohérent du fonctionnement de la pensée caractérisé essentiellement par son monde d'objets et ses règles de raisonnement et de validation. C'est au sein de cette structure que prennent sens, de manière dialectique, les informations sémiotiques et situationnelles"*. Mais, en prenant un autre sens, le terme "cadre" est couplé au concept "intelligibilité" par F.M.MOUNGABIO et al (Malonga MOUNGABIO & Beaufils, 2010). Pour ces auteurs, la construction des schémas didactiques favorables aux enseignement-apprentissages de la physique, passe par la délimitation du sens du concept de "cadre d'intelligibilité" : *"Un des objectifs de l'enseignement de la physique est de favoriser la construction d'un cadre d'intelligibilité pour faire accéder l'élève au type de connaissances qui, aux yeux des physiciens, rendent le monde intelligible, c'est-à-*

*dire à la capacité à mettre en relation le monde matériel et le monde des théories et des modèles. On retrouve cette partition dans le schéma de Malafosse (Malafosse et al., 2000) dont la position épistémologique repose sur l'affirmation d'un « espace de réalité » et dont le positionnement didactique se caractérise par la mise en relation de cadres de rationalité (Lerouge, 2000) et de registres sémiotiques'' (Malonga Moungabio & Beaufils, 2010).*

C'est à la lumière de ce maillage tentaculaire tissé par les liens entre la physique et les mathématiques, que nous avons entrepris l'étude de l'enseignement et de l'apprentissage de la décroissance radioactive au Maroc. C'est un contenu de la physique, pour lequel des difficultés sont observées lors des phases de l'expérimentation, et celles liées aux différents recours aux mathématiques. En effet, une grande partie des difficultés de l'apprentissage des sciences physiques au Maroc, trouve ses origines d'abord dans la non maîtrise des mathématiques et des sciences par les élèves, et au second rang arrive l'inadéquation des équipements, et des schémas didactiques et pédagogiques (Conseil Supérieur de l'Éducation de la Formation et de la Recherche Instance Nationale d'Evaluation du Système d'Education de Formation et de la Recherche Scientifique Royaume du Maroc, 2015). Particulièrement, le cours de la décroissance radioactive au lycée est parmi les leçons où le montage d'expériences réelles fait défaut, à cause de l'absence des structures de sécurité relative à la manipulation et au stockage des matières radioactives. Ceci rend le fait d'aller chercher du côté des possibilités offertes par les TICE, une solution à ce manque. Aussi du côté de la mobilisation des mathématiques, l'enseignement du phénomène de la décroissance radioactive et de l'établissement de sa loi en 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat scientifique, branches SVT( Sciences de la Vie et de la Terre) et PC (Physique et Chimie), fait intervenir des notions mathématiques (pas encore traitées en classe de mathématiques (Direction des programmes Ministère de l'éducation nationale et de l'enseignement supérieur et de la formation des cadres et de la recherche scientifique Royaume du Maroc, 2007b)) de fonctions logarithmiques et exponentielles, d'équation différentielle linéaire du premier ordre et de sa résolution, et de calcul des probabilités (Direction des programmes Ministère de l'éducation nationale et de l'enseignement supérieur et de la formation des cadres et de la recherche scientifique Royaume du Maroc, 2007a). Ces notions se trouvent

presque au cœur de toutes les leçons des sciences physiques, ce qui écarte leur reprogrammation disciplinaire. Alors que du côté des mathématiques, ces mêmes notions sont programmées au 2<sup>ème</sup> semestre, répondant ainsi à une logique pédagogique et didactique propre de la discipline (Direction des programmes Ministère de l'éducation nationale et de l'enseignement supérieur et de la formation des cadres et de la recherche scientifique Royaume du Maroc, 2007b). C'est de ce constat général que l'idée centrale du sujet de recherche de la présente thèse, a émergé. En effet, l'originalité de la problématique du présent travail, c'est qu'elle couple entre quatre éléments phares, au sujet de l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive : l'étude de l'interaction entre les difficultés de l'enseignement et l'apprentissage de la décroissance radioactive et celles liées à la maîtrise des mathématiques ; la confrontation entre différentes modélisations mathématiques ; la mobilisation des TICE ; et la scénarisation d'activités en alternance entre travaux individuels et travaux collaboratifs.

Pour ce faire, nous présentons le travail de cette thèse sous forme de six chapitres. Les trois premiers chapitres composeront l'étude bibliographique, la problématique, et les cadres théorique et méthodologique. Quant aux trois derniers chapitres, nous les réserverons, respectivement, aux études, exploratoire, d'expérimentations, et de validation, de l'expérimentation de nos deux alternatives pour l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive.

Ainsi, nous consacrerons le premier chapitre à l'étude bibliographique. En effet, nous comptons étudier les références qui traitent de l'histoire et de l'épistémologie des sciences physique et celle des mathématiques. Nous nous intéresserons aux liens entre la physique et les mathématiques dans leurs dimensions historique, épistémologique, didactique, et au niveau de la méthodologie du raisonnement propre à chaque discipline. L'étude du point de vue didactique de ces liens sera l'occasion de brasser de plus près les concepts de l'enseignement et de l'apprentissage, à la lumière de l'interdisciplinarité, des transversalités, des objets et événements des mathématiques versus ceux de la physique. La mobilisation des TICE en présentiel et en classe inversée, est un facteur que nous examinerons dans la littérature et expérimentalement.

Cette étude bibliographique ainsi faite, va nous aider à dégager l'originalité de l'objet du deuxième chapitre qui est consacré à la problématique de ce présent travail de recherche.

Par la suite, nous réserverons le troisième chapitre aux cadres théorique et méthodologique de cette recherche. Nous étalerons d'abord, les apports des auteurs des grandes théories de l'apprentissage, connexes avec notre sujet de recherche, à savoir, les comportementalistes, les cognitivistes, les constructivistes, les socioconstructivistes, et les connectivistes. Nous enchaînerons par la présentation des concepts, pièces maîtresses, de notre cadre théorique : le concept de registres (registres sémiotiques, registres sémantiques), le concept d'espace de réalité, le concept de cadres (cadres de rationalité et cadre d'intelligibilité), et les concepts de modèle et de modélisation. Ces concepts figureront aussi comme outils clés d'analyse structurant l'ingénierie didactique au sens de M.ARTIGUE (Artigue, 1989), que nous adopterons pour des parties de cette recherche. A la fin de ce troisième chapitre, nous présenterons notre démarche méthodologique. Nous pensons qu'elle tisserait des liens logiquement valides et ordonnés entre les différentes parties et idées structurant notre travail. Pour l'explicitation de ces importants engrenages, notre démarche méthodologique épouse la ligne suivante : faire des recherches bibliographiques autour du sujet de la recherche ; élaborer la problématique de la recherche ; procéder à la délimitation du paradigme théorique ; dévoiler les enchaînements derrière l'élaboration d'un pack comportant nos deux nouvelles alternatives pour l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive **ModLI** (**Mod**èle de **L**inéarisation par **I**ntervalle) et **ModL2<sup>t</sup>** (**Mod**èle de la **L**oi en puissance à base **2** du **t**emps), et comportant aussi notre nouvel outil TICE baptisé **SimulP200** (**Sim**ulation de la décroissance radioactive du **P**olonium **200**) ; et en fin passer à l'expérimentation et à la discussion des résultats.

Comme déjà annoncé, les trois autres chapitres, se verront réserver à une étude exploratoire, et aux études d'expérimentations et celle de validation de nos deux alternatives, ModLI et ModL2<sup>t</sup>. Ainsi, le quatrième chapitre de ce travail sera consacré à l'exploration des possibles interactions entre les conditions de l'amélioration de l'enseignement-apprentissage de la modélisation mathématique en



physique, et la mobilisation des TICE. Notre approche consistera à déterminer les préférences et attentes des élèves marocains, relatives au déroulement des leçons de physique. Elle explorera aussi, les pratiques des élèves vis-à-vis de l'utilisation des ressources TICE en classe inversée. Notre outil, sera un questionnaire méthodiquement construit sur un support papier, distribué en classe et ramassé à la fin de son administration. Après, nous procéderons à une série d'analyses. Nous en dégagerons des résultats. Nous les discuterons, et nous en tirerons les conclusions.

Au cinquième chapitre, nous mènerons deux études d'expérimentations autour du ModLI et du ModL2<sup>t</sup>, nos deux nouveaux modèles analytiques de la décroissance radioactive. Nous pensons que chacun d'eux, sera une alternative qui remédiera aux échecs que connaissent les phases de l'expérimentation et de la modélisation mathématique, lors de l'enseignement et l'apprentissage du phénomène de la décroissance radioactive, en classes de la 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat scientifique marocain, pour les branches SVT et PC.

Au sixième et dernier chapitre de ce travail de thèse, ce sont les études de validation relatives à ModLI et à ModL2<sup>t</sup> qui y figureront. Nous citons : *"la validation est l'ensemble des opérations nécessaires pour prouver que le protocole est suffisamment exact et fiable pour avoir confiance dans les résultats fournis et ceci pour un usage déterminé."* (Blanchin, 2010). En effet, nous travaillons dans l'attente que nos deux modèles connaissent un usage routinier dans les classes de physique, lors de l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive et lors de l'établissement de sa loi. C'est pourquoi nous proposons de mener les tests de l'étude de validation dans des situations de classes entières du baccalauréat marocain, des branches SVT et PC. Tout en respectant la charge horaire préconisée par les instructions officielles au Maroc. Ces études de validation ont été conduites auprès de nouveaux bacheliers de l'année scolaire qui a suivi celle des études exploratoire et d'expérimentations. Pour cela, toutes dispositions prises, les études de validation du ModLI et du ModL2<sup>t</sup>, se composeront de séquences d'initiation à la modélisation sur la décroissance radioactive. Elles seront suivies par des pré-tests et des post-tests se rapportant à la modélisation mathématique de la loi de la décroissance radioactive. Nous

adjoindrons à l'administration de chaque test, ses résultats, des analyses, et des discussions, desquelles nous en tirerons des conclusions.

A la fin de ce travail, et en de guise synthèse, figure une conclusion générale. Nous y récapitulerons l'essentiel de l'ensemble des travaux de recherche de notre présente thèse.

**PREMIER CHAPITRE : ETAT DE L'ART DES LIENS ENTRE LA  
PHYSIQUE ET LES MATHEMATIQUES**

## A// INTRODUCTION

Il est très remarquable que la physique est singulière dans sa mobilisation avec succès des mathématiques. L'histoire des deux disciplines en atteste. En plus, n'importe quel chapitre de la physique semble servir d'exemple à ces affirmations. Ce type de liaison particulière nous conduit directement à faire un détour par la littérature, pour examiner de plus près les travaux antérieurs sur le sujet.

Dans ce premier chapitre, nous nous intéressons aux liens entre la physique et les mathématiques dans leurs dimensions historique, épistémologique, didactique, et au niveau de la méthodologie du raisonnement propre à chaque discipline.

En effet, nous adoptons pour la dimension historique, l'approche descriptive et non exhaustive, pour relater les facettes des liens entre la physique et les mathématiques, depuis l'antiquité jusqu'à nos jours.

Et pour que nous puissions être éclairés par les débats que soulèvent les liens des mathématiques à la physique déjà établis dans la littérature, nous préconisons une discussion épistémologique sur la nature de ces liens. A savoir, liens de constitution, liens de langage, liens d'outils, liens de correspondance, ...

En dernier, le point de vue didactique des liens des mathématiques à la physique, sera l'occasion de brasser de plus près les concepts de l'enseignement et de l'apprentissage, à la lumière de l'interdisciplinarité, des transversalités, des objets et événements entre concret et abstrait, des approches empirique et théorique, et de la mobilisation des TICE, aussi bien en présentiel que dans le cadre de la classe inversée.

## B// LIENS ENTRE LA PHYSIQUE ET LES MATHÉMATIQUES

Dans la littérature, les liens de la physique avec les mathématiques s'étalent sur différentes dimensions. Ils se trouvent en long et en large de l'histoire des sciences. Ces liens prennent forme aux niveaux spécifiques de l'épistémologie de la physique, et de celle des mathématiques. Alors que la didactique des deux disciplines ne manque pas de refléter leurs qualités charnières.

Nous proposons donc d'articuler l'étude bibliographique de cette recherche, autour des axes suivants :

- Chronologie ;
- Dimension épistémologique ;
- Dimension didactique ;
- Dimension TICE.

## I. Chronologie des liens entre la physique et les mathématiques

Nous choisissons de porter notre intérêt sur les facettes historiques des liens entre les mathématiques et la physique, comme elles ont été abordées et critiquées par l'historien Thomas S Kuhn(Kuhn, 1975), sous forme de review soulevant les points suivants :

### 1. Naissance des vocabulaires spécifiques aux sciences classiques

Dans l'Antiquité, l'astronomie, les mathématiques et la géométrie ont été les disciplines les plus développées parmi les sciences. C'est alors, à partir du 5ème siècle avant JC, sous le nom de "sciences classiques", que les mathématiques, l'astronomie, la mécanique statique<sup>1</sup> et l'optique géométrique, furent les seules disciplines qui ont commencé à se doter d'un vocabulaire relativement spécifique. Cependant, les concepts, techniques, diagrammes et vocabulaires, leur assurant un statut spécial, furent presque tous tirés des mathématiques. Du coup, elles s'alignèrent toutes au niveau de la présentation, comme à celui de la structure de bloc de recherche, le plus souvent logico-déductive (Kuhn, 1975).

### 2. De l'ère des mathématiques utilitaires aux mathématiques abstraites

Jadis, l'idée de savoirs utilitaires avait été au cœur des liens entre les mathématiques et les sciences. Les données élaborées des expériences n'acquerraient généralement de l'importance qu'à partir du moment où leur poursuite revêt une fonction sociale consciente. Dans l'Antiquité, l'anatomie et la physiologie doivent

---

<sup>1</sup> La mécanique statique : dans l'Antiquité, la mécanique statique se disait de la branche de la physique qui étudie les systèmes mécaniques au repos dans un repère galiléen.

leur haut niveau de développement à leur liaison apparente avec la médecine. Alors que la grande nouveauté des mathématiques avec les grecs, c'est qu'elles avaient quitté le domaine de l'utilitaire pour rentrer dans celui de l'abstraction. Les mathématiques devenaient une branche de la philosophie. De l'argumentation philosophique découle l'argumentation mathématique. Il ne suffit plus d'appliquer. Il faut prouver et convaincre. C'est la naissance de la démonstration, avec autres objets d'étude : les mathématiques plus que les méthodes, elles étudient aussi des objets, et des représentations imparfaites d'objets parfaits<sup>2</sup> (Kuhn, 1975).

### **3. Du baconisme à la séparation des mathématiques pures des autres sciences classiques**

Dans la page 981 des *Annales Economies, Sociétés, Civismes* (Kuhn, 1975), Thomas S Kuhn a écrit : *“Roger Bacon écrit quelque part que si la théorie permet d'établir la capacité de la flamme à brûler de la chair, il est cependant plus concluant, l'esprit étant après tout sujet à erreur, de poser carrément sa main dans l'âtre.”*. C'est dire qu'en physique, pour les adeptes du baconisme, nulle démarche spéculative ne peut se substituer à l'approche empirique dans la création des savoirs, et de leur validation crédible.

De ce fait, le baconisme est devenu le courant philosophique qui orienta plus, les recherches en physique vers une structure inductive. Désormais, la recherche en physique se base sur l'instrumentation des approches expérimentales, et se méfie des structures quasi-déductives des sciences dites classiques. Ce courant mettait plus l'accent sur l'empirisme, par le développement et l'utilisation des instruments comme outils essentiels à toute entreprise expérimentale. Ainsi, la physique est devenue visiblement instrumentale. Elle systématisait l'utilisation de tout l'appareillage de l'observation astronomique du 17<sup>ème</sup> siècle : le télescope, le microscope, le thermomètre, l'électroscope, le baromètre, la pompe à air et bien d'autres dispositifs (Kuhn, 1975). Cette nouvelle donne, se disputait la notoriété scientifique avec les sciences classiques. G.Galilée (Kuhn, 1975), à l'image de tous les adeptes du courant classique, rapporta que la puissance de sa pensée le dispensa

---

<sup>2</sup> Le travail n'est plus sur un cercle mais sur l'idée d'un cercle.

d'effectuer les expériences qu'il décrit. Il faisait de l'expérience mentale le vecteur naturellement évident de validation.

Par la suite, un système fédérateur entre toutes ces approches, s'est instauré conjointement avec la synergie des savoirs. Dans cette synergie, chaque discipline se taille un statut particulier. C'est en fait le réalisme pragmatique qui a fait que les sciences classiques et baconiennes se trouvent rapprochées. Cependant, les disciplines se démarquèrent les unes des autres. Chacune se forgèrent son propre modèle d'institution. Même pour les disciplines de vieille date, à savoir les mathématiques et l'astronomie, en passant par la chimie qui a su maintenir ses liens avec l'industrie et les autres domaines expérimentaux (Kuhn, 1975). Au 19<sup>ème</sup> siècle, une perception différente de l'identité des mathématiques s'est installée, et a conduit à l'apparition des mathématiques appliquées sous formes de disciplines telles que la mécanique céleste hydrodynamique. La séparation des champs de recherche des mathématiques et de la physique, s'effectua pour leurs propres intérêts, mais aussi pour les conséquences positives qu'a eues le développement de la physique<sup>3</sup> (Kuhn, 1975).

#### **4. Appropriation d'une mathématisation de la physique**

Les raisons et les modalités de l'évolution des sciences classiques peuvent se trouver, en partie, dans leurs développements internes au cours du 18<sup>ème</sup> siècle (Kuhn, 1975). Néanmoins, de très nombreux domaines de la physique ont connu une diffusion extrêmement rapide et très large des mathématiques. Les études portant sur la chaleur, l'électricité, le magnétisme, l'optique,... se proclamaient ainsi comme disciplines de la physique moderne. Alors que les mathématiques y figurent à la fois, dans les phases fondamentales et structurales, relevant du pur domaine de la physique (Kuhn, 1975). Le début du 19<sup>ème</sup> siècle a connu une ouverture encore très rapide des théories qualitatives aux mathématiques (Kuhn, 1975). En effet, il y a eu séparation systématique des notions de chaleur et de température, sur la base de la théorie de Fourier introduisant le concept de chaleur spécifique. Poisson avait

---

<sup>3</sup> L'analyse du mouvement a été remaniée par les lois nouvelles entièrement quantitatives. L'optique a été enrichit d'une nouvelle théorie de la vision, la première solution acceptable au problème classique de la réfraction.

introduit les mathématiques dans la théorie du magnétisme et d'électricité statique, et ce, à partir des travaux antérieurs de Coulomb effectués pour la plupart, dans les années 1790. Ampère (Kastler, 1977) avait mathématisé les interactions entre les courants électriques<sup>4</sup>, presque immédiatement après qu'il ait découvert les effets qui sont objet de sa théorie. De même, les progrès récents accomplis dans le domaine des techniques mathématiques appliquées à la théorie de la gravitation et aux cordes vibrantes, jouaient un rôle particulier dans la mathématisation de la théorie électrique et thermique (Kuhn, 1975).

Le foisonnement total des mathématiques et de la physique est notable aux 19ème et 20ème siècles (Kuhn, 1975). En effet, au milieu du 19ème siècle, les institutions en Europe mettaient en place les premiers jalons d'un terrain pour une communication facile, rassemblant des spécialistes qui soient très compétents, dans le domaine des mathématiques, ou dans celui de l'expérimentation. Des hommes comme Weber, Neumann, Helmholtz et Kirchhoff amorcèrent des travaux pour lesquels les expérimentalistes et les mathématiciens se confédéraient pour ne plus être que des praticiens de la physique. L'exemple allemand allait s'étendre à l'ensemble du monde. Du coup, le clivage ancien entre physique expérimentale et physique mathématique s'estompa, pour être remplacé par de plus en plus de foisonnement (Kuhn, 1975).

L'avènement de l'ère de l'informatique, a lancé de nouveaux jalons à cette donne.

## **5. L'ère de l'informatique :**

En toute évidence, ce sont les théories mathématiques (software) qui sont derrière toute l'informatique implémentée sur du matériel physique (hardware). En électronique, la découverte des semi conducteurs et le développement des technologies de leurs productions, ont été concluants dans l'informatisation de tous

---

<sup>4</sup> Sous le vocabulaire : "interaction mutuelle entre deux petits éléments de courant", Ampère est partie dans des modélisations. Il a fini par établir la loi appelée aujourd'hui "loi d'Ampère". p 148 (Kastler, 1977).



les aspects de la vie humaine. La physique a saisi les opportunités offertes par les systèmes informatiques, pour en faire sa pierre de lance. L'expérimentation assistée par ordinateur (ExAO), la simulation, le calcul numérique, ont permis de s'affranchir des barrières mathématiques, pour ne centrer la réflexion que sur la physique. D'où la croissance exponentielle des performances dans les domaines de la physique (Kuhn, 1975).

## II. Dimension épistémologique

Dans la littérature, la dimension épistémologique des liens entre les mathématiques et la physique a suscité des réflexions du genre : les mathématiques sont-elles pour la physique des outils ((BENSAUDE VINCENT, 2005), (Rosmorduc, 1987)), un élément de pensée (OMNÈS, 2014), ou encore un langage, une correspondance, une relation de constitution (LÉVY-LEBLOND, 2014),... Ci-dessous, nous relatons quelques facettes de ces réflexions.

### 1. Les mathématiques sont-elles un langage de la physique ?

Dans son travail sur la physique et les mathématiques, Jean-Marc LÉVY-LEBLOND (LÉVY-LEBLOND, 2014) cite G.Galilée, Henry Poincaré, Albert Einstein, Werner Heisenberg,..., pour avoir donné aux mathématiques le qualificatif de langage de la physique. Jean-Marc LÉVY-LEBLOND rapporte que :

- Dans son ouvrage "L'Essayeur" (LÉVY-LEBLOND, 2014), G.Galilée (1564-1642) annonce que : *"La philosophie est écrite dans ce livre immense perpétuellement ouvert devant nos yeux (je veux dire : l'Univers), mais on ne peut le comprendre si l'on n'apprend pas d'abord à connaître la langue et les caractères dans lesquels il est écrit. Il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et d'autres figures géométriques sans l'intermédiaire desquelles il est humainement impossible d'en comprendre un seul mot, sans elle cela revient à tourner vainement dans un labyrinthe obscur"*.

- De sa part, l'astrophysicien anglais James Hopwood Jeans (1877-1946) écrit : *"Le Grand Architecte semble être mathématicien"* (LÉVY-LEBLOND, 2014).

- Pour Werner Heisenberg (1901-1976) : *"L'idée que les mathématiques pouvaient en quelque sorte s'adapter à des objets de notre expérience me semblait remarquable et*

passionnante. [...], les mathématiques constituent pour ainsi dire le langage à l'aide duquel une question peut être posée et résolue" (LÉVY-LEBLOND, 2014).

- Alors que pour Henry Poincaré (1854-1912) : "Toutes les lois sont tirées de l'expérience, mais, pour les énoncer, il faut une langue spéciale ; le langage ordinaire est trop pauvre, il est d'ailleurs trop vague, pour exprimer des rapports si délicats, si riches et si précis. Voilà donc une première raison pour laquelle le physicien ne peut se passer des mathématiques ; elles lui fournissent la seule langue qu'il puisse parler" (LÉVY-LEBLOND, 2014).

- Albert Einstein (1879-1955) ajoute: "D'après notre expérience à ce jour, nous avons le droit d'être convaincus que la nature est la réalisation de ce qu'on peut imaginer de plus simple mathématiquement. Je suis persuadé que la construction purement mathématique nous permet de trouver ces concepts et les principes les reliant entre eux, qui nous livrent la clef de la compréhension des phénomènes naturels" (LÉVY-LEBLOND, 2014).

## **2. Les mathématiques sont-elles pour la physique un courant de pensée, un outil, ou des correspondances ?**

Le philosophe Gaston Bachelard (1884-1962) parle des mathématiques comme étant un courant de pensée en physique (Rosmorduc, 1987). Il exprima son idée par : "Les hypothèses de la physique se formulent mathématiquement. Les hypothèses scientifiques sont désormais inséparables de leur forme mathématique : elles sont vraiment des pensées mathématiques [...]. Il faut rompre avec ce poncif cher aux philosophes sceptiques qui ne veulent voir dans les mathématiques qu'un langage. Au contraire, la mathématique est une pensée, une pensée sûre de son langage. Le physicien pense l'expérience avec cette pensée mathématique... [...]. Le mathématisme est non plus descriptif mais formateur".

Paul Langevin (1872-1946) est aussi parmi les auteurs qui qualifient les mathématiques d'outils au service de la physique (BENSAUDE VINCENT, 2005). Il annonce : "Il est cependant [...] remarquable que, parmi les constructions abstraites réalisées par les mathématiques [...], aucune ne semble devoir rester inutile au physicien. Par une harmonie singulière, les besoins de l'esprit, soucieux de construire une représentation adéquate du réel, semblent avoir été prévus et devancés par l'analyse logique et l'esthétique abstraite du mathématicien".

Plus qu'un outil, Descartes (1596-1650) érige les mathématiques comme étant le seul socle qui mène à la vérité pour la physique (LÉVY-LEBLOND, 2014). Il fait le commentaire suivant : *"Je trouve en général qu'il [G.Galilée] philosophe beaucoup mieux que le vulgaire, en ce qu'il quitte le plus qu'il peut les erreurs de l'École, et tâche à examiner les matières physiques par des raisons mathématiques. En cela je m'accorde entièrement avec lui et je tiens qu'il n'y a point d'autre moyen pour trouver la vérité"*.

Dans le contexte de réflexions sur les correspondances entre la physique et les mathématiques, T. Vogel affirme que : *"Nous disposons ainsi à propos de chaque chapitre des mathématiques [...] d'une infinité de jeux possibles [...]. Nous avons supposé que, parmi ces jeux, il était possible d'en distinguer que l'on pût faire correspondre à tout ou partie de la réalité physique"* (LÉVY-LEBLOND, 2014). Pour W. Heisenberg : *"Les formules mathématiques ne représentent plus la nature, mais la connaissance que nous en possédons"* (LÉVY-LEBLOND, 2014).

Jean-Marc LÉVY-LEBLOND discute les rapports des mathématiques à la physique (LÉVY-LEBLOND, 2014). Il montre l'existence d'un polymorphisme<sup>5</sup> mathématique de la physique, aussi qu'une plurivalence<sup>6</sup> des mathématiques en physique. Ceci est interprété par l'existence d'une similitude des structures fondamentales, à savoir les principes et les lois en physique face aux axiomes et aux théorèmes en mathématiques. Dès lors, la physique classique se caractérise par la description des systèmes macroscopiques et traite de quantités continues. Alors que la physique quantique ne prenne en charge que des valeurs isolées bien définies. De plus, les lois de la physique classique sont déterminées, sans l'exigence de l'emploi de la notion de probabilité et qu'elles n'imposent pas nécessairement des incertitudes dans les mesures, comme il fait la règle en physique  $ik$ <sup>7</sup>. La Physique fondamentale correspond à l'analyse de ce qui est encore inconnu, et la physique appliquée s'intéresse à l'utilisation pratique de ce qui est déjà connu. En fin, la distinction entre physique expérimentale et physique théorique reflète tout d'abord celle des différentes étapes de la découverte. L'expérience intervient comme le seul outil dans

---

<sup>5</sup> Un phénomène physique peut être exprimé par plusieurs formalismes mathématiques.

<sup>6</sup> Plusieurs phénomènes physiques différents s'écrivent par le même formalisme mathématique.

<sup>7</sup> Les lois de la physique classique sont, au sens mathématique, les formes limites que prennent les lois quantiques lorsque, pour le système considéré, la constante d'action de Planck peut être assimilée à zéro (LÉVY-LEBLOND, 2014).

l'établissement des données et de toutes les vérifications. La théorie prend en charge la création de l'hypothèse et la déduction de ses conséquences (OMNÈS, 2014).

Beaucoup plus profondément que tout ces précédents qualificatifs, J.J.Hopwood, A.Einstein et G.L.P.Bachelard (LÉVY-LEBLOND, 2014), érigent les liens entre la physique et les mathématiques, au statut global de relation de constitution. Ainsi, ces deux disciplines se mutualisent et s'accordent les tâches pour découvrir les objets et les outils intrinsèques, seuls menant à l'étude de la même entité, l'univers...

### 3. Obstacles épistémologiques

Dans une démarche de caractérisation des liens entre épistémologie, histoire et didactique des sciences, A.Mayrargue et P.Savaton (Mayrargue & Savaton, 2006) rapportent que : *"l'idée de partir des expériences historiques dans le cadre de simples procédés didactiques n'aboutie pas nécessairement à dire comment la science pourrait ou devrait être enseignée, au même pied d'égalité avec l'épistémologie qui n'étudie que comment fonctionne la science, mais ne pas comment l'enseigner"*. Mais, Jean-Louis MARTINAND (Martinand, 1993) précise que l'épistémologie et l'histoire des sciences peuvent orienter la formation historique au service de la didactique, par : *"Seule la composante qui s'appuie sur l'innovation et la recherche, et qui assume donc une fonction critique et prospective, [...], appelle des apports historiques."*. Alors que Jean Rosmorduc (Rosmorduc, 1987) a choisi de discuter la capacité spécifique de l'histoire des sciences à mettre en évidence quelques obstacles épistémologiques de la physique. Il énumère des référents conceptuels qui prouvent que l'évolution de la physique a rencontré des obstacles épistémologiques du genre :

"Paradigme dominant" qui fait que chaque science a son "paradigme du moment" qui à un moment donné peut freiner son évolution<sup>8</sup>.

"Paradigme philosophique" peut stopper l'évolution d'une science, comme se fut le cas avec le positivisme<sup>9</sup>.

---

<sup>8</sup> Comme se fut le cas pour la théorie de la relativité restreinte formulée par Einstein en 1905.

<sup>9</sup> Les positivistes (Auguste Comte) ne composaient qu'avec ce qu'ils qualifiaient de réels et d'utiles.

"Pratiques sociales de référence" acculturant les agissements des personnes et groupements sociaux vers une culture sociale de pensées stéréotypées<sup>10</sup>.

"Erreurs et théories erronées" flagrantes émises par des personnes de notoriété scientifique, désorientent considérablement le progrès. Néanmoins, il y en a celles qui lui sont utiles, comme celle qui a amené à la découverte de la radioactivité,...

"L'analogie" comme étant un obstacle épistémologique dans les situations qui échappent à la mesure, malgré qu'elle fait progresser dans pas mal d'autres. C'est pourquoi Jean Rosmorduc se pose la question : "*L'analogie est-elle "dans les choses", ou seulement "dans les têtes" ?*".

"Le dogmatisme ou l'esprit critique" les praticiens sont appelés à user d'un dogmatisme pondéré sans barrer la route à l'épanouissement de l'esprit critique.

"Les mathématiques sont globalement un modèle pour la physique". Le penser, serait aussi une forme d'obstacles épistémologiques voulant étouffer les aspects intuitifs et heuristiques de la physique.

"La persistance des perceptifs conceptuels" face aux révolutions physiques majeurs, comme celles qui a touché les notions d'espace et de temps entre mécanique classique et relativiste, le principe de conservation de masse à céder la place à celui de la conservation de l'énergie,...Ce sont des réalité qui n'acceptent pas des ajustement de la conception en gardant le même registre.

Ainsi, Jean Rosmorduc interpelle les didacticiens de la physique à coupler leurs efforts avec ceux des historiens et épistémologues de cette discipline, afin de prendre des décisions pédagogiques sur fond plus illuminé.

Dans la littérature ((C. Bernard, 1865), (Develay, 1989), (Coquidé, 1998; Orlandi, 1991)), parmi d'autres travaux discutent les "démarches expérimentales" au sens d'obstacle épistémologique. Le fait de choisir une démarche de préférence (OHERIC (C. Bernard, 1865), PHERIC (Orlandi, 1991),...) est effectivement un obstacle épistémologique. Cependant, l'étude menée par l'historien Mirko Grmek (C. Bernard, 1865) sur les écrits publiés de Claude Bernard<sup>11</sup> et sur ses carnets de laboratoire, a montré qu'il lui arrivait des errances, des abandons de pistes, des

---

<sup>10</sup> Comme se fut le cas pour l'idée "sciences ou techniques ?", qui stipula que les techniques précèdent de loin les découvertes scientifiques.

<sup>11</sup> C'est Claude BERNARD (1813-1878), le père de la méthode expérimentale qui a théorisé OHERIC (C. Bernard, 1865). Il ne la présente pas explicitement comme n'étant pas la méthode expérimentale figée.

embranchements brusques..., choses qui montrent la non-linéarité de la démarche expérimentale. Ces régulations ne figurent pas sur le schéma OHERIC qu'il propose, faisant office d'obstacles épistémologiques pour les novices. Par ailleurs, les modes de raisonnement de ces novices peuvent se perturber dans les contextes interdisciplinaires, en l'occurrence ceux des mathématiques et de la physique ((Malafosse et al., 2001), (Johsua, 1989)). En effet, la physique est une science tournée vers l'inductivisme plus que vers le déductivisme. Alors que les mathématiques se préconisent le paradigme déductif.

### III. Points de vue didactique des liens de la physique et des mathématiques

#### 1. L'enseignement de la physique doit-il être expérimental ou théorique ?

Pour Pierre Duhem, la physique a le double aspect d'être une science expérimentale qui a besoin de modèles théoriques, aussi bien qu'une science théorique qui est fondée sur des faits expérimentaux ayant en amont, l'existence d'une interprétation théorique rendant possible l'expérience physique (Duhem, 1989). Cette même réflexion se trouve incluse dans le schéma de la figure 1 ci-dessous, décrivant le contraste entre d'une part, les éléments d'un exemple de modèle d'une démarche expérimentale, et d'autre part, les éléments représentatifs du phénomène étudié : le réel, son modèle(s), et sa théorie (MÉHEUT, 2005).

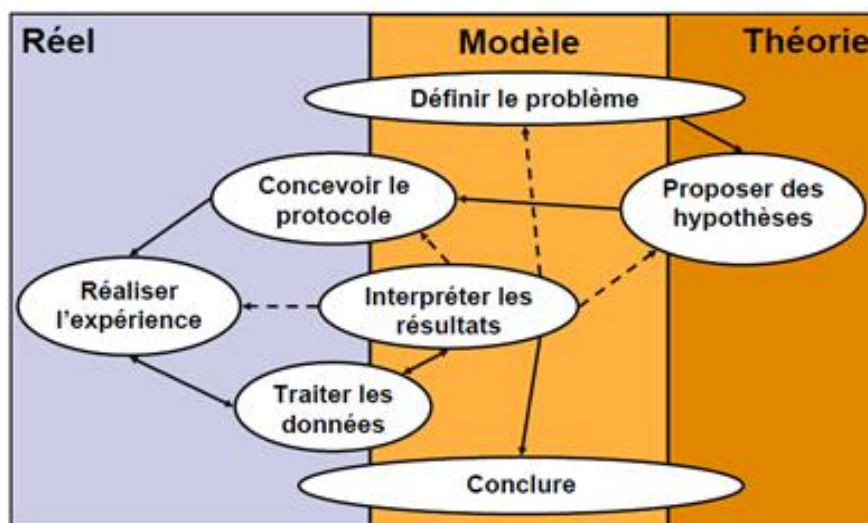


Figure 1 : Schéma des intersections entre une démarche expérimentale pour un problème étudié et ses éléments représentatifs (réel, modèle, théorie)

Hervé Grau (Grau, 2000) voit que l'originalité des sciences physiques, c'est qu'elles sont à l'intersection des démarches mathématiques, expérimentales et théoriques, auxquelles s'est rajoutée depuis l'avènement de l'ordinateur la démarche de simulation. Bien que pour des situations didactiques, l'approche théorique s'impose car "la résistance du réel" (Beaufils, 1999) rend l'expérimentation impossible. Hervé Grau ajoute (Grau, 2000) : "*enseigner les sciences physiques, c'est enseigner des modèles [...]. La méthode pour y parvenir est la méthode expérimentale, termes a priori contradictoires et qui décrivent en fait la méthode pédagogique qui consiste à ce qu'en un temps forcément limité, les élèves et surtout le professeur formulent un problème, que les élèves émettent des hypothèses, conçoivent alors une expérience vérifiant cette hypothèse, la réalisent et interprètent les résultats.*". Dans ce contexte, Samuel Johsua (Johsua, 1989) énumère les différents recours didactiques à l'expérimental. Il parle alors d'expérience de référence<sup>12</sup>, d'expérience initiale, d'expérience test, et d'expérience prototypique (fondatrice : unique pour un fait donné). Et pour faire admettre la plausibilité d'un modèle, ce sont deux autres types d'expériences qui emboîtent le pas : les expériences de confirmation et les expériences de renforcement. Dans une telle perspective, une pratique est courante (Legendre, 1994) : les enseignements des sciences physiques se basent souvent sur l'approche empirico-inductive. Ils donnent ainsi aux élèves l'impression que les activités de laboratoire se réduisent à un exercice d'application, de façon linéaire, d'une série d'étapes prédéterminées. De sa part, E.Saltiel (Saltiel, 1994) note l'existence de pareils représentations chez les didacticiens, et chez les enseignants en particulier. Cet auteur constate qu'elles conduisent à l'adoption de l'une ou l'autre, parmi trois types de démarches, dans l'enseignement de la physique au niveau du secondaire : des démarches qui n'accordent pas suffisamment d'intérêt ni pour l'expérimentation ni pour la méthode expérimentale, non plus pour l'observation et les renvois à la physique quotidienne ; d'autres démarches nient implicitement la réalité de la physique, qui est une science théorique requérant des élèves, à priori, le développement de leurs goûts et de leurs

---

<sup>12</sup> L'expérience de référence a une double fonction. Celle de la proposition du problème physique à étudier, et celle de l'introduction d'un modèle rendant compte de sa phénoménologie (Johsua, 1989).

capacités pour l'abstraction ; la dernière position renvoie sur l'inconvenance de la programmation des sciences physiques, assez tôt au secondaire, sans tenir compte du fait que les élèves n'ont encore pas développés les capacités d'analyses et d'abstractions nécessaires pour faire des allers et retours entre l'expérimental et le théorique.

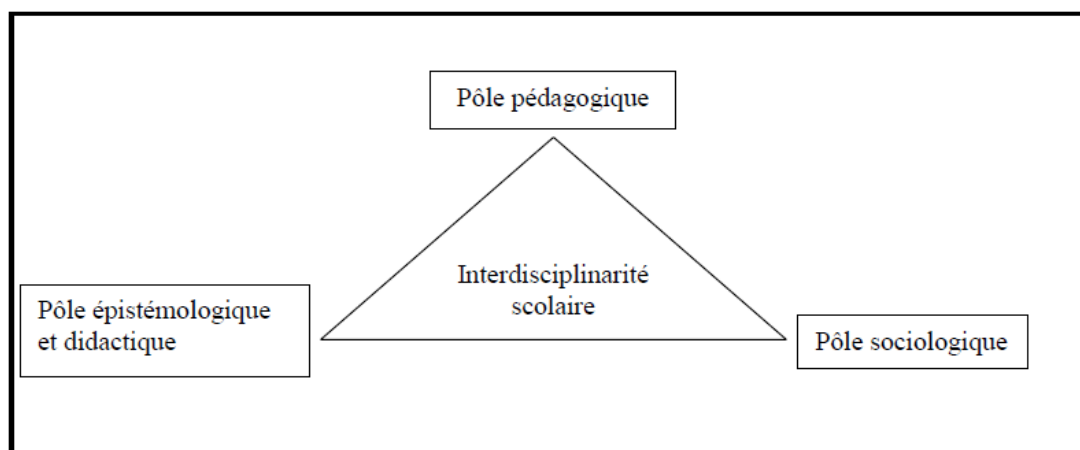
## **2. La formation interdisciplinaire mathématique - physique des professeurs**

Penser, concevoir et asseoir l'interdisciplinarité (Idem : trans, multi, pluri et intradisciplinarité) dans le système éducatif, c'est rendre son âme à l'écosystème d'enseignement-apprentissage. C'est dans cette perspective que N.Bednarz et M.Perrin-Glorian (Bednarz & Perrin-Glorian, 2003), et Guy Robardet (Robardet, 1998), ont établi que la formation initiale dispensée au sein des structures de formation des enseignants stagiaires en mathématiques et en physique, se heurte d'emblée à deux types de handicaps. Un, d'ordre institutionnel, et l'autre, d'ordre épistémologique. L'handicap institutionnel se manifeste tant à travers les programmes et le temps insuffisant qui leur est alloué, qu'au niveau de l'irrégularité des formations continues, encore moins inscrites dans le long terme. Alors que l'handicape épistémologique regroupe les représentations des enseignants stagiaires, encore vives de leur phase estudiantine, sur les contenus à enseigner. Guy Robardet (Robardet, 1998) relève un autre handicap, à la fois d'ordres épistémologique et institutionnel, causé par des contenus curriculaires non unifiés, enseignés en partie, selon le centre de formation et selon le degré de participation, de tout un chacun, parmi le corps professoral, dans les activités de recherche académiques en didactique des sciences physiques.

De leur part, dans un rapport sur l'interdisciplinarité et l'enseignement des sciences, technologies et mathématiques au premier cycle du secondaire publié en 2010, Abdelkrim HASNI et al (Hasni, Lenoir, Larose, & Squalli, 2010) concluent qu'afin de répondre à la mission formatrice de l'école, c'est à la jonction de trois pôles que l'interdisciplinarité devrait être pensée et mise en œuvre (voir figure 2 ci-dessous) : le pôle didactique et épistémologique du fait qu'il permet de se donner



une représentation plus adéquate des problèmes et des situations analysées que celle offerte par le simple regard disciplinaire; le pôle sociologique permettant l'égalité et l'appropriation d'un savoir utile par tous; et le pôle pédagogique pour la motivation et l'augmentation de l'intérêt des élèves, prise en considération des processus psychopédagogiques, travail d'équipe, etc.



**Figure 2 : triangle interdisciplinaire scolaire selon A.HASNI et al** (Hasni et al., 2010)

Par ailleurs, parmi les actions originales, entreprises spécialement pour jeter les bases des liens interdisciplinaires entre les mathématiques et la physique, celle de D.MALLAFOSSE (Malafosse, 2003). L'auteur a focalisé son travail sur l'élaboration d'un module additionnel de formation inter-didactique mathématique-physique des professeurs de collège et de lycée, et sur la conception de ses phases d'expérimentation. L'outil élaboré a été basé sur les notions de cadre de rationalité, de registre sémiotique et d'espace de réalité. D'une part, il a utilisé cet outil comme élément du corpus de connaissances à ajouter à la formation initiale. Et d'autre part, il a utilisé le même outil comme élément d'analyse des conceptions des professeurs stagiaires, pour mettre en évidence l'existence d'obstacles épistémologiques se manifestant sous la forme de ruptures entre les concepts scientifiques et les conceptions de l'enseignant. Comme solution à ce fait établi, D.Malafosse (Malafosse, 2003) élabore un modèle et le recommande, pour que les professeurs des mathématiques et des sciences physiques aient des repères professionnels pour penser les continuités et les ruptures entre ces deux disciplines. Il place l'élève au centre d'un triangle inter-didactique mathématique-physique (figure 3).

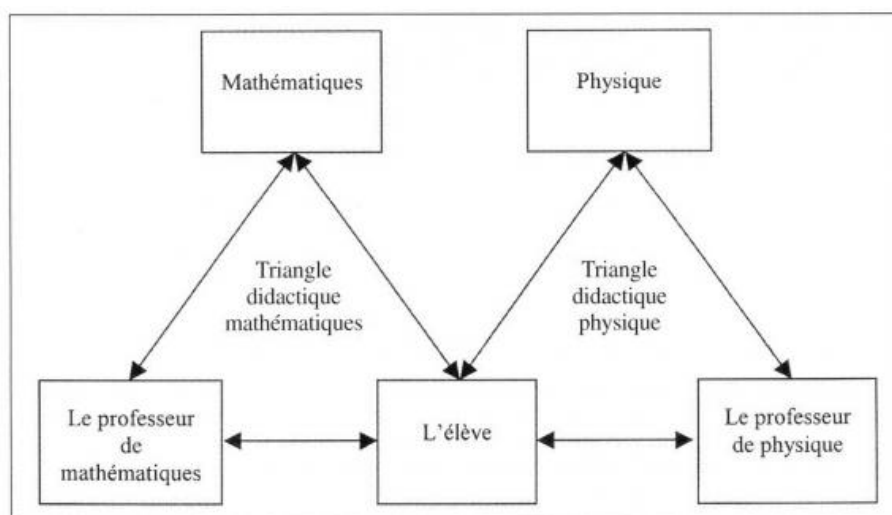


Figure 3 : triangle inter-didactique mathématique-physique

### 3. Enseignement de la décroissance radioactive par analogies :

Pour l’enseignement et de l’apprentissage de la décroissance radioactive, des auteurs se basent sur des analogies faites entre ce phénomène et autres faits de la vie courantes. Le jet de dés ((Klein & Kagan, 2010), (Jesse, 2003), et (Schultz, 1997)) ou de pièces de monnaies (Bakaç, TaúR-lu, & Uyumaz, 2011), le tirages au hasard des fèves ou des billes de deux couleurs différentes contenues dans une urne (Edge, 1978), la construction graphique de la décroissance radioactive à l’aide de barrettes de papier et de la colle (Hughes & Zalts, 2000). Par ailleurs en classe, D.R.Lapp (Lapp, 2010) parle de la présentation d’exemples d’éléments naturellement radioactifs, conjugués à des informations fournies sur la manière d’acquérir bon nombre de ces articles à moindre coût (corps humain, radon issu des articles de poterie, uranium dans l’ouraline,...). Il a constaté que la présence de ces matériaux dans la salle de classe était non seulement utile pour enseigner la radiation nucléaire et démystifier le mythe du nucléaire libre, mais également pour aider les élèves à comprendre l’histoire de la sauvegarde et des utilisations commerciales de matières radioactives. Telles que l’injection et l’ingestion de radium en tant que médicament. Cependant au Maroc, le cours de la décroissance radioactive au lycée fait défaut, à cause de l’absence totale des appareils de mesure adéquats, et le cas échéants, à cause de l’inexistence des structures de sécurité relative à la manipulation et au stockage des

matières radioactives. Ceci rend le fait d'aller chercher du côté des possibilités offertes par les TICE, l'alternative à ce manque d'expériences.

#### **IV. TICE entre besoins didactiques et obstacles à son intégration**

##### **1. Exemples d'utilisations des TICE dans l'enseignement de la physique**

L'utilisation des technologies de l'information et de la communication dans l'enseignement (TICE) améliore significativement l'enseignement-apprentissage de la physique ((Guennoun & Benjelloun, 2014), (El BACHARI, El Hassan, & EL-ADNANI, 2010)). Ceci a été confirmé en particulier dans un travail spécifique à l'enseignement-apprentissage de l'électricité (Guennoun & Benjelloun, 2015). Autrement, la combinaison de l'expérimentation assistée par ordinateur (ExAO) et la simulation assistée par ordinateur (SAO) augmente à 93% l'intérêt des apprenants pour l'approche expérimentale (Riopel, Potvin, & Raïche, 2008). De pareils résultats ont été liés au fait que des enseignants ont changé leurs pratiques traditionnelles par le développement de nouvelles méthodes d'apprentissage intégrant tout progrès technologique (Zellweger, 2005). Cependant, les pratiques actuelles de l'enseignement-apprentissage de la physique au Maroc, sont encore loin de la conjugaison entre les efforts visant à utiliser les structures TICE disponibles dans les lycées, et ceux disponibles dans les foyers des élèves (MAMANE & BENJELLOUN, 2018e). Encore, la connaissance préalable des intentions des élèves pour les intégrer aux stratégies pédagogiques est une condition indispensable pour rendre efficace l'utilisation des TICE (Barrette, 2009). Ainsi, la pédagogie inversée se présente doublement comme un outil de recueil d'informations et un vecteur d'enseignement-apprentissage appliquant la pédagogie différenciée<sup>13</sup> (Latouche, 2015).

##### **2. Typologie de l'usage des TICE**

Selon le site gouvernemental français éducol<sup>14</sup>, la typologie des usages pédagogiques actuels des TICE, se présentent en cinq catégories : TICE pour échanger, communiquer, collaborer et coopérer ; TICE pour produire, créer et

---

<sup>13</sup> Différencier : faire apparaître la différence ; distinguer en faisant ressortir les différences.

<sup>14</sup> Eduscol : site web gouvernemental de la république de France <http://eduscol.education.fr/pid26435/enseigner-avec-le-numerique.html>

publier ; TICE pour rechercher et se documenter ; TICE pour se former et s'auto-former ; et les TICE pour animer et organiser.

Récemment, l'étude faite par Mohamed Mastafi (Mastafi, 2013), montre qu'ils ne sont que 11% parmi les enseignants marocains du primaire et du secondaire qui utilisent souvent les TICE en salle de classe. 13% parmi eux, utilisent occasionnellement les TICE. Alors que la majorité des enseignants (61 %) de l'échantillon ne l'ont jamais utilisé. La typologie de leurs usages en classe couvre : Power Point (60%), logiciels éducatifs (39%), recherche internet (34%), logiciels de simulation (25%), et 54% pour autres activités (ExAO, jeux sérieux, tableaux numériques interactifs,...).

Notre étude (MAMANE & BENJELLOUN, 2016b), sur les préférences des élèves marocains concernant l'utilisation des TICE en physique, montre que ces derniers recherchent les exercices ou consultent d'abord, ceux qui sont solutionnés. Et vers presque une préférence égale, que les élèves font recours à l'usage des TICE lors de la documentation, ou pour la recherche de photos d'expériences ou de leurs schémas. Ou encore pour la visualisation des simulations d'expériences ou pour la recherche de leurs vidéos. La même étude établie, que relativement aux sites web, les préférences des élèves se déclinent comme suit : les élèves effectueraient des recherches à 75,2% via Youtube, à 40,9% via Facebook, à 41,6% via les sites de lycées marocains, à 56,9% via les forums et à 64,2% via autres sites web sûrs et fiables. Il en découle que les élèves préfèrent à 72,09% les modélisations mathématiques prêtes des phénomènes en sciences physiques, que de les construire, du moment qu'ils sont des ressources mobilisables par les TICE.

### **3. TICE, obstacles, alternatives et instruments d'évaluation du degré d'intégration**

Selon la définition de F. Mangenot (Bangou, 2006), pour qui "*l'intégration des TICE, c'est quand l'outil informatique est mis avec efficacité au service des apprentissages*". Les études faites au Maroc sur les obstacles à l'intégration des TICE, en l'occurrence celle faite par Mohamed Mastafi (Mastafi, 2013), montrent que les obstacles sont causés par : des facteurs liés aux infrastructures TICE (machines, logiciels adéquats, connections à internet,...); ou liés au développement professionnel des

enseignants et à la politique d'intégration des TICE dans l'enseignement ; et d'autres relatifs au système éducatif lui-même. Du côté des élèves, nous avons dressé un constat similaire (MAMANE & BENJELLOUN, 2016a). de même, A. MAOUNI et al (Maouni, Mimet, Khaddor, Madrane, & Moumene, 2014). Ils ont établi que l'intégration des TICE dans les pratiques usagères des élèves pour l'apprentissage des sciences physiques, est freinée, à la fois, par des facteurs dépendant des infrastructures TICE de leurs foyers et lycées, et par des facteurs culturels liés aux élèves et leurs professeurs. Comme solution, F.X. Bernard et al (F. Bernard & Ailincai, 2012) voient que du côté des élèves, une des alternatives consiste à mettre à profit le grand afflué des adolescents vers le multimédia. Il annonce : *"qu'il ne s'agirait donc pas de développer des compétences dans le contexte scolaire, en parallèle et indépendamment de celles acquises au quotidien, mais de s'appuyer sur ces dernières pour les expliciter, les formaliser et les enrichir de manière à ce qu'elles deviennent conscientisées et donc opératoires en toutes circonstances."* Quant à S.Kheraz et al (Kheraz & El Hajjami, 2016), ils ont tracé pour but la contribution au développement des compétences des acteurs pédagogiques dans le domaine de l'intégration des TICE. Pour ce faire, ils ont développé le dispositif « MOOCGenieTICE » comme étant une articulation entre des types de MOOC dans le cadre d'une ingénierie qui s'est basée sur le référentiel de compétences UNESCO et un modèle d'intégration pédagogique des TICE. Pour notre part (MAMANE & BENJELLOUN, 2018c), nous avons élaboré SimulP200. Notre but est que cette simulation aide la classe à surmonter la résistance du réel, relatif au contexte expérimental de la décroissance radioactive.

En fin, la démarche d'intégration des TICE dans l'enseignement nécessite des évaluations systémique et systématique, pour introduire à tout moment, les ajustements appropriés. Dans cette perspective, nous relatons deux exemples, celui de P.F.Coen et al (Coen & Schumacher, 2006) et celui de G.Chemsi et al (Chemsi, Radid, Sadiq, & Talbi, 2011). Les premiers ont conçu, expérimenté, validé, et listé les limites de l'emploi d'un instrument baptisé Visi-TIC, destiné à évaluer le degré d'intégration des TICE dans l'enseignement. De même, G.Chemsi et al ont procédé à la conception et à la validation de l'outil baptisé EVAL-EFDE, pour l'évaluation des enseignements et des formations à distance, et ce par les étudiants marocains. Reste à

ne pas manquer la signalisation des deux grandes réserves émises par K.AHAJI et al (Ahaji, El Hajjami, Lotfi, EL MOKRI, & CHIKHAOUI, 2007), lors de leur travail intitulé "L'évaluation des produits multimédias :« Un processus méthodologique complexe ». Ils stipulent que : "*L'évaluation critérielle ou experte et l'analyse de la fidélité de mesure restent insuffisantes pour juger de la valeur pédagogique du multimédia ; Le consensus du but de l'évaluation des produits multimédias entre les auteurs est d'expérimenter le multimédia auprès des apprenants (utilisateurs).*".

## C// CONCLUSION

En examinant les travaux de plusieurs auteurs sur les liens des mathématiques et de la physique, il nous semble clair et incontestable que ces liens sont singuliers, au niveau de leurs manifestations, qu'au niveau des passerelles et services mutuellement rendus pour le développement de chacune des deux disciplines.

En effet, les liens entre la physique et les mathématiques transcendent les dimensions historique, épistémologique, didactique, ainsi que la méthodologie du raisonnement propre à chacune des deux disciplines. C'est pourquoi, dans ce premier chapitre, nous avons commencé par voir de près ces liens dans leur dimension historique. Elle a été l'occasion de décrire les origines des vocabulaires spécifiques aux sciences classiques, passant par l'avènement de la mathématisation. Cette ère a connu des débats tendus avec le courant du baconisme. Cette gestation a servi de charnières pour l'appropriation d'une mathématisation de la physique, jusqu'à son informatisation que nous connaissons actuellement. Après, nous nous sommes intéressés au débat épistémologique que soulèvent les liens des mathématiques à la physique. Il est déjà établi dans la littérature que ces deux disciplines sont organiquement liées. D'éminents savants ont évoqué des liens de langage, des liens d'outils,... ou plus, des liens qualifiés de courant de pensée, et même des liens de constitution. Cependant, la bibliographie ne manque pas d'énumérer les obstacles épistémologiques qui ont marqué l'histoire des deux disciplines. Ce schéma, nous a balisé le terrain de l'exploration du point de vue didactique des liens des mathématiques à la physique. Ainsi, les concepts de l'enseignement et de l'apprentissage sont débattus au niveau des approches

disciplinaires et interdisciplinaires, au niveau de la mobilisation des TICE, et au niveau du cas spécifique en physique, de la décroissance radioactive. Dès lors, l'étude bibliographique que nous avons faite, a débouché sur la formulation de la problématique du présent travail de thèse, et l'explicitation de son originalité. Cette problématique sera le sujet du chapitre suivant.

## **DEUXIEME CHAPITRE : PROBLEMATIQUE DE LA RECHERCHE**



## PROBLEMATIQUE DE LA RECHERCHE

Entre les sciences physiques et les mathématiques, la relation continue d'être un sujet à débattre. Elle est qualifiée de relation de langage par G.Galilée, W.Heisenberg et H.Poincaré (LÉVY-LEBLOND, 2014). De relation de constitution par J.J.Hopwood, A Einstein et G.L.P.Bachelard (LÉVY-LEBLOND, 2014). Aussi, de courant de pensée en physique, pour G.L.P.Bachelard (Rosmorduc, 1987). D'outils par P.Langevin et J.M.L.Leblond (BENSAUDE VINCENT, 2005). Même du seul outil menant à la vérité pour la physique par R.Descartes, parfois d'isomorphisme (LÉVY-LEBLOND, 2014). C'est pourquoi, depuis G.Galilée (1564, 1642), le formalisme mathématique est adopté efficacement, dans l'opérationnalisation d'enchaînements et de réflexions en physique (LÉVY-LEBLOND, 2014). Ainsi, introduire des objets mathématiques dans des étapes bien précises des contenus en physique, a fait que les deux disciplines connaissent une transversalité inégalée dans ses états les plus développés. Il est souvent question d'utiliser en physique, des registres sémiotiques presque purement mathématiques, autant que leurs registres sémantiques correspondants, à savoir, les signes (+, -, \*, /, <, >, =, ( ),...), les symboles, les notations (la variable  $x$ ,...), les opérateurs (dérivé, intégral,...), les équations et les équations différentielles ... Cependant en 2015, le Conseil Supérieur de l'Éducation de la Formation et de la Recherche, a publié entre autres, un rapport accablant (Conseil Supérieur de l'Éducation de la Formation et de la Recherche Instance Nationale d'Évaluation du Système d'Éducation de Formation et de la Recherche Scientifique Royaume du Maroc, 2015). Il dénonce le faible niveau observé chez presque la quasi totalité des élèves en langues, mathématiques et disciplines scientifiques. Ce rapport spécifie qu'une grande partie des difficultés de l'apprentissage des sciences physiques, trouve ses origines d'abord dans la non maîtrise des mathématiques et des sciences par les élèves. Au second rang arrive le manque d'équipement des laboratoires ou de sa vétusté, et l'inconvenance des schémas didactiques et pédagogiques. Ce rapport pris comme indicateur, interpelle tous les acteurs de la promotion de l'enseignement national par leurs qualités de pédagogues, didacticiens, hommes politiques, administrations, familles et organisme sociétaux à réfléchir sur leurs choix actuels (Conseil Supérieur de l'Éducation, de la Formation et de la Recherche, 2015).

Pour l'étude des interactions entre les difficultés de l'enseignement et de l'apprentissage des sciences physiques et celles liées à la maîtrise des mathématiques, appliquée au cas de la décroissance radioactive, la littérature relate des modélisations qui se basent sur des analogies faites entre ce phénomène et autres faits de la vie courantes. Le jet de dés ((Klein & Kagan, 2010), (Jesse, 2003), et (Schultz, 1997)) ou de pièces de monnaies (Bakaç, TaúR-lu, & Uyumaz, 2011), le tirages au hasard des fèves ou des billes de deux couleurs différentes contenues dans une urne (Edge, 1978), la construction graphique de la décroissance radioactive à l'aide de barrettes de papier et de la colle (Hughes & Zalts, 2000). Par ailleurs en classe, D.R.Lapp (Lapp, 2010) parle de la présentation d'exemples d'éléments naturellement radioactifs, conjugués à des informations fournies sur la manière d'acquérir bon nombre de ces articles à moindre coût (corps humain, radon issu des articles de poterie, uranium dans l'ouraline,...).

Aussi du côté de la mobilisation des mathématiques, les travaux de E.A.Hughes et al (Hughes & Zalts, 2000), révèlent que dans de nombreux cas, les élèves n'ont pas l'habitude de manipuler les fonctions exponentielles en mathématiques et manquent d'outils nécessaires pour la compréhension et l'interprétation des équations dans lesquelles ces fonctions figurent. Au Maroc, en 2ème année du baccalauréat des branches scientifiques SVT (Science de la Vie et de la Terre) ou PC (Physique et Chimie), la programmation de l'enseignement des contenus en relation avec le phénomène de décroissance radioactive, fait intervenir les notions de fonctions logarithme et exponentielle, d'équations différentielles linéaires du premier ordre, et de calcul des probabilités (Direction des programmes Ministère de l'éducation nationale et de l'enseignement supérieur et de la formation des cadres et de la recherche scientifique Royaume du Maroc, 2007a). Cela est fait au premier semestre de l'année scolaire où ces notions ne sont pas encore entamées en mathématiques (Direction des programmes Ministère de l'éducation nationale et de l'enseignement supérieur et de la formation des cadres et de la recherche scientifique Royaume du Maroc, 2007b). Ces notions se trouvent au cœur de presque toutes les leçons de physique durant l'année de terminale, ceci écarte toutes reprogrammations disciplinaires. Du côté de l'enseignement des mathématiques dans ces niveaux,

l'enchaînement de la programmation des leçons se trouve dans une logique pédagogique et didactique propre à cette discipline. Il place l'enseignement des notions interdisciplinaires mathématiques-physiques, parmi les leçons du 2<sup>ème</sup> semestre, en l'occurrence les fonctions exponentielle et logarithme. Alors que du côté des enseignants des sciences physiques ou des mathématiques, les pratiques en classe s'expriment en termes d'initiatives interdidactiques, généralement intuitives et cloisonnée. Ceci est dû à l'inexistence de structures institutionnelles d'interdisciplinarité, et du coup, l'absence de repères professionnels interdisciplinaires à l'échelle nationale (MAMANE & BENJELLOUN, 2018b).

C'est à la lumière du maillage tentaculaire, ainsi préétabli entre la physique et les mathématiques, que nous comptons entreprendre l'étude de l'enseignement et de l'apprentissage de la décroissance radioactive. Face aux échecs que connaît les déroulements de ce contenu, selon la forme actuelle des recommandations des instructions officielles au Maroc, pour les classes de la 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat scientifique, des branches SVT et PC. Et donc, l'originalité de la problématique du présent travail, c'est qu'elle couple entre quatre éléments phares au sujet de l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive : l'étude de l'interaction entre les difficultés de l'enseignement et l'apprentissage de la décroissance radioactive et celles liées à la maîtrise des mathématiques ; la confrontation entre différentes modélisations mathématiques ; la mobilisation des TICE ; et la scénarisation d'activités en alternance entre travaux individuels et travaux collaboratifs.

Ainsi, pour introduire le concept de la décroissance radioactive (ModNat modèle produit par la nature), sachant l'impossibilité de pouvoir monter aucune expérience de classe sur le sujet (ModLab modèle au laboratoire du phénomène), nous avons pensé aux bases de données expérimentales, notamment celles mobilisables par les TICE en présentiel ou en situation de la classe inversée. En effet, les données recueillies des documents officiels ou autres sources textes, auraient en partie, la forme du modèle document (ModDoc). Autres ressources illustrent le phénomène par simulation (ModSimul). Nous pouvons trouver aussi des données qui sont transposables en modèle tabulaire (ModTab), ou carrément sous forme de

tableaux de mesures de la variation de l'activité radioactive  $a(t)$  d'un radioélément ou de la variation de sa population  $N(t)$  dans le temps (de préférence, par saut d'une demi-vie de l'élément radioactif étudié). Ce modèle tabulaire serait l'objet d'observations et de conversion à un modèle graphique (ModGraph) sous forme d'une représentation en histogramme (cadre d'apprentissage) illustrant nettement le concept de décroissance (discontinue). Par rétrécissement d'intervalles de temps (intervalles de moins d'une demi-vie), les têtes des colonnes se chevaucheront favorisant l'émergence du modèle graphique représentant la décroissance radioactive par une courbe continue qui représente parfaitement le modèle analytique (ModAnalyt2) que nous choisissons de noter par (ModLe<sup>t</sup>). Ce modèle analytique décrivant la loi de décroissance radioactive est celui que les enseignants se trouvent amenés à introduire conformément aux instructions officielles, comme un dogme, sans aucune activité intégrant les élèves. Ces enseignants font la même chose, pour la description du phénomène de la décroissance radioactive par l'équation différentielle, comme étant un autre modèle analytique (ModAnalyt1). Sur le tableau 1 ci-dessous, nous relatons la typologie des modèles existant de la loi de la décroissance radioactive, ainsi que les formes de leurs manifestations.

Parmi cette typologie se trouve SimulP200, la ressource TICE que nous avons exclusivement élaborée pour cette recherche. En effet, pendant nos études exploratoire et d'expérimentations, nous avons mobilisé des ressources TICE (Exemple : <https://www.youtube.com/watch?v=T7R5HW0E2io>). Les élèves ont mobilisé d'autres ressources TICE, au cours de leurs recherches en classe inversée ou en présentiel (Exemple: [www.youtube.com/watch?v=0xGx22MHXJM](https://www.youtube.com/watch?v=0xGx22MHXJM)). Cependant, l'utilisation de ces ressources TICE n'a pas offert la possibilité de relever des observations dans un contexte d'apprentissage où une rupture de rationalité pourrait se produire. Et sans être exhaustif, nous n'avons pas rencontré une simulation qui offre la possibilité d'adapter le temps de relevé des mesures au rythme de chaque élève. C'est pour cela et pour des raisons d'ergonomie de l'interface, du contrôle de l'écoulement du temps,... que nous avons élaboré la ressource SimulP200.

Les modèles de la loi de décroissance radioactive (leurs symboles)	Leurs différentes formes de manifestations
modèle naturel ( <b>ModNat</b> )	rayons cosmiques, radioactivité (du sol, des eaux, de l'air, du corps humains,...),...
modèle texte ( <b>ModDoc</b> )	tous documents écrits ou illustrations en format papier (livre,...) ou en format électronique.
modèle simulé ( <b>ModSimul</b> )	Il est assuré par plusieurs ressources TICE. (comme : SimulP200, ou <a href="https://www.youtube.com/watch?v=BMfIN3c6bT8">https://www.youtube.com/watch?v=BMfIN3c6bT8</a> )
modèle tabulaire ( <b>ModTab</b> )	tableaux de relevés expérimentaux
modèle graphique ( <b>ModGraph</b> )	Courbes et figures
modèles analytique ( <b>ModAnalyt</b> )	équation différentielle linéaire du 1 <sup>er</sup> ordre : $\frac{dN}{dt} + \lambda N(t) = 0$ ou sa solution sous forme de fonction exponentielle : $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

**Tableau 1 : typologie des modèles existants de la loi de la décroissance radioactive**

Dans le chapitre suivant, nous soutiendrons nos choix du paradigme théorique et de la démarche méthodologique parmi ce travail de thèse.

**TROISIEME CHAPITRE : CADRE THEORIQUE ET  
METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE**

## **A// INTRODUCTION**

L'apprentissage est un ensemble de mécanismes menant à l'acquisition de savoirs ou de comportements. En parallèle, ces mêmes mécanismes sont le fruit d'une pensée savante à l'enseignement. C'est pourquoi, dans le cadre de l'étude théorique, nous proposons d'aller voir d'abord du côté des grandes théories, sur les tenants et les aboutissants des concepts de l'enseignement et de l'apprentissage. Nous définissons ensuite les autres concepts centraux de notre cadre théorique : le concept de registres (sémiotiques, sémantique), le concept d'espace de réalité, le concept de cadres dans le contexte de la rationalité et dans le contexte de l'intelligibilité, et les concepts de modèle et de modélisation. Ces concepts figureront aussi comme outils clés d'analyse structurant l'ingénierie didactique de cette recherche. Par la suite, nous détaillerons tous les développements, purement mathématiques, derrière l'élaboration de nos deux alternatives à l'atténuation des difficultés de l'expérimentation et des modélisations mathématiques, dans le cas de la décroissance radioactive. Dès lors, le terrain devient propice pour étaler toute la méthodologie de ce présent travail de thèse. Nous la compartimenterons en quatre parties : les axes généraux gouvernants notre travail de recherche ; les caractéristiques du questionnaire de la recherche et de son administration, épaulé par les interviews ; les questions et les hypothèses de la recherche ; et en fin, la structure de l'ingénierie didactique, que nous avons utilisée pour mener une expérimentation qui a permis d'identifier, par analyse a priori, les points particuliers nécessitant la mise en place d'observations didactiques, pour tester et affiner nos deux modèles.

## **B// PARADIGME DE LA RECHERCHE**

Parmi les objectifs centraux du présent travail, se trouve la recherche des outils d'analyses théoriques élaborés dans la littérature. Nous les adopterons à la fois, pour apporter un regard critique sur l'état actuel de l'expérimentation et de la mobilisation des mathématiques, en classe de physique. Et pour expliciter les concepts théoriques de référence autour de l'introduction des solutions que nous proposons.

En effet, les fondements théoriques des éléments que nous cherchons, prennent forme dans la littérature comme suit :

## **I. Aperçu sur les grandes théories de l'apprentissage**

Les grandes théories de l'apprentissage les plus souvent utilisées, tournent autour de la création d'environnements d'enseignement. En didactique, les actes d'enseignement et ceux d'apprentissage doivent être pensés conjointement. Il est légitime de commencer par se poser des questions sur ce que veut dire l'acte d'apprendre et celui d'enseigner.

Les behavioristes, I.PAVLOV, J.WATSON, B.F.Skinner,... (Skinner, 1979), ont fait du conditionnement (réactif, ou opératif) le concept central de la théorie : conditionner un comportement consiste à faire apprendre ce comportement. Ils se basent sur deux notions clés, la notion d'observable et la notion d'environnement. Cependant, l'apprenant et l'environnement dans lequel il évolue, produisent des comportements non observables, lesquels le behaviorisme écarte de l'étude, et même sa branche radicale en discute l'existence. Le déterminisme historique a imposé sa logique. Il a réorienté la tendance, de la dominance d'un paradigme behavioriste à celle d'un paradigme cognitif (Legrand, 1990).

Dans cette optique, les premiers cognitivistes (Tolman, 1948) ont travaillé sur les notions de représentation mentale, d'apprentissage, de cognition, et de carte cognitive qui code la spatialité d'un environnement. De ceux-là, se distinguent deux précurseurs : J.V.Neumann (Berthet, 2011) pour ses travaux fondamentaux sur le principe du fonctionnement de l'ordinateur, et N.Wiener (Le Roux, 2009) pour sa contribution à la création de la cybernétique, la science des systèmes autorégulés pour le traitement de l'information. Par ailleurs, d'autres ont repris l'analogie entre input et output de l'ordinateur pour l'élargir à tout système, y compris son application au cerveau humain et aux processus d'apprentissage (Miller, 2003). Au premier rang, N.Chomsky, pour ses travaux sur le langage et la cognition. Aussi G.Miller, pour ses travaux sur la mémoire humaine. C'est dire que le cerveau est pour l'esprit ce que le hardware est pour le software. Cependant, H.Simon (Alcaras, 2011) est considéré parmi les initiateurs des travaux sur l'intelligence artificielle et la résolution de problème. Aussi, par l'imagerie cérébrale, la psychologie cognitive



expérimentale et les neurosciences (Rocheleau, 2009), ont permis la compréhension du fonctionnement physique global du cerveau et de son influence sur les mécanismes de l'apprentissage d'un individu.

De leur part, les constructivistes dressent l'origine de la pensée humaine. J. Piaget parle des concepts d'assimilation, d'accommodation et d'équilibration (Piaget, 1967). En fait, il distingue trois principaux stades de développement de la logique chez l'enfant : sensori-moteur, concret (précédée d'une période préopératoire), et formel (abstrait). Chaque fois que l'individu perçoit un objet (qui peut être physique ou une idée), il essaie de l'intégrer à un schème psychologique préexistant, c'est l'assimilation. Lorsqu'il échoue, alors commence un processus d'accommodation. Elle consiste à modifier un schème existant afin de pouvoir intégrer un nouvel objet ou une nouvelle situation. Alors que l'assimilation agit pour qu'un nouvel objet ou une nouvelle situation soit intégré à un ensemble d'objets ou à une situation pour lesquels il existe déjà un schème. Reste l'équilibration qui est l'autorégulation entre assimilation et accommodation. Il permet de passer d'un état d'équilibre psychologique à un autre, par de multiples déséquilibres et rééquilibrations. Le sujet apprend essentiellement par assimilation et accommodation, en s'adaptant à un milieu qui est producteur de contradictions (exemples : conflits cognitifs, conflit sociocognitifs) de difficultés et de déséquilibre (Piaget, 1967).

En revanche, L.S. Vygotsky (Vygotski, 1978) fait joindre au constructivisme la dimension sociale. Ainsi, il modélise la classe tel un théâtre du savoir, se répartissant en zone proximale de développement (ZPD). Il définit la ZPD comme étant une distance atteignable entre le niveau actuel de l'apprenant et son niveau potentiel. C'est à l'enseignant de provoquer le mouvement de la dite ZPD de l'apprenant pour s'approcher du savoir savant via le savoir enseigné. Ce savoir enseigné est lui-même piloté par une stratégie du savoir à enseigner. Cette stratégie se base sur le déclenchement d'un déséquilibre cognitif chez l'apprenant, l'obligeant à trouver les réponses optimales à la situation étudiée. Dans ce sens, la dimension sociale est primaire dans le temps et toute fonction mentale supérieure est engendrée par une activité médiée, socialement significative (Aissaoui, 2010). Ainsi, l'apprentissage avec

autrui crée les conditions de toute une série de processus de développement, qui ne se produisent que dans le cadre de la communication et de la collaboration, c'est la médiation (Aissaoui, 2010). Pour L.S.Vygotsky, la source de cette médiation peut-être tant dans le comportement d'un autre humain que dans un outil matériel ou dans un système de symboles (Vygotski, 1978). C'est pourquoi dans le cadre des activités de modélisation, objet de notre séquence d'enseignement, notre travail réserve une place centrale, d'une part aux médiateurs (modèles par exemple), d'autre part aux interactions sociales via le travail collaboratif et les intergroupes aux membres tournants (MAMANE & BENJELLOUN, 2018a). Donc, en collaboration avec quelqu'un l'apprenant résout plus facilement les problèmes proches de son niveau de développement (Vygotski, 1978).

L'avènement du connectivisme, la théorie de G.Siemens (Siemens, 2005) émergente de l'ère du numérique, a critiqué le behaviorisme, le cognitivisme et le constructivisme, à partir de leurs limites. En effet, cet auteur affirme que la quantité de connaissances dans le monde a doublé au cours des 10 dernières années, et prédit qu'elle doublera tous les 18 mois. Alors que pour lutter contre la diminution de la demi-vie de la connaissance, G.Siemens (Siemens, 2005) parle des axiomes : *"Je stocke mes connaissances dans mes amis"* et *"L'expérience enseigne de la connaissance."* Il explique qu'il est possible pour l'individu, de vivre toutes les expériences d'apprentissage à travers les expériences vécues dans le monde connecté. Il ajoute que le chaos, en tant que science, reconnaît la connexion de tout à tout. C'est là où il introduit clairement le processus d'apprentissage, à partir de la citation de *"l'auto-organisation"*, un concept de Luis Mateus Rocha (Siemens, 2005) : *"il y a auto-organisation par la formation spontanée de structures, de schémas ou de comportements bien organisés, à partir de conditions initiales aléatoires"*. Donc, pour G.Siemens, l'apprentissage, en tant que processus auto-organisé, nécessite que le système d'apprentissage personnels ou organisationnels *"soit ouvert sur le plan de l'information, c'est-à-dire que, pour pouvoir classifier sa propre interaction avec un environnement, il doit être en mesure de changer sa structure..."*. L'apprentissage (défini comme un savoir exploitable) peut résider en dehors de nous-mêmes (au sein d'une organisation ou d'une base de données), est axé sur la connexion d'ensembles d'informations

spécialisées. Les liens qui nous permettent d'apprendre davantage sont plus importants que notre état actuel des connaissances. Le connectivisme est motivé par la compréhension du fait que les décisions sont basées sur des fondements changeant rapidement. De nouvelles informations sont continuellement acquises. La capacité d'établir des distinctions entre des informations importantes et non importantes est essentielle. La capacité de reconnaître le moment où de nouvelles informations modifient le paysage en fonction des décisions prises hier est également essentielle (Siemens, 2005).

## II. Concepts théoriques de référence

C'est au cœur de notre approche théorique que se placent les concepts clés :

Registre sémiotique ;

Registre sémantique ;

Espace de réalité ;

Cadre de rationalité ;

Cadre d'intelligibilité ;

Ingénierie didactique.

En effet, c'est grâce au statut épistémologique de ces concepts, à la fois, dans leurs contextes d'origine, et dans les contextes de leurs mobilisations dans la littérature, que nous devons notre inspiration à les intégrer, particulièrement, comme concepts clés d'analyse avec l'ingénierie didactique de notre travail, au même titre qu'ils pactisent parmi le paradigme de notre recherche en général.

### 1. Ingénierie didactique

Au sens de R.Douady (Douady, 1994), le terme d'ingénierie didactique désigne un ensemble de séquences de classe conçues, organisées et articulées dans le temps de façon cohérente pour réaliser un projet d'apprentissage. Elle ajoute : *"le projet évolue sous les réactions des élèves et en fonction des choix et décisions du maître."* Pour O.Marty (Marty, 2015), la construction de l'ingénierie didactique se base sur la réalisation de séquences de formation prédéfinis, à objectifs mesurables, sanctionnés par un outils d'évaluation ouvrant la voie à tout réajustement. Ainsi, R.Douady et

O.Marty s'accordent sur le fait que l'ingénierie didactique est à la fois un produit, résultat d'une analyse, et un processus adaptable que le maître exploite au cours des activités.

Pour M.ARTIGUE (Artigue, 1989), l'ingénierie didactique se situe dans le registre des études de cas dont la validation est essentiellement fondée sur la démarche comparative interne, caractérisée par la notion d'analyse a priori. Cette auteure présente l'ingénierie didactique comme étant à la fois, une méthodologie de recherche et un moteur de la progression didactique. Elle ajoute que l'ingénierie didactique a acquis le qualificatif de méthodologie de recherche, grâce à son approche qu'elle met en œuvre, sous forme de schémas expérimentaux basés sur des réalisations didactiques en classe, c'est à dire : *"sur la conception, la réalisation, l'observation et l'analyse de séquences d'enseignement."* Il lui octroi le qualificatif de moteur de la progression didactique, du moment où sa méthodologie a été l'initiatrice de réflexions sur des concepts comme : *"les notions d'institutionnalisation [...], mémoire de la classe, [...] problèmes de transmission et de reproductibilité"*.

## 2. Registre

*"Mal nommer les choses, c'est ajouter au malheur du monde"*. Albert Camus

Selon l'angle de perception d'un objet quelconque, chaque personne lui attribue sa propre représentation mentale. Cette représentation puise ses outils, entre autres, dans ce que R.DUVAL appelle "registre" (Duval, 1993). Ainsi, pour l'enseignement des mathématiques, R.DUVAL recommande que son organisation prenne en compte la coordination forte existante, à priori, entre l'appréhension ou la production d'une représentation sémiotique (sémosis), et l'appréhension conceptuelle (noésis) (Duval, 1993). De cela, D.MALAFOSSE et al (Malafosse et al., 2000) dégagent qu'un registre est un système sémiotique permettant les trois activités fondamentales de la pensée : la formation d'une représentation identifiable; le traitement de cette représentation dans le registre même où elle a été formée; et la conversion de cette représentation en une représentation d'un autre registre. L'étude du registre sémiotique s'est imposée donc en didactique des mathématiques et en didactique de la physique, car la

distinction entre un objet conceptuel et les diverses représentations sémiotiques est nécessaire à la fois pour le désigner et le manipuler intellectuellement. C'est pour cette raison que R.Duval recommande de travailler sur la mise en congruence sémantique d'unités significatives entre divers registres pour permettre l'activité de conversion. Sans ces correspondances, il y a un cloisonnement des registres chez les élèves (Duval, 1993). Nous citons là un bijou de cet auteur : *“La compréhension (intégrative) d'un contenu conceptuel repose sur la coordination d'au moins deux registres de représentation, et cette coordination se manifeste par la rapidité et la spontanéité de l'activité de conversion. [...] cette coordination est loin d'être naturelle. Et elle ne semble pas pouvoir se réaliser dans le cadre d'un enseignement principalement déterminé par des contenus conceptuels”* (Duval, 1995).

### **3. Espace de réalité**

Nous préférons introduire notre intérêt pour la notion d'espace de réalité à partir du paradoxe que R.DUVAL (Duval, 1993) relève dans le contexte des mathématiques : *“qui ferait l'introduction de l'autre, objets mathématiques ou leurs représentations sémiotiques, et le comment ne pas les confondre par les élèves”*. L'auteur affirme que seulement par le moyen des représentations sémiotiques qu'une activité sur des objets mathématiques soit possible. Il explique que les objets mathématiques, par le fait qu'ils soient abstraits, ne sont ni directement accessibles à la perception, ni dans une expérience intuitive immédiate, comme le sont les objets communément dits réels ou physiques. Pourtant A.Lerouge dans son travail de thèse (Lerouge, 1992), a montré que les difficultés de conceptualisation rencontrées par les élèves de collège sont dues, en particulier, à une rupture de nature entre l'objet « droite matérielle » constitué par le trait de crayon du cadre familier de l'élève et l'objet « droite idéale » du cadre culturel des mathématiques. C'est dans cette optique que D.MALAFOSSE et al (Malafosse et al., 2000) ont créé et défini la notion d'espace de réalité par : *“L'espace de réalité est donc l'ensemble des objets réels et des événements hors de la pensée du sujet et sur lequel porte l'activité mentale de conceptualisation. [...] on peut considérer que l'acquisition des concepts en physique se fait par prélèvement d'informations dans l'espace de réalité (objets et situations expérimentales créées ou non) et nécessite leur traitement dans*

divers cadres de rationalité. La notion d'espace de réalité se différencie donc fondamentalement de la notion de cadre en ce sens que l'espace de réalité est externe au sujet alors que le cadre est un espace de pensée interne.''.

#### 4. Cadre de rationalité

A partir des travaux antérieurs au sujet des processus de conceptualisation, D.MALAFOSSE et al (Malafosse et al., 2001) posent la définition suivante :''un cadre de rationalité est un ensemble cohérent du fonctionnement de la pensée caractérisé essentiellement par son monde d'objets et ses règles de raisonnement et de validation. C'est au sein de cette structure que prennent sens, de manière dialectique, les informations sémiotiques et situationnelles''. Ces auteurs segmentent le cadre de rationalité en trois affluents, comme le montre la figure 4 ci-dessous.

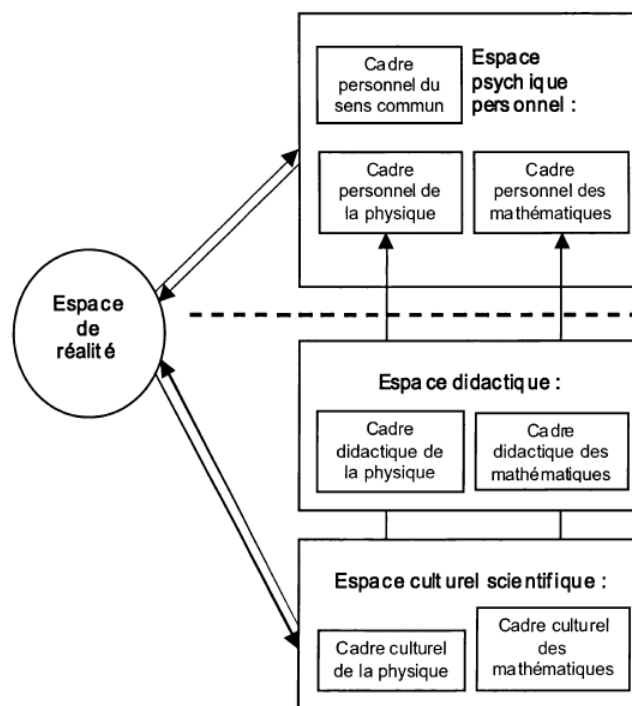
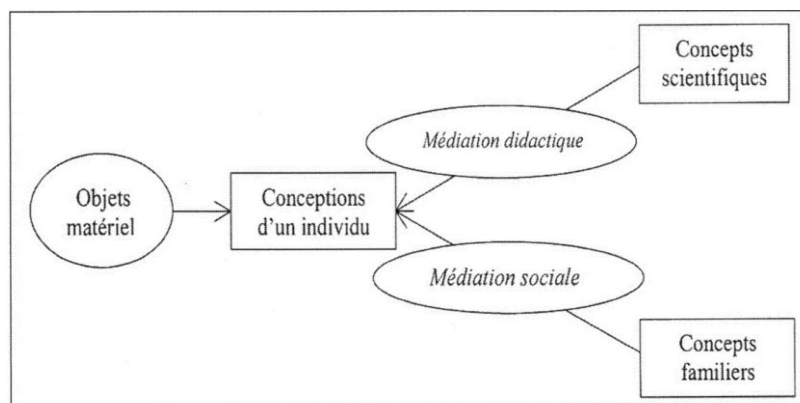


Figure 4 : modélisation des voies d'expressions des affluents (espace de réalité, didactique et scientifique) dans le cadre personnel de l'apprenant



**Figure 5 : modélisation des différentes interactions conceptuelles de façon à éclore leurs médiateurs avec les conceptions d'un individu**

Plus tard, D.MALAFOSSE (Malafosse, 2003) décrit le contexte de dévolution des savoirs. Il le conçoit sous forme d'un modèle inter-didactique d'analyse des processus de conceptualisation accomplis par le groupe, sur une base théorique qui traite les notions de cadre de rationalité, de registre sémiotique et d'espace de réalité. L'auteur a dressé un modèle (figure 5 ci-dessus) où les conceptions d'un individu sont le résultat de ses percepts qui puisent leurs origines au carrefour des objets matériels, des concepts familiaux et des concepts scientifiques.

## 5. Cadre d'intelligibilité

Sur le dictionnaire français Larousse, la définition en ligne du mot intelligibilité<sup>15</sup> est : *"Caractère, état de ce qui est intelligible. Degré de compréhension d'un message verbal ou d'une forme de parole (naturelle ou synthétisée), déterminé à l'aide de tests de perception."* Cette définition renvoie vers celle du mot intelligible<sup>16</sup> : *"Qui peut être compris, saisi aisément (exemple : s'exprimer d'une manière intelligible). Pour Platon, se dit de ce qui est perçu par l'intelligence, par opposition à ce qui est perçu par les sens"*. Aussi le mot intelligibilité est évoqué par F.MALONGA MOUNGABIO et al (Malonga Mougabio & Beaufils, 2010), lors d'un exemple d'étude de manuels de physique sur la modélisation et les registres sémiotiques. Les auteurs l'ont associé avec le mot cadre pour la construction des schémas didactiques favorables aux enseignement-

Liens internet sur le dictionnaire français Larousse pour la définition des mots :

<sup>15</sup> Intelligibilité : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/intelligibilit%C3%A9/43559>

<sup>16</sup> Intelligible : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/intelligible/43560>

apprentissages de la physique. Ils ont explicitement, délimité le sens du concept de "cadre d'intelligibilité" par :

Un des objectifs de l'enseignement de la physique est de favoriser la construction d'un cadre d'intelligibilité pour faire accéder l'élève au type de connaissances qui, aux yeux des physiciens, rendent le monde intelligible, c'est-à-dire à la capacité à mettre en relation le monde matériel et le monde des théories et des modèles. On retrouve cette partition dans le schéma de Malafosse (Malafosse *et al.*, 2000) dont la position épistémologique repose sur l'affirmation d'un « espace de réalité » et dont le positionnement didactique se caractérise par la mise en relation de cadres de rationalité (Lerouge, 2000) et de registres sémiotiques.

N° 1-2010 | RDST

Cadre d'intelligibilité selon F.MALONGA MOUNGABIO *et al* (Malonga Mougabio & Beaufils, 2010)

## 6. Modèle

Une grande part des activités savantes attachent beaucoup d'importance à l'utilisation des modèles, à leurs modifications, à leur validation, à leur reproduction, et à leurs créations. Ces activités ne sont pas étrangères au commun des mortelles, en particulier, l'élève et son professeur. C'est pourquoi la didactique des sciences jonche de modèles et de modélisations. Ils y sont présents en tant qu'eux-mêmes sujet de réflexion, ou en tant que biais scientifique régissant le contexte de l'enseignement, dans ses moindres détails, au niveau des contenus à enseigner et au niveau de leurs formes de dévolution équitable des apprentissages.

Nous choisissons d'introduire le concept de modèle, à travers sa confrontation avec celui de théorie. Pour A.Tiberghien (A. Tiberghien, 1996), en physique, : *"la théorie contient le système explicatif comportant : paradigmes, ensemble de croyances, valeurs et techniques reconnues par un groupe donné de physiciens, questions de recherche, principes de base (conservation, symétrie,...). Les lois figurent comme une partie de la théorie"*. Pour C.Puren (Puren, 1999), la théorie décrit la réalité en elle-même alors que le modèle est une représentation de la réalité. Cette représentation est construite dans le but de pouvoir agir sur la réalité : *"à la fois un outil d'appréhension de la réalité et un schéma organisateur de l'action"* (Puren, 1999). Alors que pour S.Johsua *et al* (Andrée Tiberghien, 1994), la théorie est réservée à un ensemble "régional" du savoir relativement vaste. Il ne s'agit pas d'une simple somme de modèles, puisque ces derniers sont reliés par des relations logiques et expérimentales qui assurent une



certaine cohérence à l'ensemble. Et que chaque modèle doit être explicatif, prédictif, pertinent par rapport à un objet, cohérent et en correspondance avec l'expérience.

Pour le didacticien des sciences J.L Martinand (Martinand, 1987), un modèle permet l'appréhension de deux aspects importants de la réalité. D'abord, il facilite la représentation du caché, en favorisant le passage aux représentations relationnelles et hypothétiques. Ensuite, il aide à penser le complexe. Il permet de décrire les variables d'interaction, les relations internes entre ces variables et les valeurs des contraintes extérieures en identifiant et en manipulant les systèmes. Si les prédictions sont en accord avec l'expérience, on considère que le modèle est valide. Sinon on le critique. C'est dans cette optique, et en partant de l'écart entre les modes de représentations mobilisés par les élèves (leurs conceptions spontanées) et les modèles enseignés, que A. WEIL-BARAIS et al (Weil-barais & Lemeignan, 1990) ont conçu des modèles à visé didactique, plus accessibles aux élèves, et sur lesquels le professeur peut s'appuyer pour les aider à s'approprier des modèles "savants". Il s'agit de modèles qualitatifs<sup>17</sup>, semi quantitatifs<sup>18</sup>, et quantitatif<sup>19</sup>.

## 7. Modélisation

La modélisation s'avère être une composante essentielle de l'activité humaine. Elle est présente à chaque fois que l'individu essaie de comprendre, d'interpréter les différents phénomènes du monde, et de faire des prévisions (Siemens, 2005). L'Homme perçoit le monde en construisant des modèles mentaux. Il peut exprimer ces modèles par le discours, c'est-à-dire produire des comportements symboliques et des expressions linguistiques afin de les transmettre à autrui. En physique, *"La modélisation est alors la création d'une relation entre les objets projetés de l'espace de réalité et les situations de référence. [...] La difficulté spécifique du physicien se situe alors dans l'opération de projection de l'espace de réalité sur le cadre culturel de la physique"* (Malafosse et al., 2000). D'après le schéma du processus de modélisation de B.Walliser, tiré d'une lecture faite par V.Host (Host, 1989), il y a deux types de modèles : un modèle théorique et un modèle empirique. Ces deux modèles ont deux

---

<sup>17</sup> Modèles qualitatifs : comme le modèle interaction, le modèle de distribution de l'énergie,...

<sup>18</sup> Modèles semi quantitatifs : ordonner des entités, comme dire que l'action d'un objet sur un autre est plus ou moins grande,...

<sup>19</sup> Modèles quantitatifs : dégager des valeurs avec leur ordre d'incertitude.

points de départ opposés, le champ théorique (domaine de l'axiomatisation) et le champ empirique (domaine de l'expérimentation et de la mesure). Le processus de modélisation fait alors appel au raisonnement déductif dans lequel des déductions sont faites à partir de prémisses, et au raisonnement inductif dans lequel des hypothèses sont formulées à partir de l'observation de phénomènes. La construction d'un modèle s'appuie principalement sur le raisonnement déductif. En revanche, l'utilisation d'un modèle est basée sur le raisonnement inductif. Ces différents raisonnements vont aider les apprenants à construire les modèles qui vont leur permettre de prédire et de comprendre les phénomènes. De même, le travail de A.Chomat et al sur la notion de modèle et les activités de modélisation en classe de quatrième (Chômât & Larcher, 1988), s'intéressent aux rapports entre la modélisation et la conceptualisation, par le fait que la modélisation du réel est un outil d'aide à la conceptualisation. C'est aussi en appréhendant de nouveaux champs que l'élève procède à de nouvelles conceptualisations. Ces deux notions sont dépendantes l'une de l'autre puisque la conceptualisation est également nécessaire à la modélisation. En effet, l'élève doit avoir déjà construit des concepts pour pouvoir modéliser. C'est dire que dans une situation de modélisation, la question est de savoir si les apprenants disposent des concepts leur permettant de modéliser (Aissaoui, 2010).

## **C// METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE**

### **I. Axes généraux de la recherche**

Notre méthodologie de recherche se caractérise par des axes généraux qui gouvernent notre travail de recherche. Leur synthèse se décline par :

- L'étude bibliographique autour du sujet de la recherche.
- La problématique de la recherche.
- Une délimitation du paradigme théorique autour des : grandes théories d'apprentissage ; concepts théoriques de référence ; questions de la recherche ; hypothèses de la recherche ; échantillonnages, questionnaire et interviews ;

- Elaboration de deux nouvelles alternatives (ModLI et ModL2<sup>t</sup>) pour l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive, et d'un nouvel outil TICE.
- L'élaboration d'un questionnaire pour l'exploration des différentes mobilisations des TICE par les élèves, lors de leurs apprentissages de la physique.
- L'expérimentation de nos deux nouvelles alternatives pour l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive, à travers les études : exploratoire, d'expérimentations, et de validation.

## II. Elaborations mathématiques du ModLI et du ModL2<sup>t</sup> et élaboration d'un nouvel outil TICE

Le formalisme mathématique derrière l'élaboration de nos deux modèles, part des représentations mathématiques retenues de la description de l'évolution d'une population radioactive, jusqu'à l'établissement de la loi de la décroissance radioactive sous les deux modèles alternatifs que nous proposons, à savoir, **ModLI** (**Modèle de Linéarisation par Intervalle**) et **ModL2<sup>t</sup>** (**Modèle de la Loi en puissances à base 2 du temps**).

### 1. Aperçu sur la loi de décroissance radioactive

#### 1.1. Définition

La radioactivité est une transformation physique qui conduit, en fin de chaîne, à la création de noyaux atomiques stables, à partir de noyaux atomiques initialement instables. Elle s'accompagne toujours, par l'émission de particules  $\alpha$  ou  $\beta$  ou  $\gamma$ .

La radioactivité est un phénomène physique qui peut être naturel (comme dans les étoiles, les roches de granite,...) ou artificiel (comme dans les réacteurs nucléaires,...).

La désintégration d'un noyau radioactif est un phénomène qui est régi par le hasard, chose qui s'étudie mathématiquement par les statistiques et par le calcul des probabilités. Et du fait du caractère décroissant de toute désintégration, le nombre de radionucléides initialement présents dans un échantillon se trouve réduit de la moitié

pendant une période radioactive  $t_{1/2}$  (ou demi-vie). Chaque radioélément a sa propre demi-vie  $t_{1/2}$  et sa propre constante de radioactivité  $\lambda$  (ou probabilité de désintégration  $\lambda$  par unité de temps). Elles sont liées par :

$$\lambda = \frac{\text{Ln}2}{t_{1/2}} \quad (\text{éq.1})$$

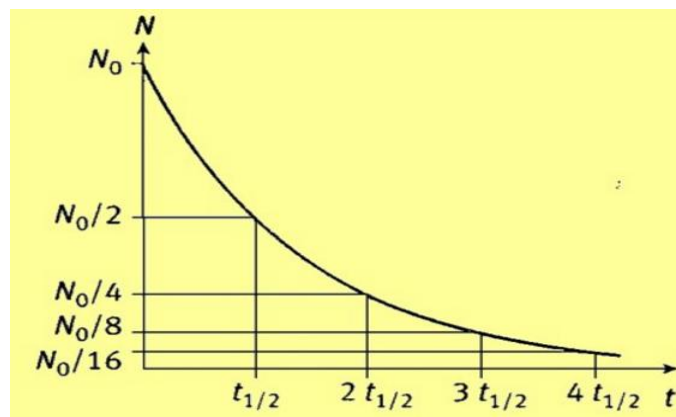
### 1.2. Evolution temporelle d'un échantillon de radioélément

L'activité  $a(t)$  d'un échantillon radioactif à l'instant  $t$  est le nombre moyen de désintégration par unité de temps. Elle est définie par :

$$a(t) = - \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad (\text{éq.2})$$

Avec  $\Delta t$  la durée pendant laquelle s'est opérée la variation  $\Delta N$  du nombre de noyaux radioactifs.

L'étude statistique des relevés expérimentaux mène au tracé de la courbe suivante (Graphe 1.a) :



**Graphe 1.a : Courbe de décroissance radioactive**

En fait, cette étude statistique montre que l'activité  $a(t)$  est proportionnelle à  $N(t)$  le nombre de noyaux non désintégrés à la date  $t$ . La constante de proportionnalité n'est autre que la probabilité de désintégration  $\lambda$ , ce qui aboutit à l'équation :

$$a(t) = \lambda N(t) \quad (\text{éq.3})$$

Ceux-ci mènent à écrire l'équation :

$$\lambda N(t) = - \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad (\text{éq.4})$$

Pour une durée infinitésimale, cette équation prend la forme d'une équation différentielle linéaire du 1<sup>er</sup> ordre qui s'écrit:

$$\frac{dN}{dt} + \lambda N(t) = 0 \quad (\text{éq.5})$$

L'équation différentielle linéaire du 1<sup>er</sup> ordre ci-dessus admet une solution de type exponentielle de la forme :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \text{ avec } \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (\text{éq.6})$$

D'où l'expression du temps t :

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_0}{N(t)} \quad (\text{éq.7})$$

## 2. Elaboration du ModLI

Mathématiquement, la fonction exponentielle  $f(x)$  est la seule fonction proportionnelle à ses dérivées, tel que pour  $a, b \in \mathbb{R}$  :

$$f(x) = be^{ax} \Rightarrow f'(x) = abe^{ax} = af(x) \Rightarrow f'(x) - af(x) = 0 \quad (\text{éq.8})$$

Ou encore, pour la dérivé nième :

$$f^{(n)}(x) = a^n be^{ax} = a^n f(x) \Rightarrow f^{(n)}(x) - a^n f(x) = 0 \quad (\text{éq.9})$$

### 2.1. Expression de $N(t)$ pour $t=nt_{1/2}$ et $n \in \mathbb{N}$

Au temps t, l'expression de  $N(t)$  le nombre de populations radioactives existant dans un échantillon d'un radioélément, s'écrit par :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \text{ avec } \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \text{ et } N_0 = N(t=0) \quad (\text{éq.10})$$

Nous avons développé l'expression de la fonction  $N(t)$  comme suit:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\left(\frac{t}{t_{1/2}} \ln 2\right)} \quad (\text{éq.11})$$

Sur l'intervalle  $t \in I = [0, \infty[$ , nous choisissons  $t_{1/2}$  comme pas, et donc il vérifie :

$$N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}, \quad N(2t_{1/2}) = \frac{N_0}{4}, \quad N(3t_{1/2}) = \frac{N_0}{8}, \dots, \quad N(nt_{1/2}) = \frac{N_0}{2^n} \quad (\text{éq.12})$$

Avec n le paramètre que nous appelons : "ordre de décroissance radioactive".

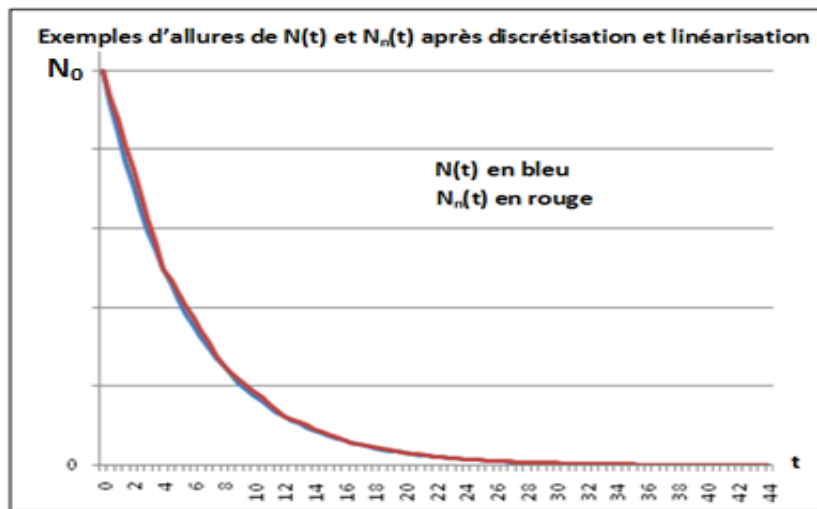
De ce fait, l'intervalle  $I$  du temps de la décroissance radioactive s'écrit :

$$I = [0, [ = \{0\} \cup \left] 0, t_{1/2} \right] \cup \left] t_{1/2}, 2t_{1/2} \right] \cup \left] 2t_{1/2}, 3t_{1/2} \right] \cup \dots \cup \left] (n-1)t_{1/2}, nt_{1/2} \right] \cup \dots,$$

$$\Rightarrow I = [0, \infty[ = I_1 \cup I_2 \cup \dots \cup I_n \cup \dots \quad (\text{éq.13})$$

## 2.2. Expression approchée de $N(t)$ sur $I_n$ dans le cadre du ModLI

Nous discrétisons par morceau la fonction  $N(t)$ , dans le but de l'approcher avec des fonctions  $N_n(t)$  linéaires définies sur les intervalles  $I_n$ , comme le montre le graphe 1.b suivant :



Graphe 1.b : exemples de courbes de l'évolution du nombre d'une population radioactive avec et sans discrétisation

Pour tout  $t \in I_n = ](n-1)t_{1/2}, nt_{1/2}]$ , nous pouvons approcher le nombre de populations radioactives par des fonctions affines de la forme :

$$N(t) = a_n t + b_n \text{ sur } I_n \quad (\text{éq.14})$$

$n$  est le paramètre que nous avons introduit et appelé "ordre de décroissance radioactive". Il est défini par :

$$\text{Pour tout } t \in \mathbb{R}, \text{ il existe } n \in \mathbb{N} \text{ tel que } \frac{t}{t_{1/2}} \leq n < 1 + \frac{t}{t_{1/2}} \quad (\text{éq.15})$$

Avec  $t_{1/2}$  la demi-vie du radioélément.

En résolvant le système d'équation :

$$\begin{cases} N((n-1)t_{1/2}) = \frac{N_0}{2^{n-1}} \\ N(nt_{1/2}) = \frac{N_0}{2^n} \end{cases} \quad (\text{éq.16})$$

Nous trouvons :

$$\begin{cases} a_n = -\frac{N_0}{2^n} * \frac{1}{t_{1/2}} \\ b_n = (n + 1) \frac{N_0}{2^n} \end{cases} \quad (\text{éq.17})$$

Et donc l'expression approchée du nombre de la population radioactive restante dans l'échantillon, à l'instant  $t$  s'écrit (MAMANE & BENJELLOUN, 2019):

$$N(t) = \frac{N_0}{2^n} \left[ (n + 1) - \frac{t}{t_{1/2}} \right] \quad \text{où} \quad \frac{t}{t_{1/2}} \leq n < 1 + \frac{t}{t_{1/2}} \quad (\text{éq.18})$$

### 2.3. Expression approchée de $t$ sur $I_n = [(n-1)t_{1/2}, nt_{1/2}]$ dans le cadre du ModLI

L'expression approchée de  $t$  tirée de celle de  $N(t)$ , est de la forme (MAMANE & BENJELLOUN, 2019):

$$t = t_{1/2} \left[ (n + 1) - 2^n \frac{N(t)}{N_0} \right] \quad \text{où} \quad \frac{\ln \frac{N_0}{N(t)}}{\ln 2} \leq n < 1 + \frac{\ln \frac{N_0}{N(t)}}{\ln 2} \quad (\text{éq.19})$$

Où  $n$  est le même paramètre que nous avons appelé "ordre de décroissance radioactive".

Pour faire plus simple, nous définissons les populations radioactives par :

$\forall N_0, N(t) \in \mathbb{R}$  alors  $\exists x, y \in \mathbb{R}$  et  $\exists n \in \mathbb{N}$  tel que :

$$N_0 = 2^y \quad \text{et} \quad N(t) = 2^x \quad (\text{éq.20})$$

$$D'où \quad y - x \leq n < 1 + y - x \quad (\text{éq.21})$$

## 3. Elaboration du ModL2<sup>t</sup>

Pour l'enseignement et l'apprentissage de la décroissance radioactive, l'élaboration et l'expérimentation d'un deuxième modèle, en l'occurrence ModL2<sup>t</sup>, est un outil parfaitement compatible à la vérification du bien fondé de nos hypothèses de recherche de la présente thèse (voir p : 68 ci-après). Surtout, l'expérimentation du ModL2<sup>t</sup> vient pour confirmer ou infirmer nos suppositions sur ModLI, stipulant que la mobilisation des mathématiques dans des registres sémiotique et sémantique de transversalité établie, atténue significativement les difficultés de l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive.

### 3.1. Expression exacte de $N(t)$ dans le cadre du ModL2<sup>t</sup>

La loi de l'évolution d'une population radioactive s'écrit par (MAMANE & BENJELLOUN, 2018a):

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{et} \quad \lambda = \frac{\ln 2}{t_{\frac{1}{2}}} \quad (\text{éq.22})$$

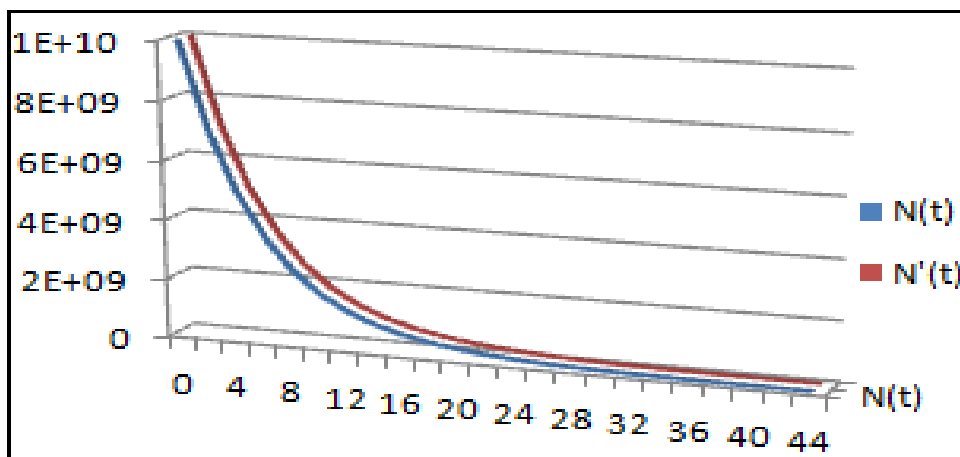
$$\begin{aligned} \Rightarrow N(t) &= N_0 e^{-\left(\frac{\ln 2}{t_{\frac{1}{2}}}\right)t} \Rightarrow N(t) = N_0 e^{(\ln \frac{1}{2})\left(\frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}\right)} \\ \Rightarrow N(t) &= N_0 \left(e^{\ln \frac{1}{2}}\right)^{\left(\frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}\right)} \Rightarrow N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\left(\frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}\right)} \\ &\Rightarrow N(t) = N_0 2^{-\left(\frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}\right)} \end{aligned} \quad (\text{éq.23})$$

Sachant que  $\ln 2 \approx 0,69$ , donc :

$$N(t) = N_0 2^{-\left(\frac{\lambda t}{0,69}\right)} \quad (\text{éq.24})$$

### 3.2. Comparaison des courbes du ModLe<sup>t</sup> et du ModL2<sup>t</sup>

Sur le graphe 2 ci-dessous, les courbes  $N(t)$  et  $N'(t)$  représentent, respectivement, la décroissance radioactive de la même population d'un radioélément, exprimée en exponentiel népérien du temps (ModLe<sup>t</sup>) et en puissances à base 2 du temps (ModL2<sup>t</sup>). Elles sont tracées sur Excel pour  $N_0 = 10^{10}$  particules pour  $t_{\frac{1}{2}} = 4\text{s}$ . Ces deux courbes se confondent parfaitement, c'est pourquoi nous les avons refaites en trois dimensions ci-dessous :



Graphe 2 : courbes selon ModLe<sup>t</sup> en bleu et selon ModL2<sup>t</sup> en rouge



### 3.3. Expression exacte du temps t pour ModL2<sup>t</sup>

Nous avons :

$$N(t) = N_0 \left( 2 \right)^{-\left(\frac{t}{t_{1/2}}\right)} \Rightarrow t = t_{1/2} \frac{\text{Ln}\left(\frac{N_0}{N(t)}\right)}{\text{Ln}2} \quad (\text{éq.25})$$

Pour des données fournies sous la forme :

$$N(t) = 2^p \quad \text{et} \quad N_0 = 2^{p_0}, \quad \text{avec } p \text{ et } p_0 \in \mathbb{R} \quad (\text{éq.26})$$

L'expression du temps devient (MAMANE & BENJELLOUN, 2018a) :

$$t = t_{1/2}(p_0 - p) \quad (\text{éq.27})$$

Ou encore :

$$t = \frac{0,69}{\lambda}(p_0 - p) \quad (\text{éq.28})$$

## 4. Elaboration du nouvel outil TICE SimulP200

**SimulP200** est une ressource TICE dont l'acronyme dérive de son nom complet: «damier de **Simulation** de la décroissance radioactive du **Polonium 200**» (MAMANE & BENJELLOUN, 2018a). Cette ressource TICE a été développée par notre équipe en utilisant le langage Python. Ce langage est mis en ligne sous licence libre (<https://www.python.org/psf/>).

En plus des élaborations du ModLI, du ModL2<sup>t</sup> et de SimulP200, nous avons élaboré un questionnaire destiné à l'exploration des différentes mobilisations des TICE par les élèves, lors de leurs apprentissages de la physique.

### III. Le questionnaire

Le rôle central du questionnaire de ce travail se décline par ses apports multidimensionnels dans l'accomplissement de notre recherche. En effet, l'évolution de son élaboration (de la formulation des items et de leurs modalités, à son administration, et terminant par l'analyse statistique de ses réponses) a été guidée par l'esprit de notre travail de recherche.

## **1. Elaboration du questionnaire :**

Pour l'élaboration du questionnaire, nous avons adopté la démarche suivante :

- ✓ identifier et dresser une liste des besoins en information (voir annexe 2, p 153) ;
- ✓ Définir la séquence des questions sur les thèmes d'informations personnelles, de mobilisations des TICE et leurs disponibilités dans le cadre d'apprentissage de la physique, et des préférences des élèves sur la dévolution des modèles et de la modélisation mathématique de la décroissance radioactive ;
- ✓ Rédiger les items à réponses fermées ou semi-fermées, de façon claire et précise, tout en tenant compte de ne pas influencer les répondants (voir annexe 3, p 155);
- ✓ Effectuer des tests relatifs à l'élaboration du questionnaire (voir annexe 1, p 153).  
Chose qui nous a aidée à apporter les ajustements adéquats à certains items.

## **2. L'administration du questionnaire :**

Lors de l'administration du questionnaire aux élèves, nous avons suivi, dans l'ordre, les étapes citées ci-dessous :

- ✓ Proposition d'un exemplaire du questionnaire pour chacun des 137 élèves de notre échantillon ;
- ✓ Identification des tâches attendues des élèves. Anticipation de ce qu'il faut faire si les élèves ne réagissent pas à nos attentes ;
- ✓ Mise en situation par la présentation aux élèves du but du questionnaire, suivi par l'explication des objectifs de son administration ;
- ✓ Pilotage de la simultanéité de chaque réponse produite par les élèves. Régulation du temps octroyé à chaque item (sur la base du pré-test et du post-test du questionnaire). Régulation de la concentration de chaque élève car ce sont ses propres réponses et avis qui nous intéressent et non pas ceux des voisins.
- ✓ Ramassages de tous les exemplaires (ils ont été tous rendus anonymes).

### 3. Analyse du questionnaire :

Après le codage des items et de leurs modalités, nous avons entamé une étude statistique avec les logiciels Excel et BiostaTGV. Selon la nature des items et de leurs modalités, nous avons lancé et exploité des tests de Chi<sup>2</sup>, et des calculs de la statistique descriptive.

## IV. Questions cadres et hypothèses de la recherche

Le statut épistémologique de la question par rapport à l'hypothèse, fait qu'elle soit précédente sur la voie de la recherche de réponse(s). Alors, nous commençons par poser les questions cadres de notre recherche. Puis, nous énonçons nos hypothèses.

### 1. Questions cadres de la recherche :

- ✓ Dans les orientations curriculaires, quelle est la place réservée à l'introduction didactique des modèles de la loi de la décroissance radioactive et de ses modélisations analytiques ?
- ✓ A quels niveaux et pourquoi se produisent les échecs de l'enseignement-apprentissages du phénomène de la décroissance radioactive ?
- ✓ Où l'échec est le plus ou le moins marqué ? Où se situent les degrés des difficultés rapportées à l'apprentissage de la décroissance radioactive et où se situent celles liées à la mobilisation des mathématiques ?
- ✓ Quelles solutions proposons-nous? Et sur quels référents théoriques et organisationnels se base-t-on pour vérifier que ces solutions sont de bonnes alternatives ?

### 2. Hypothèses de la recherche :

- ✓ Il se peut que la mobilisation des TICE en présentiel et en classe inversée, augmente significativement la réussite de l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive.

- ✓ Il se peut que la mobilisation des mathématiques dans des registres sémiotique et sémantique de transversalité établie, atténue significativement les difficultés de l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive.
- ✓ Il se peut que la mobilisation des mathématiques dans des cadres de rationalités et d'intelligibilité tenant en compte les ruptures dans les passages entre les mathématiques et la physique, atténue significativement les difficultés de l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive.
- ✓ Il se peut que le travail collaboratif atténue significativement les difficultés de l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive. Et ceci davantage avec des groupes aux membres tournants.
- ✓ Il se peut qu'actuellement au Maroc, l'utilisation de chacun de nos deux alternatives ModLI et ModL2<sup>t</sup>, dans l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive, favorise sa réussite.

## V. Ingénierie didactique

Dans le cadre de ce travail de recherche, la phase d'expérimentation est conçue selon une ingénierie didactique au sens de M. Artigue (Artigue, 1989). Cette ingénierie didactique est pensée dans le paradigme de l'étude de cas à validation interne, à travers ses quatre composantes : l'anticipation prévisionnelle des apprentissages et des comportements attendus, la conception des interventions, passage à leur réalisation, et l'analyse (à priori, ...).

- Pour l'étude exploratoire, nous avons conçu un questionnaire, l'avons administré, et ensuite analysé les réponses des élèves grâce aux analyses statistiques (statistique descriptive, Chi<sup>2</sup>). L'échantillon de cette étude se compose de 137 élèves, issus de trois lycées de Meknès (lycée Ibn Roumi, lycée Kasba, et lycée Mohamed Ajana).
- L'analyse à priori permet la conception des séquences d'enseignement-apprentissage dans le cadre des études d'expérimentations, leur réalisation, et leur analyse, séparément pour chacun de nos deux modèles (ModLI et ModL2<sup>t</sup>). L'échantillon de cette étude se compose de seize élèves, issus de deux lycées de la ville de Meknès : quatre élèves de la branche PC du lycée Ibn Roumi, et lycée

Mohamed Ajana, trois élèves de la branche PC et neuf élèves de la branche SVT. Les activités sont conçues selon la technique de l'alternance entre travail individuel, travail collaboratif en groupes à membres tournants, et mobilisation de ressources TICE (y compris SimulP200, la ressource TICE que nous avons élaborée exclusivement pour ce travail).

- Nous avons finalement conçu des séquences d'enseignement-apprentissage pour l'étude de validation pour chacun de nos deux modèles (ModLI et ModL2<sup>t</sup>). L'échantillon de cette étude, se compose de deux classes de la 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat scientifique des branches SVT (37 élèves) et PC (38 élèves), issue du lycée Mohamed Ajana de la ville de Meknès. Chaque classe a été prise séparément.

## **D// CONCLUSION**

L'apprentissage reste toujours un ensemble de mécanismes, intrinsèque et extrinsèque, menant à l'acquisition de savoirs ou de comportements, conjointement liés aux mécanismes élaborés par des pensées savantes à l'enseignement. C'est pourquoi nous sommes d'abord allés voir du côté des grandes théories de l'apprentissage. Nous avons relevé que chacune d'elles définit l'apprentissage selon un paradigme distinct. En effet, le behaviorisme se base sur deux notions clés, la notion d'observable et la notion d'environnement. Dans ce contexte, cette théorie a fait du conditionnement (réactif, ou opératif) son concept central : conditionner un comportement consiste à faire apprendre ce comportement. Les cognitivistes comptent dans leur approche avec les facteurs non observables. Ils ont repris l'analogie entre input et output de l'ordinateur pour l'élargir à tous systèmes, y compris son application dans le contexte du cerveau humain et aux processus d'apprentissage. Pour le constructivisme, les apprentissages se construisent progressivement lorsque l'individu (l'enfant en particulier) entre en contact avec le monde, et développe des unités élémentaires de l'activité intellectuelle. Les socioconstructivistes préconisent un rôle primordial à la classe comme un tout régissant les interactions internes responsables des échecs et des réussites des apprentissages. L'apprentissage avec autrui crée les conditions de toute une série de processus de développement, qui ne se produisent que dans le cadre de la médiation

par voies communicative et collaborative. Le connectivisme est le dernier né des théories de l'apprentissage. Il critique et dévoile les limites des autres théories, face au fait établi par la technologie qui a réorganisé notre mode de vie, notre communication et notre apprentissage. Du coup, les connexionnistes affirment que c'est possible pour l'individu de vivre toutes les expériences d'apprentissage, à travers les expériences vécues dans le monde connecté.

Par la suite, nous nous sommes dirigés vers la délimitation conceptuelle des autres notions clés de notre cadre théorique, à savoir, la notion de registres, la notion d'espace de réalité, la notion de cadres, et les notions de modèle et de modélisation. Toutes harmoniquement imbriquées, elles ont formé l'outil adéquat d'analyse parmi l'ingénierie didactique de cette recherche. En effet, pour assurer la compatibilité entre l'appréhension ou la production d'une représentation sémiotique, et son appréhension conceptuelle, R.DUVAL définit un registre comme étant un système sémiotique permettant les trois activités fondamentales de la pensée : la formation d'une représentation identifiable; le traitement de cette représentation dans le registre même où elle a été formée; et la conversion de cette représentation en une représentation d'un autre registre. Nous avons relevé que cette conversion connaît quelques échecs, dans la classe de physique, lors des passages entre registres mathématiques et celui de la physique. Alors que l'ensemble des objets réels et des événements hors de la pensée du sujet sur lequel porte l'activité mentale de conceptualisation, est la précieuse notion d'espace de réalité, exclusivement propre au contexte de la physique. Entre différents cadres de rationalité, cette notion permet d'interpréter les ruptures de rationalité observées chez les élèves lors de leurs manipulations conceptuelles, simultanée, des objets mathématiques et d'autres de la physique. Ainsi, tout obstacle connu et irradié, la construction d'un cadre d'intelligibilité rend facile la tâche de faire accéder l'élève aux types de connaissances servants à mettre en relation le monde matériel, et celui des théories et des modèles.

L'état des lieux ainsi dressé, nous a ouvert le champ de nous intéresser au cas de l'enseignement-apprentissage de la leçon de la décroissance radioactive, programmée en 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat marocain, des branches SVT et PC. En effet, nous avons proposé deux alternatives afin d'atténuer les difficultés liées à

l'introduction de la fonction exponentielle pour l'enseignement de la décroissance radioactive en physique, alors qu'en mathématiques la notion de fonction exponentielle n'a pas été abordée. Nous avons détaillé tous les développements mathématiques derrière l'élaboration de nos deux alternatives. Nous les avons appelés **ModLI**, le **Modèle de Linéarisation par Intervalle**, et **ModL2<sup>t</sup>**, le **Modèle de la Loi en puissance à base 2 du temps**.

Dans les chapitres quatre et cinq, nous allons présenter les expérimentations, les résultats et les discussions, de l'expérimentation de nos deux modèles de l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive, en l'occurrence, ModLI et ModL2<sup>t</sup>.

**QUATRIEME CHAPITRE : EXPLORATION DE LA DEPENDANCE  
ENTRE L'ENSEIGNEMENT-APPRENTISSAGE DE LA PHYSIQUE  
ET LES RESSOURCES TICE A LA DISPOSITION DES LYCEENS  
MAROCAINS**



## **A// INTRODUCTION**

Pour se prononcer sur les conditions de l'amélioration de l'enseignement-apprentissage de la modélisation mathématique en physique, et pour se prononcer aussi, sur les possibles interactions entre elle et entre l'utilisation des TICE pendant les séquences d'expérimentation, nous avons réalisé une étude exploratoire. Elle consiste à déterminer les préférences et attentes des élèves marocains, relatives au déroulement de ces leçons en présentiel. Elle explore aussi, les pratiques des élèves vis-à-vis de l'utilisation des ressources TICE en classe inversée.

Pour ce faire, nous avons commencé par poser les questions de recherche relatives à cette étude exploratoire, émettre des hypothèses, vérifier leurs pertinences et leurs degrés de véracité. Puis, nous avons étalé tous les détails de notre démarche méthodologique propre à cette étude exploratoire.

Notre outil avec lequel nous comptons construire une base de donnée, est un questionnaire méthodiquement construit sur un support papier, distribué en classe. Ainsi, nous avons récolté des informations personnelles sur les élèves. Nous avons rassemblé des données sur le matériel informatique et les formes de connectivités auxquelles les élèves ont accès. Nous cherchons, également, des données sur les préférences des élèves relatives aux ressources qu'ils mobiliseraient via internet pour la physique, et des données relatives aux sites web qu'ils solliciteraient. Nous avons réservé une place particulière aux différentes analyses statistiques, en l'occurrence, les statistiques descriptives, l'analyse en composante principale, et les tests de Chi<sup>2</sup>.

## **B// QUESTIONS DE RECHERCHE DE L'ETUDE EXPLORATOIRE**

En cours de sciences physiques, la classe se trouve face à des situations d'inconvenance, soit par l'absence de matériel expérimental, soit qu'il est existant mais défectueux. Cependant, des notions relatives à la maîtrise de l'expérimentation et de la modélisation mathématique, font figure d'objets d'apprentissages ou de leurs consolidations chez les élèves, comme elles font figure d'objets d'enseignement et de réflexions didactiques et pédagogiques chez le professeur.

En s'appuyant sur les principes de base de la classe inversée, notre objectif est de délimiter les préférences des élèves en matière de mobilisation des TICE à domicile, au service de l'expérimentation et de la modélisation mathématique, ainsi que déterminer les dépendances entre ces préférences par les techniques d'analyses croisés.

Nous proposons donc de répondre aux questions spécifiques de cette recherche:

- Quelles sont les préférences des élèves de la 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat, section SVT et PC, relatives à leurs mobilisations des ressources TICE pour les cours de physique en classe inversée ? Quelles sont leurs préférences relatives aux sites qu'ils consulteraient ? Quelles sont leurs préférences relatives aux contenus qu'ils consulteraient ?
- Quel est le matériel et les ressources TICE à la disposition des élèves marocains de la 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat, branches SVT et PC ?
- Est-ce pour l'enseignement-apprentissage des sciences physiques, les élèves arrivent à profiter des ressources pédagogiques (cours en lignes, simulation, ...), à l'aide du matériel dont-ils disposent ? Comment conçoivent-ils la mobilisation des TICE servant à l'expérimentation et à la modélisation mathématique en physique ?

## **C// METHODOLOGIE DE L'ETUDE EXPLORATOIRE**

Nous avons amorcé l'étude exploratoire par l'organisation d'une réunion avec les 20 élèves volontaires du lycée Mohamed AJANA Meknès, dont 13 de la branche SVT et 7 de la branche PC. Nous leurs avons expliqué le but de cette recherche académique, et comment se restreindre à sa rigueur scientifique. Nous avons ensuite organisé deux séances de travail espacé d'une semaine. La première séance a été dédiée à une recherche internet libre en classe sur le thème de la décroissance radioactive dont le but est d'observer comment les élèves y procèdent-ils. Cette séance a duré une heure, sous l'encadrement de deux professeurs. Quant à la seconde séance, elle a été consacrée aux entretiens avec les mêmes 20 élèves sur leurs activités chez eux durant le processus de la classe inversée. Tous les entretiens ont été

enregistrés, avec le consentement des élèves et de l'administration du lycée. Cette étape, nous a permis de dégager des observations sur ces vingt élèves :

- La plupart de ces élèves a un smartphone, moins d'ordinateurs de bureau, encore moins d'ordinateur portable et de connexion permanente à internet.
- Ces élèves se connectent peu à internet, et pendant des durées différentes, pour leurs apprentissages sur la physique.
- Ces élèves consultent différents sites internet, d'abord pour la recherche d'exercices solutionnés.
- Ces élèves partent de leur culture générale pour s'exprimer sur la radioactivité, et visualisent d'abord des vidéos sur le sujet.

Inspirés des observations de cette étape, nous avons pu définir les axes de notre questionnaire. Ce questionnaire a été sujet à des tests avec un groupe de quatre élèves, et un autre groupe de trois professeurs des sciences physique. Une fois finalisé, nous avons réalisé une étude exploratoire, avec une population de 137 élèves marocains de la 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat. Cet échantillon se compose d'élèves de cinq classes de la 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat section SVT et PC, provenant de trois lycées de la ville de Meknès. Notre questionnaire individuel est l'outil d'investigation adopté. Il a été tiré sur un support papier, puis distribué aux élèves en classe, après avoir eu l'accord des responsables académiques supervisant notre recherche et celle des responsables locaux de l'enseignement national.

Le questionnaire se compose d'items portant sur :

- les informations personnelles de l'élève (genre, branche, scolarité) ;
- les informations sur les structures scolaires et personnelles mises à la disposition de l'élève comme outils logistiques TICE (machines, connexions, assistance,...) ;
- les préférences des élèves relatives aux sites pédagogiques et leurs contenus.
- Les conceptions des élèves sur le déroulement du processus d'élaboration de modèles et de la modélisation mathématique en physique.

Les réponses à ce questionnaire ont fait l'objet d'une étude statistique, par la conjugaison entre deux logiciels : Excel pour la statistique descriptive, et BiostaTGV pour les tests de Chi2. Nous avons procédé d'abord par un traitement des données par le logiciel Excel 2007, dont les résultats ont fait l'objet d'étude par BiostaTGV (BiostaTGV, 2000), un logiciel libre permettant de faire des statistiques en ligne, en l'occurrence, les tests d'indépendance chi2, via le lien : <https://marne.u707.jussieu.fr/biostatgv/?module=tests/chideux>.

## D// RESULTATS ET DISCUSSION DE L'ETUDE EXPLORATOIRE

### I. Informations personnelles sur les élèves

Le tableau 2 détaille quelques informations personnelles des élèves :

Thèmes d'items	Modalités	Résultats	Choix non valide	Total
Genre	masculin	47,4%	2,2%	100%
	féminin	50,4%		
Branche	SVT	40,1%	1,5%	100%
	PC	58,4%		
Scolarité	Non redoublant	71,5%	3,7%	100%
	Redoublant	24,8%		
Possession d'un smartphone	Oui	70,8%	0,7%	100%
	Parfois	5,9%		
	Non	22,6%		
Connectivité à domicile	Oui	62%	0,7%	100%
	Parfois	6,6%		
	Non	30,7%		
Durée t de connexion moyenne quotidienne de l'élève pour la physique	0h	21,9%	14,6%	100%
	0<t<=10min	14,6%		
	10min<t<=0,5h	14,6%		
	0,5h<t<=1h	22,63%		
	plus que 1h	11,68%		

Tableau 2 : Informations personnelles sur les élèves

Nous constatons qu'il y a dans notre échantillon :

- presque une parité entre genre, à l'image de la population au Maroc (Maroc, 2016);
- presque 60% des élèves sont de la branche PC (Physique et Chimie), alors que les 40% sont de la branche SVT (Sciences de la Vie et de la Terre) ;

- 25% des élèves sont des redoublants en 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat (SVT et PC toutes branches confondues) ;
- 70% des élèves possèdent en permanence un Smartphone contre presque les 20% qui ne l'ont pas encore, le reste le possède occasionnellement ;
- presque 60% des élèves ont une connexion internet à domicile contre les 30% qui ne l'ont pas, le reste se connecte parfois ;
- presque 15% des élèves n'ont pas donné de réponse sur leurs durées de connexion quotidienne pour la physique, contre les 65% qui se connectent quotidiennement entre moins de dix minutes et plus d'une heure, au moment où presque 20% ne se connectent jamais.

La possession de smartphone ou de connexion à domicile sont utilisées comme indicateurs sur éventuellement d'autres structures logistiques personnelles de l'élève pouvant servir la pédagogie inversée.

## II. Dispositifs logistiques des connectivités aux lycées :

Le tableau 3 détaille les perceptions des élèves sur la connectivité au lycée :

Thèmes d'items	Modalités	Résultats	Choix non valide	Total
Lycée connecté	oui	70,8%	0,7%	100%
	non	5,9%		
	Je ne sais pas	22,6%		
Laboratoire des sciences physiques connecté	oui	62%	0,7%	100%
	non	6,6%		
	Je ne sais pas	30,7%		
Motivation de l'élève par son professeur pour se connecter à internet pour la physique	Toujours	1,5%	2,9%	100%
	Souvent	4,4%		
	Parfois	47,4%		
	Jamais	43,8%		

**Tableau 3 : Perceptions des élèves sur les dispositifs logistiques de connexion à internet au lycée**

Nous constatons que les élèves ont pris des positions avec des proportions presque similaires sur les connexions à internet du lycée indiquant son existence permanente. Cependant, aux lycées de notre échantillon, seules, les salles qui ont été équipées dans le cadre du programme marocain GENIE (GÉNÉralisation des Technologies d'Information et de Communication dans l'Enseignement au Maroc) et les administrations sont connectées à internet, même constat comme il a été observé

par O.El Ouidadi et al (Elouidadi, Essafi, Aboutayeb, Sendide, & Depiereux, 2011). Les élèves ont donc une idée fautive sur la connectivité à internet des laboratoires des sciences physiques.

Pour inciter les élèves à se connecter à internet pour des tâches en sciences physiques, seulement 5% des élèves se voient vivement motivés par le professeur, contre 50% des élèves qui disent être motivés parfois et 45% disent n'être jamais motivés.

La culture de l'utilisation des ressources TICE peine à s'installer dans les pratiques de tous les acteurs (MAMANE & BENJELLOUN, 2016a). Chose qui a été observée précisément chez le corps enseignant, au Québec par F.Larose et al (Larose, Grenon, & Palm, 2004) et au Maroc par O.El Ouidadi et al (Elouidadi, Essafi, Aboutayeb, Sendide, & Depiereux, 2011).

### III. Préférences des élèves relatives aux ressources qu'ils mobilisent via internet pour la physique :

Le tableau 4 détaille les préférences des élèves relatives aux ressources qu'ils mobilisent lors de toute recherche via internet (MAMANE & BENJELLOUN, 2018e).

Thèmes d'items		Sélections tous ordres confondus (de 1 à 7)	Pic observé
Document		45.9%	En 3ème choix avec 13.87%
Expériences	Photos d'expériences	40.9%	En 3ème choix avec 13.14%
	Schémas d'expériences	43.1%	En 3ème choix avec 12.41%
	Vidéos d'expériences	46.7%	En 3ème choix avec 13.87%
	Simulation d'expériences	30%	En 2ème choix avec 7.3%
Exercices	Exercices	68.6%	En 2ème choix avec 29.93%
	Exercices résolus	86.9%	En 1er choix avec 48.18%

Tableau 4 : Préférences des élèves relatif aux ressources qu'ils ont mobilisées via internet

Des élèves (40,9% à 45,9%) ont exprimé leurs préférences des TICE sous forme de documents, ou pour la recherche de photos d'expériences ou de leurs schémas. 30% à 46,7% d'élèves se connectent à internet pour la visualisation des simulations d'expériences ou pour la recherche de leurs vidéos, alors que la tendance, plus élevée, s'exprime du côté des recherches pour trouver les exercices (68,6%) ou pour consulter les exercices résolus (86,9%).

#### IV. Préférences des élèves relatives aux sites web qu'ils sollicitent lors de la recherche internet pour la physique :

Le tableau 5 ci-dessous, détaille les préférences des élèves relatives aux sites qu'ils sollicitent lors de la mobilisation de ressources via internet.

Thèmes d'items	Sélections tous ordres confondus (de 1 à 5)	Pic observé
Youtube	75.2%	En 1er choix avec 40.88%
Facebook	40.9%	En 1er choix avec 10.22%
Forums	56.9%	En 3ème choix avec 18.98%
Sites web lycées marocains	41.6%	En 2ème choix avec 15.33%
Autres sites web fiables	64.2%	En 1er choix avec 24.82%

**Tableau 5 : Préférences des élèves relatives aux sites qu'ils sollicitent lors de mobilisation de ressources via internet**

Les préférences des élèves se déclinent comme suit : les élèves effectuent des recherches à 75,2% via Youtube, à 40,9% via Facebook, à 41,6% via les sites de lycées marocains, à 56,9% via les forums et à 64,2% via autres sites web sûrs et fiables (affiliés aux institutions académiques,...).

Nous pouvons conclure que les élèves sont très fortement attirés par les ressources mobilisables d'abord sur Youtube (MAMANE & BENJELLOUN, 2018e).

#### V. Préférences des élèves sur l'approche de l'établissement de l'expression analytique de la loi de décroissance radioactive

Le tableau 6 montre les attentes des élèves relatives aux approches des modélisations mathématiques qu'elles préfèrent pour l'apprentissage de la décroissance radioactive. Les élèves préfèrent de loin des modélisations mathématiques prêtes (60,6%) plutôt que de les construire par la voie expérimentale (15,3%), ou la voie théorique (23,4%).

Préférences des élèves relatives à l'établissement de l'expression analytique de la loi de décroissance radioactive	Fréquences
Aucune sélection	0,7%
par le professeur ou documents en 1er	60,6%
par voie expérimentale en 1er	15,3%
par les mathématiques en 1er	23,4%

**Tableau 6 : Préférences des élèves relatives aux approches de modélisations mathématiques**

## VI. Etude statistique

Puisque toutes les variables de notre questionnaire sont nominales sauf deux qui sont échelles, nous avons choisi de réaliser des tests d'indépendance de  $\chi^2$  dont les résultats sont les suivants.

### 1. Remarque :

Nos notes de remarques sont les suivantes :

- Notre échantillon pris aléatoirement s'est trouvé équilibré du point de vue genres des élèves (67 garçons et 69 filles).
- Nous avons remarqué que la fréquence des réponses non valide est très faible, c'est pourquoi nous les avons écartés de l'étude statistique.
- Les valeurs de tous les tableaux sont les pourcentages au total établis sur 137 observations, sauf notification.

### 2. Tests d'indépendances de $\chi^2$ entre la branche de l'élève et les autres variables :

Nous avons étudié la dépendance entre les deux variables suivantes  $V_1$  (la branche de l'élève) et  $V_i$  (scolarité de l'élève, possession de smartphone par l'élève, domicile de l'élève connecté, sa connaissance sur la connectivité au laboratoire de physique, sa connaissance sur la connectivité au lycée, motivation de l'élève par son professeur à faire des recherches internet, but de la connexion pour la physique) :

- $V_1$  : La branche de l'élève.
- $V_i$  : L'autre variable.

Nous avons tiré les hypothèses de travail suivantes :

- Hypothèse nulle  $H_0$  : les deux variables  $V_1$  et  $V_i$  sont indépendantes.
- Hypothèse alternative  $H_1$  : les deux variables  $V_1$  et  $V_i$  sont dépendantes.



Les résultats sont présentés dans le tableau 7 ci-dessous.

Croisements de la branche de l'élève avec:	1-p	Hypothèse acceptée
sa scolarité	>99,99%	H <sub>1</sub> très significativement
sa connaissance sur la connectivité au lycée	89,54%	H <sub>0</sub>
sa connaissance sur la connectivité au laboratoire de physique	69,03%	H <sub>0</sub>
sa possession de smartphone	5,32%	H <sub>0</sub>
sa possession d'Internet à domicile	52,73%	H <sub>0</sub>
la part de sa motivation par le professeur à faire des recherches internet pour la physique	23,89%	H <sub>0</sub>
son but de ses connexions sur la physique	94,23%	H <sub>1</sub> peu significative

Tableau 7 : Résultats des tests d'indépendances chi<sup>2</sup> entre la branche de l'élève et autres variables

### 2.1. Pour les tests d'indépendances chi<sup>2</sup> négatifs

Les tests d'indépendance chi<sup>2</sup> sont négatifs entre d'une part la branche de l'élève, et d'autre part ses connaissances sur les états des connectivités de son lycée et du laboratoire de physique, sa possession de smartphone, sa possession d'internet à domicile, et sa perception des motivations par son professeur des sciences physiques à faire des recherches internet pour la physique. Les déclarations des élèves sont indiscernables par rapport à leurs branches, et donc ce sont les hypothèses nulles H<sub>0</sub> qui ont été retenues, attestant d'une indépendance avérée entre la branche de l'élève, et les autres facteurs du tableau 7 (MAMANE & BENJELLOUN, 2018e).

### 2.2. Pour les tests d'indépendances chi<sup>2</sup> positifs

La branche de l'élève a une dépendance de p-value < 1% : très significative avec la scolarité de l'élève, et peu significative avec les contenus de la physique qu'il consulte sur internet. Les détails des croisements que nous avons effectué sont les suivants (MAMANE & BENJELLOUN, 2018e):

#### a. Croisement entre la branche de l'élève et sa scolarité :

Le tableau 8 croise entre les modalités de l'item (ii) et celles de l'item (iii).

item(ii) : branche de l'élève.

item (iii) : scolarité de l'élève.

Branche \ Scolarité	non redoublant	redoublant	TOTAL
SVT	29,9%	11,0%	40,9%
PC	54,0%	1,5%	55,5%
TOTAL	83,9%	12,4%	96,4%

Tableau 8 : croisement entre la branche de l'élève et sa scolarité.

- Suivant la lecture des totaux, presque les 55.5% de notre échantillon sont des élèves de section PC contre les 40,9% qui sont de section SVT. 83,9% des élèves sont des non redoublants en 2ème année du baccalauréat et 12,% redoublent l'année.
- La lecture verticale seule, relative aux colonnes du tableau 8 montre que les 64,4% (74/115) des élèves non redoublant sont de section PC contre le 35,6% (41/115) qui sont de section SVT. Alors que la tendance s'inverse pour les élèves redoublants, ce sont les élèves de section SVT qui prennent la tête avec une très grande majorité de presque les 90% (15/17) et presque les 10% (2/17) qui sont de section PC.
- La lecture horizontale seule, relative aux lignes du tableau 8 montre que 73,2% (41/56) des élèves de section SVT sont des non redoublant et 26,8% (15/56) sont des redoublants. Alors que chez les élèves de section PC, deux redoublants sont observés avec 2,7% (2/76) et 97,3% (74/76) qui sont des non redoublants.

Nous pouvons donc conclure que la branche PC attire plus d'élèves et connaît moins d'échecs par rapport à la branche SVT (MAMANE & BENJELLOUN, 2018e).

b. [Croisement entre la branche de l'élève et les contenus qu'il consulte pour les recherches internet sur la physique :](#)

Le tableau 9 croise entre les modalités de l'item (ii) et celles de l'item (1f).

item(ii) : branche de l'élève.

item 1f: Que préféreriez-vous chercher en 1er sur internet à propos de la physique, les documents, l'expérimentation ou les exercices et/ou leurs solutions?

item 1f Branche	aucune sélection	tendance à chercher des documents papiers en 1er	tendance à visualiser des expériences en 1er	tendance à chercher des exercices avec ou sans solutions en 1er	Total
SVT	5,1%	5,1%	3,7%	27,0%	40,9%
PC	0,7%	2,9%	13,1%	41,6%	58,3%
Total	5,8%	8,0%	16,8%	68,6%	99,2%

**Tableau 9 : croisement entre la branche de l'élève et les contenus qu'il consulte pour les recherches internet sur la physique.**

- Suivant la lecture des totaux :
  - ✓ Presque 60% de notre échantillon sont des élèves de section PC et 40% sont de section SVT. Un peu moins de 6% des élèves n'ont fait aucun choix parmi les propositions, au moment où les 93,4% restants se sont exprimés sur leur choix en premier parmi : une recherche de documents sur la physique, une recherche des expériences ou une recherche d'exercices et/ou de leurs solutions.
  - ✓ La majorité de 68,6% des élèves se tourne en premier vers des recherches d'exercices résolus ou non résolus sur la physique, alors que 10,2% (14/137) ne les cherchent jamais.
  - ✓ La motivation des élèves à chercher à visualiser des expériences de physique sur internet en premier lieu est de 16,8% alors que 47,4% (65/137) ne se tournent jamais vers ces pratiques.
  - ✓ Et ce sont 8% des élèves qui cherchent en premier sur internet des documents papiers portant sur la physique, alors que 52,6% (72/137) ne le font pas.
  - ✓ Reste 5,8% des élèves de notre échantillon ne se sont pas exprimés sur aucun des choix proposés.
- La lecture verticale seule, relative aux colonnes du tableau 9 montre que :
  - ✓ Parmi les élèves qui se connectent à internet pour consulter des exercices avec ou sans solutions en premier, 60% (41,6/68,6) sont des élèves de section PC et 40% (27/68,6) sont de section SVT.

- ✓ Parmi les élèves qui se connectent à internet pour visualiser des expériences de physique en premier, ce sont les élèves de section PC qui prédominent avec 78% (13,1/16,8) contre 22% (3,7/16,8) pour les élèves de section SVT.
- ✓ Parmi les élèves qui se connectent à internet pour de la documentation sur la physique en premier, la tendance s'inverse en faveur des élèves de section SVT avec 63,75% (5,1/8) contre 36,25% (2,9/8) pour ceux de section PC.
- ✓ Reste 5,8% des élèves de notre échantillon ne se sont pas exprimés sur aucun des choix proposés, parmi lesquels ceux de la branche SVT priment avec presque 88% (5,1/5,8) contre 12% (0,7/5,8) pour les élèves de section PC.
- La lecture horizontale seule, relative aux lignes du tableau 9 montre que :
  - ✓ Parmi les élèves de section SVT, il y a 66% (27/40,9) qui se tournent vers la recherche sur internet d'exercices avec ou sans solutions en premier. La valeur baisse vers 9% (3,7/40,9) pour la visualisation d'expériences en premier, et demeure, avec une légère hausse, vers 12,5% (5,1/40,9) pour la recherche de documents en premier et aussi pour les élèves qui ne se sont pas exprimés sur les choix proposés.
  - ✓ Parmi les élèves de section PC, il y a 71,2% (41,6/58,4) qui se tournent vers la recherche sur internet d'exercices avec ou sans solutions en premier, la valeur baisse vers 22,4% (13,1/58,4) pour la visualisation d'expériences en premier et vers 5% (2,9/58,4) pour la recherche de documents en premier, alors qu'elle se limite vers 1% (0,7/58,4) pour les élèves qui ne se sont pas exprimés sur les choix proposés.

Nous concluons que les recherches en lignes relatives à la physique, faites par les élèves de la 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat section SVT et PC se caractérise par un penchant à se confronter avec les exercices résolus ou non résolus comme tremplin vers la maîtrise des concepts de la physique, avec un peu d'intérêt pour les expériences filmées et moins encore pour les documents écrits. Il y a 10,2% (14/137) qui n'adhère pas à cette rué vers la recherche d'exercices avec ou sans solutions (MAMANE & BENJELLOUN, 2018e).

### 3. Tests d'indépendance de chi2 entre les contenus consultés sur la physique par les élèves et les autres variables :

Nous avons étudié la dépendance entre les deux variables suivantes  $V_1$  (contenus consultés sur la physique via internet) et  $V_i$  (possession de smartphone par l'élève, domicile de l'élève connecté, sites web fréquentés) :

- $V_1$  : contenus consultés sur la physique via internet par les élèves.
- $V_i$  : Autre variable

Nous avons tiré les hypothèses de travail suivantes :

- Hypothèse nulle  $H_0$  : les deux variables  $V_1$  et  $V_i$  sont indépendantes.
- Hypothèse alternative  $H_1$  : les deux variables  $V_1$  et  $V_i$  sont dépendantes.

Les résultats sont présentés dans le tableau 10 ci-dessous (MAMANE & BENJELLOUN, 2018e):

Croisements des contenus consultés par les élèves sur la physique via internet avec:	1-p	Hypothèse acceptée
sa possession de smartphone	53,43%	$H_0$
sa possession d'internet à domicile	76,32%	$H_0$
les sites web fréquentés	>99,99%	$H_1$ très significativement

Tableau 10 : Résultats des tests d'indépendances chi2 entre les contenus consultés par les élèves sur la physique via internet et autres variables.

#### 3.1 Pour les tests d'indépendances chi2 négatifs

Pour les sciences physiques, les contenus consultés par les élèves sur la physique via internet n'ont pas d'influence ni sur leur possession de smartphones, ni sur leur possession de connexions à internet à domicile (MAMANE & BENJELLOUN, 2018e).

#### 3.2 Pour les tests d'indépendances chi2 positifs

Le tableau 11 croise entre les modalités de l'item (1f) et celles de l'item (1g).

item 1f : Que préféreriez-vous chercher en 1er sur internet à propos de la physique, les documents, la visualisation d'expériences ou les exercices avec ou sans solutions?

item 1g : Sur quel sites web préféreriez-vous faire des recherches en 1er à propos de la physique, youtube, facebook, les forums ou les sites web de lycées marocains ou autres?

item 1f \ item 1g	aucune sélection	tendance à chercher sur youtube en 1er	tendance à chercher sur facebook en 1er	tendance à chercher sur forums en 1er	tendance à chercher sur sites web de lycées marocains ou autres en 1er	Total
aucune sélection	5,1%	0,7%	0,0%	0,0%	0,0%	5,8%
donner la priorité à valider par prof ou à chercher des documents textes	0,0%	6,6%	0,0%	0,7%	0,7%	8,0%
tendance à visualiser des expériences en 1er	0,7%	10,2%	2,9%	0,0%	3,7%	17,5%
tendance à chercher des exercices avec ou sans solutions en 1er	0,7%	19,7%	7,3%	11,0%	29,9%	68,6%
TOTAL	6,6%	37,2%	10,2%	11,7%	34,3%	

**Tableau 11 : Croisement entre les sites web que l'élève fréquente lors des recherches internet pour la physique et les contenus qu'il y consulte.**

- la lecture verticale limitée à chaque colonne du tableau 11, relatant les préférences des élèves relatives aux sites web, montre que sont:
  - ✓ il y a 6,6% des élèves qui n'ont fait aucun choix, parmi lesquels ce sont 77,3% (5,1/6,6) qui n'ont pas fait aucun choix aussi sur les contenus qu'ils consulteraient. Le reste avec 10,6% (0,7/6,6) pour chacune des deux préférences de recherche internet en premier : recherches des expériences de physique ou recherches des exercices avec ou sans solutions.
  - ✓ Parmi les 37,2% des élèves qui orientent leurs activités première sur youtube, il y a 53% (19,7/37,2) qui consultent les exercices avec ou sans solutions en premier, la recherche des expériences de physique en premier se taille la part de 27,4% (10,2/37,2), et la recherche des documents en premier captent l'intérêt de 17,7% (6,6/37,2) de ces élèves.

- ✓ Les recherches sur les sites web des lycées marocains ou autres sont la destinée première de 34,3% des élèves dont 87,2% (29,9/34,3) se penchent en premier sur la recherche des exercices avec ou sans solutions. Le reste, se partage entre 10,8% (3,7/34,3) des élèves qui cherchent des expériences de physique en premier, et 2% (0,7/34,3) pour ceux dont l'intérêt porte en premier sur la recherche des documents sur la physique.
- ✓ A presque à même hauteur de 10,2% et 11% des élèves, facebook et les forums se taillent la place des échanges entre les élèves qui ont pour objet les exercices de physique avec ou sans solutions (respectivement 71,6% et 94%). Mais facebook, par 28,5% (2,9/10,2) des élèves le sollicitant en premier, se caractérise par être la plateforme de la communication en premier sur les expériences de physique, au moment où les forums sont préférés par 6% (0,7/11,7) des élèves le sollicitant en premier, comme plateforme d'échange de documents.
- la lecture horizontale limitée à chaque ligne du tableau 11 montre que sur les contenus proposés :
  - ✓ 5,8% des élèves n'ont fait aucune sélection. Ce sont 87,9% (5,1/5,8) parmi eux qui ne se sont pas exprimés sur le site prioritaire de leurs recherches. Alors que le reste avec 12,1% (0,7/5,8) préfèrent se lancer sur youtube en premier.
  - ✓ La recherche de documents en premier est exprimée par 8% des élèves dont 82,5% (6,6/8) la font sur youtube en premier. Alors que 8,7% (0,7/8) de ces élèves la font sur les forums en premier, ou la font en premier sur les sites des lycées marocains ou autres.
  - ✓ 17,5% des élèves cherchent d'abord des expériences de physique. Ces élèves se penche vers les recherches : en premier sur youtube avec 58,3% (10,2/17,5) , sur facebook en premier avec 16,6% (2,9/17,5), et sur les sites des lycées marocains ou autres en premier avec 21,1% (3,7/17,5).
  - ✓ 68,6% des élèves se donnent la recherche d'exercices avec ou sans solutions comme tâche prioritaire. Parmi ces élèves se trouve 43,6% (29,9/68,6) qui font des recherches en premier sur les sites des lycées marocains ou autres, 28,7%

(19,7/68,6) cherche en premier sur youtube, 16% (11/68,6) cherche sur les forums, et 10,6% (7,3/68,6) cherche sur facebook.

Nous concluons que pour la physique, presque 50% des élèves redoublant de section SVT cessent leurs activités sur internet. Alors que la grande majorité des élèves se consacre à la recherche en premier d'exercices avec ou sans solutions et surtout prioritairement sur les sites web des lycées marocains ou autres. L'essentiel des recherches en premier sur l'expérimentation se fait sur youtube ou sur facebook. Alors que la documentation est beaucoup cherchée en premier sur youtube (MAMANE & BENJELLOUN, 2018e).

#### 4. Tests d'indépendances chi2 entre les sites web fréquentés par les élèves pour la physique et les autres variables :

Nous avons étudié la dépendance entre les deux variables suivantes  $V_1$  (sites web fréquentés) et  $V_i$  (possession de smartphone par l'élève, domicile de l'élève connecté) :

- $V_1$  : les sites web fréquentés par les élèves lors d'une recherche internet pour la physique.
- $V_i$  : Autre variable

Nous avons tiré les hypothèses de travail suivantes :

- Hypothèse nulle  $H_0$  : les deux variables  $V_1$  et  $V_i$  sont indépendantes.
- Hypothèse alternative  $H_1$  : les deux variables  $V_1$  et  $V_i$  sont dépendantes.

Les résultats sont présentés dans le tableau 12 ci-dessous (MAMANE & BENJELLOUN, 2018e):

sites web fréquentés par les élèves lors d'une recherche internet pour la physique croisés avec:	1-p	Hypothèse acceptée
sa possession de smartphone	28,42%	$H_0$
sa possession d'Internet à domicile	96,17%	$H_1$ significativement

Tableau 12 : Résultats des tests d'indépendances chi2 entre les sites web fréquentés par les élèves lors d'une recherche internet pour la physique et autres variables.



#### 4.1 Pour les tests d'indépendances chi2 négatifs

Les sites web fréquentés par l'élève lors d'une recherche internet pour la physique n'ont pas d'influence sur sa possession de smartphone (MAMANE & BENJELLOUN, 2018e).

#### 4.2 Pour les tests d'indépendances chi2 positifs

Le tableau 13 ci-dessous, croise entre les modalités de l'item (1g) et celles de l'item (1d) révélant un test d'indépendance de chi2 positif :

item 1g : Sur quel sites web préféreriez-vous faire des recherches en 1er à propos de la physique, youtube, facebook, les forums ou les sites web de lycées marocains ou autres?

item 1d : Votre domicile est-il connecté à internet?

item 1g \ item 1d	oui	Non	parfois	TOTAL
aucune sélection	2,2%	2,9%	1,5%	6,6%
tendance à chercher sur youtube en 1 <sup>er</sup>	27,7%	6,6%	2,2%	36,5%
tendance à chercher sur facebook en 1 <sup>er</sup>	5,8%	4,4%	0,0%	10,2%
tendance à chercher sur forums en 1 <sup>er</sup>	8,0%	2,2%	1,5%	11,7%
tendance à chercher sur sites web de lycées marocains ou autres en 1 <sup>er</sup>	19,7%	13,9%	0,7%	34,3%
TOTAL	63,5%	29,9%	5,8%	

Tableau 13 : croisement entre la possession de l'élève de connexions internet à domicile et les sites web qu'il fréquente lors des recherches internet pour la physique.

- la lecture verticale limitée à chaque colonne du tableau 13 montre que :
- ✓ Il y a 63,5% des élèves qui déclarent avoir des domiciles connectés à internet. Parmi ces élèves 43,6% (27,7/63,5) font des recherches sur la physique en premier sur youtube, suivi de 31% (19,7/63,5) qui les font en premier sur les sites web des lycées marocains ou autres. Alors que 12,6% (8/63,5) de ces élèves les font prioritairement sur les forums, et 9,1% (5,8/63,5) se dirigent en premier sur facebook. Reste 3,5% (2,2/63,5) qui ne se sont pas fixés sur aucun des choix proposés.

- ✓ Il y a aussi une bonne partie figurant avec 29,9% des élèves. Elle déclare n'avoir pas de connexion à internet sur leurs domiciles. Pourtant 9,7% (2,9/29,9) de ces élèves ne se sont pas exprimés sur leurs préférences sur les sites web qu'ils fréquenteraient pour toute recherche internet sur la physique. Alors que 46,5% (13,9/29,9) se tournent en premier vers les sites web des lycées marocains ou autres, suivi de 22,1% (6,6/29,9) qui consultent en premier sur youtube, et 14,7% (4,4/29,9) le font en premier sur facebook. Reste 7,4% (2,2/29,9) qui cherchent sur les forums.
- ✓ Avec un faible pourcentage de 5,8% du total des élèves, se trouvent ceux qui ont des domiciles parfois connectés à internet. Parmi ces élèves il y a 25,9% (1,5/5,8) qui n'ont fait aucune sélection, et 37,9% (2,2/5,8) qui se dirigent en premier vers youtube, suivi de 25,9% (1,5/5,8) préférant chercher en premier sur les forums, et 12,1% (0,7/5,8) de ces élèves font leurs recherches sur la physique sur les sites des lycées marocains ou autres.
- la lecture horizontale limitée à chaque ligne du tableau 13 montre que :
- ✓ Il y a 6,6% des élèves qui n'ont fait aucun choix concernant leurs préférences sur les recherches de contenus sur la physique sur des sites web. Le 1/3 (2,2/6,6) parmi ces élèves a des domiciles connectés à internet, les 2/5 (2,9/6,6) n'en ont pas. Alors que 22,7% (1,5/6,6) déclarent avoir des domiciles parfois connectés au web.
- ✓ Avec presque un même total qui avoisine 36% des élèves, figurent ceux qui cherchent des contenus pour la physique, en premier sur youtube (36,5%) ou sur les sites des lycées marocains ou autres (34,3%). Respectivement parmi ces deux choix des élèves, il y a 57,4% (19,7/34,3) et 75,9% (27,7/36,5) qui ont des domiciles connectés à internet, 18% (6,6/36,5) et 40,5% (13,9/34,3) qui n'en ont pas. Alors que 6% (2,2/36,5) et 2% (0,7/34,3) des élèves déclarent qu'ils ont des domiciles occasionnellement connecté au web.
- ✓ Et avec presque un même pourcentage vers 10,5% des élèves, figurent ceux qui cherchent des contenus pour la physique, en premier sur facebook ou sur les forums. Respectivement parmi ces choix des élèves, il y a 56,9% (5,8/10,2) et 68,4% (8/11,7) qui ont des domiciles connectés à internet, aussi 43,1%

(4,4/10,2) et 18,8% (2,2/11,7) qui n'en ont pas. Alors que 0% (0/10,2) et 12,8% (1,5/11,7) des élèves ont des domiciles occasionnellement connecté au web.

Nous concluons que l'état de connectivité à internet du domicile de l'élève influe considérablement sur ses choix concernant les sites web qu'il consulte en premier lors de toute recherche internet pour la physique. Ce paragraphe fait partie d'un travail (MAMANE & BENJELLOUN, 2018e) qui a été publié dans la revue "International Journal of Education and Information Studies".

## **E// CONCLUSION**

L'étude exploratoire que nous avons menée nous a permis d'identifier les ressources liées aux TICE que les élèves préfèrent mobiliser dans le contexte de la pédagogie inversée appliquée à l'enseignement-apprentissage des sciences physiques. Les élèves sont très fortement attirés par les ressources mobilisables d'abord sur Youtube, très largement en tête avec 75,2%. Puis, ils passent successivement sur les sites fiables, les forums, les sites des lycées marocains, et enfin sur Facebook.

Les tests de Chi2 effectués sur les préférences des élèves de la 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat des branches SVT et PC, nous ont permis de relever quelques facettes de l'interaction entre trois éléments pouvant servir la didactique des sciences physiques, à savoir : l'utilisation des TICE, l'expérimentation, et la modélisation mathématique. Les élèves préfèrent à 72,09% les modélisations mathématiques prêtes des phénomènes en sciences physiques, que de les construire, du moment qu'elles sont des ressources TICE. Ils diversifient leurs utilisations des TICE en rapport avec l'expérimentation, bien qu'elles soient à ses balbutiements. Des élèves (40,9% à 45,9%) ont exprimé leurs préférences des TICE lors de la documentation, ou pour la recherche de photos d'expériences ou de leurs schémas. 30% à 46,7% d'élèves se connectent à internet pour la visualisation des simulations d'expériences ou pour la recherche de leurs vidéos, alors que la tendance plus grandes, s'exprime du côté des recherches d'exercices (68,6%), et surtout, ceux qui sont résolus (86,9%).

Après ce troisième chapitre, nous réserverons le chapitre suivant aux études d'expérimentations pour ModLI et ModL2<sup>t</sup>. En fait, nous procéderons à

l'expérimentation de ces deux alternatives que nous proposons pour l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive, et ce, avec des groupes restreints d'élèves de la 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat marocain, des branches SVT et PC.

**CINQUIEME CHAPITRE : ETUDES D'EXPERIMENTATIONS POUR  
ModLI ET ModL2<sup>t</sup>**

## A// INTRODUCTION

Les deux études d'expérimentations que nous avons menées, sont basées sur la conception de scénarios de classe et de leurs expérimentations. Leurs objets d'études seront deux modèles de la décroissance radioactive que nous avons nommé ModLI (Modèle de Linéarisation par Intervalle), et ModL2<sup>t</sup> (Modèle des puissances à base 2 du temps). Face à la situation actuelle d'échec, nous pensons que chacun des deux modèles est une bonne alternative. L'élaboration et l'expérimentation d'un deuxième modèle, en l'occurrence ModL2<sup>t</sup>, est un outil parfaitement compatible avec la vérification du bien fondé de nos hypothèses de recherche de la présente thèse. Surtout, celui relatif à la mobilisation des mathématiques dans des registres sémiotique et sémantique enseignés et appris par les élèves.

## B// METHODOLOGIE DES ETUDES D'EXPERIMENTATIONS

Dans notre démarche méthodologique spécifique à ce cinquième chapitre, l'expérimentation se déroule selon l'ingénierie didactique au sens de M.ARTIGUE (Artigue, 1989). La scénarisation de nos interventions est sous forme de séquences de travail individuel et de travaux collaboratifs entre groupes d'élèves à membres tournants, alternés par la mobilisation des TICE. En particulier, la mobilisation de **SimulP200** (damier de **Simulation** de la décroissance radioactive du **Polonium 200**), la ressource TICE que nous avons élaborée exclusivement pour l'utiliser pendant ces études d'expérimentations. Nous avons veillé à ce que l'implication des élèves soit systématique et opérationnelle, dans toutes les étapes de l'élaboration du **ModLI**, et si possible dans celle du **ModL2<sup>t</sup>**.

### I. Niveau ciblé

La 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat scientifique des branches SVT et PC est le niveau ciblé dans notre recherche. C'est là où l'enseignement-apprentissage du phénomène de la décroissance radioactive pose problème du côté du formalisme mathématique actuellement adopté.

## II. Modalités d'intervention

Les études d'expérimentations pour ModLI et ModL2<sup>t</sup>, est entreprise auprès d'un échantillon d'un total de seize élèves. Elle a été réalisée séparément avec trois groupes d'élèves. Le premier groupe est composé de quatre élèves de la branche PC, provenant du lycée IBN ROUMI à Meknès. Le deuxième groupe est composé de trois élèves aussi de la branche PC, provenant du lycée Mohamed AJANA à Meknès. Et le troisième groupe est composé de neuf élèves, tous de la branche SVT et provenant du lycée Mohamed AJANA à Meknès. Le travail avec ces trois groupes restreints a assuré la proximité avec chaque élève, dans le but de pouvoir relever des observations avec plus de précision. Ces élèves étaient des volontaires avec qui le travail a été programmé suivant leurs temps libres, dans des locaux de leurs lycées que les administrations correspondantes ont mis à notre disposition.

Les études d'expérimentations ont été effectuées en trois étapes. Nous avons consacré la première étape à l'initiation des élèves aux notions de modèle et de modélisation. Ceci a pris comme objet, les différents registres existants de la décroissance radioactive. Ainsi, nous avons pu relever les observations didactiques, afin de mener une analyse a priori. La deuxième étape a été consacrée à l'expérimentation du nouveau modèle : ModLI, le Modèle de Linéarisation par Intervalle. Alors que la dernière étape a été l'occasion d'expérimenter l'autre nouveau modèle : ModL2<sup>t</sup>, le Modèle des puissances à base 2 du temps.

## C// EXPERIMENTATION RESULTATS ET DISCUSSION

### I. Présentation de notre ressource TICE et organisation

**SimulP200** est une ressource TICE dont l'acronyme dérive de son nom complet: «damier de **Simulation** de la décroissance radioactive du **Polonium 200**» (MAMANE & BENJELLOUN, 2018a). Cette ressource TICE a été développée par notre équipe en utilisant le langage Python (voir annexe 4, p 156). Ce langage est mis en ligne sous licence libre (<https://www.python.org/psf/> ). En effet, après avoir installé ce logiciel sur des ordinateurs portables de cinq élèves, en plus de l'ordinateur portable de l'enseignant, son interface offre la possibilité de créer des fichiers de code, en

l'occurrence le code de SimulP200. Une fois correctement rédigés par notre équipe et enregistrés sur les ordinateurs portables des élèves, chaque fichier est prêt à être utilisé, car il porte le même logo distinctif et le même nom.

Nous avons expliqué aux élèves que l'utilisation de SimulP200 consiste en un simple clic sur le fichier précédemment enregistré sur leur ordinateur portable. Son interface apparaît. Ils ont découvert qu'il a la forme d'un damier de carreaux (40x25), tous initialement de couleurs oranges. Chaque carreau orange joue le rôle d'un noyau de  $^{200}\text{Po}$  non encore désintégré. Mais une fois désintégré, sa couleur devient verte. L'horloge intégrée dans l'interface affiche le temps  $t$ . Alors qu'un autre compteur affiche le nombre de noyaux radioactifs restants  $N(t)$ .

Exemple d'interfaces de SimulP200 (figure 8) :

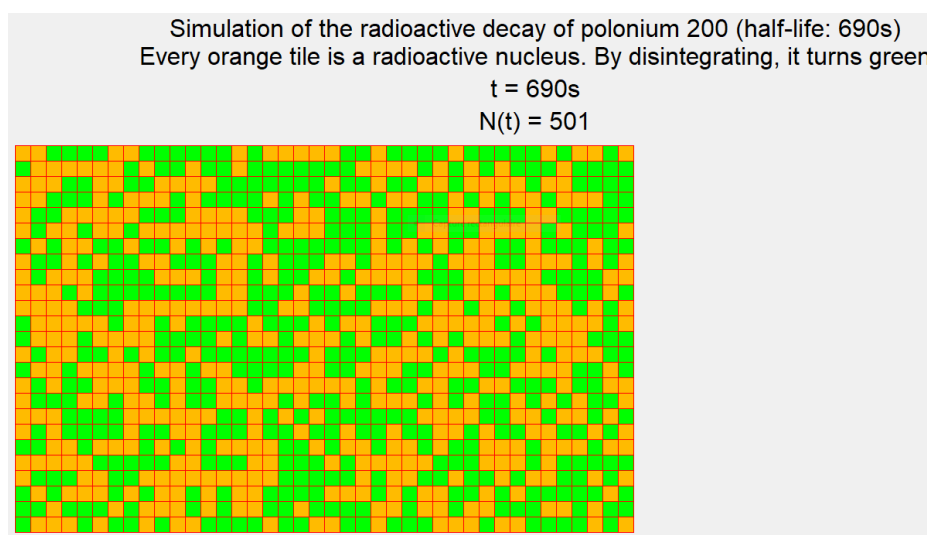


Figure 8: Capture d'écran de SimulP200 en  $t = t_{1/2} = 690\text{s}$ .

## II. Analyse a priori

### 1. Observations didactiques

En vue de partir sur des bases solides dans la formulation des observations didactiques, nous commençons d'abord par exploiter la deuxième partie du questionnaire que nous avons passé aux 137 élèves. Nous notons que la deuxième partie du dit questionnaire, interpelle une identification des conceptions de ces élèves, relatives au phénomène de la décroissance radioactive et à l'établissement de sa loi.



Nous donnons ci-dessous, les résultats des réponses des élèves sur le phénomène de la décroissance radioactive et sur l'établissement de sa loi :

- Il y a deux types de transformations nucléaires : spontanée et provoquée.

Item 2 : je pense qu'il y a deux types de transformations nucléaires, spontanée et provoquée.	Nombre de citations	Fréquence
Vrai*	49	35,8%
Faux	10	7,3%
je ne sais pas	78	56,9%
Total	137	100%

Tableau 14 : hypothèses des élèves sur les types de transformations nucléaires

(\* : la réponse attendue)

- Que penses-tu de la quantité de radiation émise par un échantillon de radioélément si sa quantité de matière augmente ?

Item 3 : je pense que si la quantité de matière du radioélément augmente, sa quantité de radiations...	Nombre de citations	Fréquence
Augmente*	92	67,2%
Diminue	15	11,0%
Fluctue	18	13,1%
ne varie pas	10	7,3%
non valide	2	1,5%
Total	137	100%

Tableau 15 : hypothèses des élèves sur la relation entre la quantité de radiation émise par un échantillon de radioélément et sa quantité de matière (\* : la réponse attendue)

- Que penses-tu de la quantité de radiation émise par un échantillon radioactif si le radioélément change?

Item 4 : je pense que si le radioélément change, sa quantité de radiations...	Nombre de citations	Fréquence
Change*	75	54,7%
ne change pas	9	6,6%
change parfois	53	38,7%
Total	137	100%

Tableau 16 : hypothèses des élèves sur la relation entre le changement du radioélément et sa quantité de radiation (\* : la réponse attendue)

- Que penses-tu de la quantité de radiation émise par un échantillon de radioélément avec le temps ?

Item 5 : avec le temps, je pense que la quantité de radiations émise par un radioélément...	Nombre de citations	Fréquence
Augmente	27	19,7%
Diminue*	53	38,7%
Fluctue	21	15,3%
ne varie pas	36	26,3%
Total	137	100%

Tableau 17 : hypothèses des élèves sur la variation de la quantité de radiation au cours du temps

(\* : la réponse attendue)

- Sachant qu'il existe une loi portant sur la variation de la quantité de radiation émise par un échantillon de radioéléments. Pour établir son modèle mathématique, cocher une réponse parmi les choix suivants :

Item 7 : quelles sont vos attentes sur la façon qu'un modèle analytique de la loi de la décroissance radioactive soit élaboré ? faire un classement.	Nombre de citations	Fréquence
par le professeur ou le voir sur des documents, d'abord	83	60,6%
en s'appuyant sur les données expérimentales, d'abord	21	15,3%
en s'appuyant sur les mathématiques, d'abord	32	23,4%
aucune sélection	1	0,7%
Total	137	100%

Tableau 18 : avis des élèves relatifs à la façon de laquelle ils conçoivent l'introduction du modèle analytique de la loi de décroissance radioactive

Parmi le total de toutes les réponses données par les élèves, nous relevons que :

- Le taux des réponses justes est observé entre 35,8% et 67,2%. Il montre que dans la démarche expérimentale, les élèves ont des compétences indéniables au niveau du flair des hypothèses constructives.
- 60% des élèves ont tendance à voir exposés les modèles mathématiques, de la dite loi, en premier par le professeur ou à partir de documents (livres scolaires ou papiers tirés d'internet). Ce résultat montre la réticence des élèves face à prendre l'initiative de mobiliser les contenus mathématiques dans la physique.

En guise donc de formulation d'observations didactiques, nous supposons que l'analyse des processus de passages de la réalité expérimentale aux modèles mathématiques est indispensable. Une première partie de notre travail consiste donc à analyser les processus de passages entre la décroissance radioactive dans le contexte de la physique, et l'algèbre linéaire<sup>20</sup> dans le contexte des mathématiques. Pour ce faire, nous émettons les hypothèses sur lesquels porteront nos observations didactiques.

- En terme d'espace de réalité : l'influence de l'absence de la réalisation d'expériences en classe sur l'activité de production et d'appréhension des différents modèles de la décroissance radioactive ;

- En terme de registre : l'influence des différents passages entre registres sur la recherche de régularités numériques et leur transposition en représentation graphique. Et sur l'établissement d'une équation traduisant la loi de la décroissance radioactive ;

- En terme de rationalité : le respect de la compatibilité entre les dimensions des grandeurs dans l'équation en question, et la mise en évidence de la proportionnalité ;

- En terme d'organisation du travail : l'influence de l'alternance entre travail individuel et travaux collaboratifs, et la mobilisation des TICE, sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation mathématique des phénomènes en physique.

Pour vérifier donc la pertinence des observations déjà émises selon l'analyse a priori au sens de M.Artigue, nous procédons à une batterie de tests.

## 2. Pré-test 1

### 2.1 Présentation de SimulP200 :

SimulP200 est une simulation de l'évolution d'une population initiale radioactive de 1000 nucléides de polonium 200 (<sup>200</sup>Po). L'interface de la simulation

---

<sup>20</sup> L'algèbre linéaire : la branche des mathématiques qui s'intéresse aux espaces vectoriels et aux transformations linéaires, formalisation générale des théories des systèmes d'équations linéaires.

comporte un damier de carreaux (40x25) sur lequel ne sont schématisés que 1000 carreaux. Ce damier est une représentation de notre échantillon de  $^{200}\text{Po}$  dont chaque carreau orange joue le rôle d'un noyau de  $^{200}\text{Po}$  pas encore désintégré. Mais une fois désintégré, sa couleur vire au vert. L'horloge intégrée dans l'interface, sert à relever le temps  $t$ .

## 2.2 Enoncé du pré-test 1

Un échantillon du radioélément  $^{200}\text{Po}$  étant isolé, rayonne et disparaît au bout d'un moment court (sa demi-vie est 690s), se transformant ainsi aux descendants de sa famille radioactive. Le but est d'étudier l'évolution d'une population de polonium 200 ( $^{200}\text{Po}$  noyaux initialement instables). Au début, nous vous passons la première partie d'une ressource TICE. L'interface décrit l'évolution d'une population de  $^{200}\text{Po}$  pour  $t \leq 4\text{s}$ , et nous vous demandons de prévoir cette évolution pour  $5\text{s} \leq t \leq 8\text{s}$ .

Nous vous demandons de vous conformez aux consignes suivantes :

1ère consigne : travailler d'abord, en individuel, puis en groupes à membres tournants, et ce pour toutes les consignes.

2ème consigne : visualiser attentivement la première partie de la simulation. C'est la présentation d'une expérience réelle. Identifiez les grandeurs physiques mises en jeux, et éventuellement, leurs signes et leurs significations.

3ème consigne : dresser un tableau de mesures avec les valeurs que vous avez pu relever.

4ème consigne : proposer des valeurs pour les cases vides du dit tableau, à partir de vos observations sur l'évolution simulée de l'échantillon du polonium 200 ( $^{200}\text{Po}$ ), et à partir de vos observations relevées sur ce même tableau

5ème consigne : visualiser la deuxième partie de la simulation. Dans un tableau de mesures expérimentales, elle est présentée, une à une, les valeurs que nous vous avons demandées de prévoir.

6ème consigne : dresser la courbe  $N(t)$ , à partir du tableau de mesure.

7ème consigne : donner l'expression analytique de  $N(t)$ , connaissant maintenant l'allure de la courbe  $N(t)$ .

### 2.3 Activités attendues

Pour le pré-test 1, les activités attendues dans les différentes manifestations comportementales des élèves, sont les suivantes :

- Pour les ressources TICE comme origine du **ModSimul** (Modèle **Simulé** de la décroissance radioactive) :
  - Visualiser attentivement la simulation.
  - Identifier les grandeurs physiques mises en jeux.
  - Relever les valeurs des grandeurs physiques repérées.
- Pour le **ModTab** (Modèle **Tabulaire** de la décroissance radioactive) :
  - Ecrire les valeurs de grandeurs physiques relevées sous forme de tableau.
  - Proposer des valeurs pour compléter ce qui manque du tableau des valeurs.
- Pour le **ModGraph** (Modèle **Graphique** de la décroissance radioactive) :
  - Représenter le graphe de  $N(t)$ .
- Pour les **ModAnalyt** (Modèles **Analytiques** de la décroissance radioactive) :
  - Etablir la relation  $N(t) = N_0 - at$ , avec  $[a]=s^{-1}$  la dimension de "a" la constante de proportionnalité entre le nombre de noyaux désintégrés ( $N(t) - N_0$ ) et le temps  $t$ .

### 2.4 Résultats

En se conformant aux trois premières consignes, les élèves dressent un tableau. Il est de la forme :

t(s)	0	1	2	3	4
N(t)	1000	999	998	997	996

Tableau 19 : évolution de 1000 noyaux de  $^{200}\text{Po}$  pendant les quatre premières secondes ( $t \leq 4s$ )

Après le recueil des propositions des élèves, nous faisons passer la deuxième partie de la simulation. De même, un tableau de classe est dressé. Il est de la forme :

t(s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
N(t)	1000	999	998	997	996	995	994	993	992

Tableau 20 : évolution de 1000 noyaux de  $^{200}\text{Po}$  pendant les huit premières secondes ( $t \leq 8s$ )

## 2.5 Grille d'analyse

Nous avons procédé à la transcription des enregistrements faits lors, des séquences d'initiation à la modélisation, et des séquences de la modélisation analytique de  $N(t)$ , sur un intervalle de temps. Cet intervalle de temps est pris très court, pour que nous puissions nous situer dans un contenu des enseignements ultérieurs des élèves en mathématique.

Sur la base des activités des élèves, nous avons relevé des éléments d'analyse. Les résultats de cette analyse sont donnés dans le tableau suivant :

Eléments d'analyse des réponses		Fait	Non fait	Indice parmi les activités des élèves
Représentation du concept de modèle			X	Monsieur, que veut dire modèle ? Comment l'expérience réelle est un exemple de modèle ? Comment le graphe est un exemple de modèle ?
Identification des grandeurs physiques à partir de l'interface du ModSimul	Le temps	X		Sur l'interface, l'horloge indique le temps $t$
	Le nombre de population radioactive	X		Le nombre de population radioactive est de symbole $N(t)$
Relevé des valeurs et élaboration d'un modèle tabulaire		X		Les élèves ont dressé différentes formes du tableau de valeurs qu'ils remplissent à partir de l'interface
Mise en évidence du phénomène de la décroissance radioactive		X		Il y a décroissance radioactive car les valeurs de $N(t)$ diminuent
élaboration d'un modèle mental de la loi de décroissance radioactive		X		Les élèves proposent sans hésitation, des valeurs même après que le professeur ait arrêté volontairement la simulation
Elaboration d'un modèle graphique		X		En groupe d'élèves, la courbe de $N(t)$ a été représentée par des droites
Elaboration d'un modèle analytique		X		Presque tous les élèves ont proposé des fonctions affines comme modèles analytiques de $N(t)$
Respect de la dimensionnalité			X	Sans être minutieux vis-à-vis de la dimensionnalité, les élèves en groupe, explicitent des modèles analytiques faux, sauf un groupe
Mise en évidence de la proportionnalité			X	Au cours de toutes les activités, aucun élève n'a évoqué la proportionnalité

Tableau 21 : résultats de l'étude qualitative du pré-test 1

**Remarque :**

- un élève de la branche SVT s'est abstenu d'émettre des prévisions, sous réserve que : «citation : "les sciences physiques ont un caractère purement empirique"».

Les statistiques relatives au pré-test 1 sont dans le tableau suivant :

Eléments d'analyse des réponses	Branche	Pourcentage de travaux acceptables			
		individuels		en intergroupes aux membres tournants	
Productions de courbes en forme de fonctions affines	PC	85,7%	81,2%	100%	100%
	SVT	77,7%		100%	
Propositions pour $t \leq 8s$ de l'expression de $N(t)$	PC	57,1%	37,5%	88,8%	71,4%
	SVT	22,2%		58,3%	

Tableau 22: résultats de l'étude quantitative du pré-test 1

En guise de modèles analytiques, les intergroupes d'élèves ont fini par proposer des formes d'expressions mathématiques de fonctions affines sur la base des modèles graphiques qu'ils ont, avec plus de facilité qu'ailleurs, préétabli et reconnu comme telles. Cependant, une non maîtrise de contenus mathématiques est affichée, lors du passage de la forme mathématique  $y=ax+b$ , spontanément exprimée par les élèves, vers son application dans le contexte physique. Ceci est observé, aussi bien au niveau de la transposition de  $x$  et  $y$  vers les grandeurs physiques variables étudiées  $t$  et  $N(t)$ , qu'au niveau de la détermination des valeurs et dimensions des constantes  $a$  et  $b$ . Seules quatre élèves de la branche PC du lycée Ibn ROUMI, ont dégagé une expression correcte comportant une constante "a". Ils ont aussi précisé la dimension de cette constante, à côté de l'expression demandée, par :

$$N(t) = N_0 - at, \text{ avec l'unité de la constante } a \text{ est } [a] = s^{-1} \quad (\text{éq.29})$$

En travail collaboratif, la satisfaction des élèves a été grandissante, du moment qu'ils ont vu s'enrichir leurs contributions aux différentes modélisations de la décroissance radioactive selon différents registres : tabulaire, graphique et analytique. En effet, pendant l'exploitation des huit premières secondes de la ressource TICE SimulP200, la réussite des élèves relative à la prédiction des valeurs tabulaires a été à 100%. Ils ont ensuite établi des graphiques correspondants à ceux d'une fonction affine décroissante, avec une performance passant de 81,25% à 100%

entre travail individuel à celui d'intergroupes aux membres tournants (voir Annexe 5, exemple 1, p 158). De même, leurs propositions réussies pour le registre analytique ont évolué de 37,5% à 71,43%.

### 3. Post-test 1

#### 3.1 Organisation

Avec le retour de chaque élève au groupe de départ, nous avons fait passer les quatre élèves de la branche PC du lycée IBN ROUMI Meknès, par quatre configurations de duos tournants (4x2 duos). De même, nous avons fait passer les neuf élèves de la branche SVT du lycée Mohamed AJANA Meknès, par quatre configurations de trios tournants (4x3 trios). Alors que pour les trois élèves de la branche PC du même lycée Mohamed AJANA Meknès, l'organisation des activités est une alternance entre le travail individuel et le travail collaboratif dans un seul trio (1x1 trio).

Dans des conditions pouvant être qualifiées, désormais, d'habituelles (comme celles du pré-test 1), le but est d'opérer une deuxième initiation à la modélisation, devant aboutir à la production d'un modèle analytique de la décroissance radioactive, pour les temps  $t=nt_{1/2}$ .

En intergroupes aux membres tournants, les seize élèves sont représentés par vingt-et-une configurations (un triplet et huit doublets formés par les élèves de branche PC, et douze triplets formés par ceux de branche SVT)

#### 3.2 Enoncé

Rappelons qu'au départ, nous avons énoncé qu'un échantillon du radioélément  $^{200}\text{Po}$  isolé, rayonne et disparaît au bout d'un moment court ( $^{200}\text{Po}$  est de demi-vie :  $t_{1/2} \approx 690\text{s}$ ). Dans le contexte de la simulation présentée et de nos consignes, déduire une expression analytique pour  $N(nt_{1/2})$ . Pour ce faire, prévoir d'abord les valeurs du tableau 4 que nous vous fournissons ci-dessous. Après la validation de ces valeurs à l'aide de la visualisation d'une autre partie de la simulation SimulP200 que nous vous proposons, compléter aussi le tableau 5 que nous vous fournissons après que vous aillez accomplis le travail sur le tableau 4:



L'entier naturel "n" figurant sur les tableaux ci-dessous et toutes expressions par la suite, est celui que nous appelons "ordre de décroissance radioactive".

n	0	1	2	3	4
t(nt <sub>1/2</sub> )	0	t <sub>1/2</sub>	2t <sub>1/2</sub>	3t <sub>1/2</sub>	4t <sub>1/2</sub>
N(nt <sub>1/2</sub> )	1000				

**Tableau 23 :** tableau à dresser sur l'évolution du nombre d'une population initiale de 1000 noyaux de <sup>200</sup>Po pour les cinq premiers ordres de décroissance radioactive (n≤4)

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8
t(nt <sub>1/2</sub> )	0	t <sub>1/2</sub>	2t <sub>1/2</sub>	3t <sub>1/2</sub>	4t <sub>1/2</sub>				
N(nt <sub>1/2</sub> )	1000								

**Tableau 24 :** tableau à dresser sur l'évolution du nombre d'une population initiale de 1000 noyaux de <sup>200</sup>Po pour les neuf premiers ordres de décroissance radioactive (n≤8)

### 3.3 Réponses attendues et résultats

La visualisation de la troisième partie de la simulation par les élèves, leur permet de confirmer ou d'infirmer leurs prévisions. Un tableau est dressé. Il est de la forme :

n	0	1	2	3	4
t(nt <sub>1/2</sub> )	0	t <sub>1/2</sub>	2t <sub>1/2</sub>	3t <sub>1/2</sub>	4t <sub>1/2</sub>
N(nt <sub>1/2</sub> )	1000	501	251	126	63

**Tableau 25:** tableau dressé de l'évolution du nombre d'une population initiale de 1000 noyaux de <sup>200</sup>Po pour les cinq premiers ordres de décroissance radioactive (n≤4)

De même, après la visualisation de la quatrième partie de la simulation, un tableau relatif à l'évolution de N(t) est dressé par les élèves. Il est comme ci-dessous :

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8
t(nt <sub>1/2</sub> )	0	t <sub>1/2</sub>	2t <sub>1/2</sub>	3t <sub>1/2</sub>	4t <sub>1/2</sub>	5t <sub>1/2</sub>	6t <sub>1/2</sub>	7t <sub>1/2</sub>	8t <sub>1/2</sub>
N(nt <sub>1/2</sub> )	1000	501	251	126	63	31	15	7	4

**Tableau 26:** tableau dressé de l'évolution du nombre d'une population initiale de 1000 noyaux de <sup>200</sup>Po pour les neuf premiers ordres de décroissance radioactive (n≤8)

L'expression finale de N(nt<sub>1/2</sub>) produite finalement par les élèves à partir de leurs observations, est de la forme :

$$N\left(nt_{\frac{1}{2}}\right) = \frac{N_0}{2^n} \text{ avec } n \in \text{IN} \quad (\text{éq.30})$$

### 3.4 Grille d'analyse

Le post-test 1 a permis de dégager les deux grilles d'analyse ci-dessous. Pour le tableau 23, les prévisions des élèves ont été faites, pour la première fois, au-delà des huit premières secondes de la diffusion de SimulP200. Alors, après la diffusion de cette ressource TICE jusqu'à  $t = 4t_{1/2}$ , nous avons demandé aux élèves d'émettre leurs prévisions relatives au tableau 24.

Eléments d'analyse des réponses	Pourcentages en travaux individuels			
	Branche	Vrai	faux	total
Prévision des valeurs du tableau 23	PC	0%	100%	100%
	SVT	0%	88,9%	100% dont une abstention
Prévision des valeurs du tableau 24	PC	100%	0%	100%
	SVT	88,9%	0%	100% dont une abstention
Proposition d'expressions de $N(nt_{1/2})$ acceptables	PC	100%	0%	100%
	SVT	100%	0%	100%

Tableau 27 : résultats des travaux individuels des élèves

Eléments d'analyse des réponses	Pourcentages en intergroupes tournants			
	Branche	Vrai	Faux	total
Prévision des valeurs du tableau 23	PC	0%	100%	100%
	SVT	0%	100%	100%
Prévision des valeurs du tableau 24	PC	100%	0%	100%
	SVT	100%	0%	100%
Proposition d'expressions acceptables pour $N(nt_{1/2})$	PC	100%	0%	100%
	SVT	100%	0%	100%

Tableau 28 : résultats des travaux des élèves en intergroupes aux membres tournants

Après ne s'être trompés que sur les prévisions des valeurs de  $n=1$  et de  $n=2$ , les élèves se sont aperçus que la décroissance radioactive n'est pas linéaire. Ceci s'est vérifié par 100% de réussite pour  $n \geq 3$ , et aussi lors de l'établissement de l'expression analytique pour le cas général  $N(nt_{1/2})$ , comme l'atteste l'exemple 2 dans l'annexe 5, p 159. Il a été l'occasion de l'introduction du paramètre "n" que nous avons appelé "ordre de décroissance radioactive". Ces résultats sont dus à la mobilisation de notre ressource TICE, en l'occurrence, SimulP200 le damier de la simulation de la décroissance radioactive du  $^{200}\text{Po}$ . Cette ressource TICE a servi, en partie, à l'atténuation des difficultés de l'expérimentation et des modélisations. Ce constat atteste qu'une bonne partie des difficultés de l'enseignement et de l'apprentissage des sciences physiques est imputable aux difficultés que les élèves rencontrent

devant la non maîtrise des contenus mathématiques auxquels font appel ces notions de sciences physiques.

#### 4. Conclusion

Dans le contexte de l'analyse a priori, les résultats du pré-test 1 et de son post-test montrent que les élèves ne réalisent pas que la simulation du phénomène de décroissance radioactive est aussi un modèle. Mais, lors du relevé des mesures, ils arrivent à passer d'un signifiant à l'autre du registre sémiotique présenté par l'interface de la simulation. Du coup, ils concluent sur la manifestation du phénomène de la décroissance radioactive.

Par ailleurs, le travail collaboratif augmente considérablement l'apprentissage des élèves, en l'occurrence, le concept de modèles de la décroissance radioactive. Cette performance s'est manifestée aussi chez les élèves, sous forme de propositions d'expressions mathématiques de fonctions affines, dont la réussite est de 37,5% pour les travaux individuels, et de 71,43% pour les travaux en intergroupes aux membres tournants.

### III. Etude d'expérimentation relative au modèle de linéarisation par intervalle "ModLI" de la loi de la décroissance radioactive

#### 1. Test 2 (1<sup>ère</sup> partie)

##### 1.1 Enoncé

Sur la base du modèle tabulaire de  $N(nt_{1/2})$ , nous voulons déduire le modèle graphique de  $N(t)$ , duquel, nous extrayons un modèle analytique. Nous vous proposons de vous conformer aux consignes suivantes :

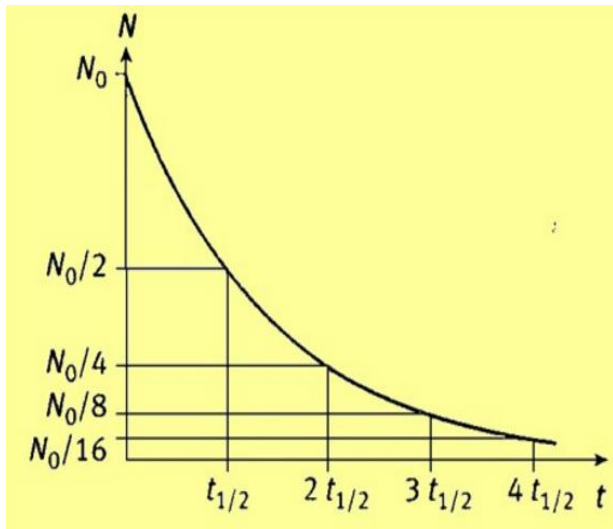
1<sup>ère</sup> consigne : tracer un repère orthonormé, dont les abscisses sont les temps  $t=nt_{\frac{1}{2}}$

avec  $n \in \mathbb{N}$ , et les coordonnées sont les populations correspondantes.

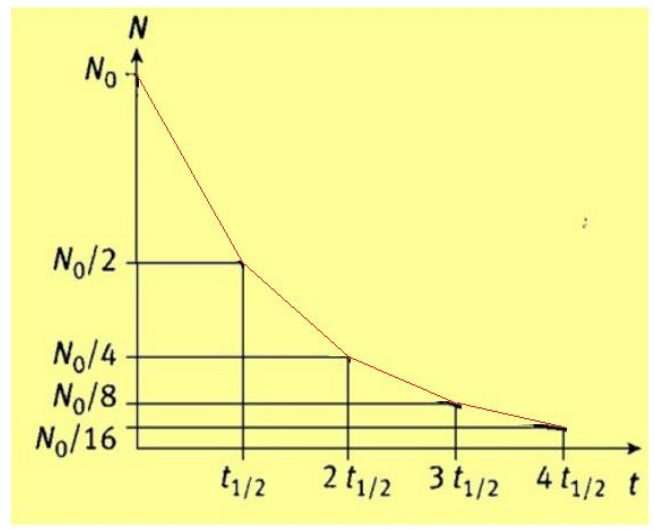
2<sup>ème</sup> consigne : proposer des formes pour le graphe de  $N(t)$ , des courbes qui vous paraissent raisonnables.

## 1.2 Réponses attendues

Les réponses attendues sont l'un et/ou l'autre des deux graphes ci-dessous, Graphe 3.a et Graphe 3.b.



Graphe 3.a



Graphe 3.b

## 1.3 Résultats et discussion

Les élèves ont proposé deux formes de graphes de  $N(t)$ , le Graphe 3.a et le Graphe 3.b (voir Annexe 5, exemple 3, p 159). Les statistiques correspondantes sont dans le tableau ci-dessous.

Éléments d'analyse	Branche	Taux de travaux acceptables			
		en individuel		en intergroupes aux membres tournants	
Tracés d'un repère	PC	100%=7/7	100%=16/16	100%=9/9	100%=21/21
	SVT	100%=9/9		100%=12/12	
Productions similaire à la courbe du graphe 3.a	PC	85,7%=6/7	75%=12/16	100%=9/9	95,2%=20/21
	SVT	66,7%=6/9		91,7%=11/12	
Productions similaire à la courbe du graphe 3.b	PC	85,7%=6/7	81,2%=13/16	100%=9/9	100%=21/21
	SVT	77,8%=7/9		100%=12/12	

Tableau 29 : résultats du test 2 (1<sup>ère</sup> partie)

En configuration d'intergroupes tournant, les élèves ont confirmé leur capacité à tracer la courbe  $N(t)$  (graphe 3.b), par une succession de fonctions affines. C'est en effet, la première prémisse sur la voie de l'élaboration du ModLI. Les élèves de la branche SVT, talonnent ceux de la branche PC, toutes formes de travaux confondues. Alors que tous les élèves ont connu une réussite à 100% lors de leurs productions de repères, puisqu'ils mobilisent des contenus qu'ils utilisent fréquemment.

## 2. Test 2 (2<sup>ème</sup> partie)

### 2.1 Énoncé

Nous voulons établir le modèle analytique général, de la population radioactive  $N(t)$ , et établir celui du temps  $t$  en fonction de la population radioactive. Pour chacune des consignes, nous vous demandons de travailler en individuel, puis en intergroupes aux membres tournants.

1<sup>ère</sup> consigne : établir l'expression de  $N(t)$  relative au graphe 3.a.

2<sup>ème</sup> consigne : établir les expressions de  $N(t)$  relatives aux trois premiers intervalles de temps du graphe 3.b.

3<sup>ème</sup> consigne : déduire une forme générale d'intervalles de temps ainsi que le modèle analytique général de  $N(t)$  relatifs au graphe 3.b.

4<sup>ème</sup> consigne : établir l'expression générale du temps relative au graphe 3.b.

### 2.2 Réponses attendues

Les réponses attendues sont les suivantes :

- L'expression de  $N(t)$  relative au Graphe 3.a est :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{éq.31})$$

- Relativement au Graphe 3.b, les expressions de  $N(t)$  pour les trois premiers intervalles de temps ainsi que dans le cas général, sont:

Pour  $t \in [0; \frac{t_1}{2}]$  alors :

$$N(t) = \frac{N_0}{2} \left[ 2 - \frac{t}{\frac{t_1}{2}} \right] \quad \text{ou bien} \quad N(t) = \frac{N_0}{2^1} \left[ (1 + 1) - \frac{t}{\frac{t_1}{2}} \right] \quad (\text{éq.32})$$

Pour  $t \in ]\frac{t_1}{2}; 2\frac{t_1}{2}]$  alors :

$$N(t) = \frac{N_0}{4} \left[ 3 - \frac{t}{\frac{t_1}{2}} \right] \quad \text{ou bien} \quad N(t) = \frac{N_0}{2^2} \left[ (2 + 1) - \frac{t}{\frac{t_1}{2}} \right] \quad (\text{éq.33})$$

Pour  $t \in ]2\frac{t_1}{2}; 3\frac{t_1}{2}]$  alors :

$$N(t) = \frac{N_0}{8} \left[ 4 - \frac{t}{\frac{t_1}{2}} \right] \quad \text{ou bien} \quad N(t) = \frac{N_0}{2^3} \left[ (3 + 1) - \frac{t}{\frac{t_1}{2}} \right] \quad (\text{éq.34})$$

Pour  $t \in [(n-1)\frac{t_1}{2}; n\frac{t_1}{2}]$  alors :

$$N(t) = \frac{N_0}{2} \left[ 2 - \frac{t}{\frac{t_1}{2}} \right] \quad \text{ou bien} \quad N(t) = \frac{N_0}{2^n} \left[ (n + 1) - \frac{t}{\frac{t_1}{2}} \right] \quad (\text{éq.35})$$

- L'expression générale du temps relative au graphe 3.b est :

$$t = t_{\frac{1}{2}} \left[ (n + 1) - 2^n \frac{N(t)}{N_0} \right] \quad (\text{éq.36})$$

## 2.3 Résultats et discussion

Les résultats de l'analyse des transcriptions sont résumés dans la grille suivante :

Éléments d'analyse des réponses	branche	Taux de travaux acceptables			
		individuels		en intergroupes à membres tournants	
établissement de l'expression de N(t) relative au graphe 3.a	PC	0%=0/7	0%	0%=0/9	0%
	SVT	0%=0/9	= 0/16	0%=0/12	= 0/21
établissement des trois premières expressions de N(t) relatives au graphe 3.b	PC	57,1%=4/7	37,5%	88,9%=8/9	71,4%
	SVT	22,2%=2/9	= 6/16	58,3%=7/12	= 15/21
établissement d'un modèle analytique général de N(t) du graphe 3.b	PC	42,9%=3/7	31,2%	100%=9/9	95,2%
	SVT	22,2%=2/9	= 5/16	91,7%=11/12	= 20/21
déduction d'une forme générale d'intervalles de temps du graphe 3.b	PC	71,4%=5/7	50%	100%=9/9	90,4%
	SVT	33,3%=3/9	= 8/16	83,3%=10/12	= 19/21
établissement d'un modèle analytique général du temps t du graphe 3.b	PC	85,7%=6/7	75%	100%=9/9	100%
	SVT	66,7%=6/9	= 12/16	100%=12/12	= 21/21

Tableau 30 : résultats du test 2 (2<sup>ème</sup> partie)

Le modèle analytique de la décroissance radioactive, comme il est officiellement recommandé (la loi exponentielle), fait figure d'obstacle épistémologique, à l'opposé du ModLI que nous proposons. En effet, aucun mode de travail des élèves, en individuel ou en intergroupes à membres tournants, n'a abouti à une élaboration acceptable et méthodique d'un modèle analytique de N(t) à partir de la courbe de graphe 3.a, un contenu mathématique inconnu. Alors que lorsque les élèves sont dans une situation où il y a une mise en liaison entre la courbe de graphe 3.b, et l'établissement du modèle analytique de N(t), l'enseignement et l'apprentissage sont débloqués, grâce à la mobilisation d'un contenu mathématique semblable aux contenus que les élèves utilisent fréquemment.

## 3. Conclusion

La comparaison des grilles d'analyses statistiques du test 2, mène à conclure à une amélioration très significative dans le processus d'élaboration de modèles

analytiques par les élèves. En effet, sur la base de contenus mathématiques connus par les élèves, le passage entre cadre de rationalité physique et cadre de rationalité mathématiques (Malafosse et al., 2001) s'opère avec beaucoup plus de réussites, aboutissant à l'élaboration du ModLI. Par ailleurs, le travail collaboratif a augmenté les performances des élèves dans l'établissement de l'expression relative au nombre de population radioactive  $N(t)$ . Elle est passée de 0% à [...] à 31.2% et à 95.2% (Exemples 4, Annexe 5, p 160). Alors que pour l'établissement de l'expression analytique générale du temps  $t$ , elle est passée de 0% à [...] à 75% et à 100% (Exemples 5, Annexe 5, p 160).

Donc, en termes de comparaison, d'une part, dans le contexte des recommandations officielles que nous notons par ModLe<sup>t</sup> (l'utilisation de la loi exponentielle), les élèves se bloquent définitivement une fois lorsqu'ils atteignent la phase mathématique de l'introduction des modèles analytiques de la décroissance radioactive, à savoir : les équations différentielles et leurs solutions ; les fonctions logarithme et exponentielle et les différentes manipulations qui les régissent. Alors qu'en situation d'enseignement-apprentissage du ModLI que nous proposons, les élèves enchaînent des activités, méthodiquement justes, sur le chemin du processus de la construction des modèles mathématiques. Par ailleurs, le travail collaboratif entre élèves, augmente considérablement la réussite de leurs apprentissages.

Ainsi, en écartant les difficultés inhérentes des contenus mathématiques et de leur maîtrise, l'enseignement-apprentissage, en physique, du phénomène de la décroissance radioactive, devient l'occasion de renforcer les compétences des élèves en matière du savoir faire, au cours des différentes étapes du processus de la modélisation.

Dans les manuels scolaires des sciences physiques, ainsi que sur les instructions officielles adressées aux professeurs, la leçon de la loi de la décroissance radioactive se base sur sa forme mathématique connue ( $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ ) où la fonction exponentielle est introduite indépendamment qu'elle soit enseignée aux élèves en cours de mathématiques. Ceci nous a conduits à l'élaboration du ModLI. C'est dans cette perspective que l'élaboration d'un deuxième modèle s'inscrit, en l'occurrence ModL2<sup>t</sup>. Aussi l'élaboration et l'expérimentation de ce deuxième modèle est un outil

que nous utilisons dans la vérification du bien fondé de nos hypothèses de ce travail de recherche. Surtout, celui relatif à la mobilisation des mathématiques dans des registres sémiotique et sémantique enseignés et appris par les élèves.

#### IV. Etude d'expérimentation relative au modèle de la loi de la décroissance radioactive en puissance à base 2 du temps "ModL2"

##### 1. Modalités d'intervention

Nous avons demandé aux élèves de travailler en individuelle seulement. En s'adressant à tout le groupe de travail, le professeur a présenté le ModL2 (le modèle des puissances à base 2 du temps), en donnant l'expression de  $N(t)$  de l'évolution d'une population radioactive, comme étant un autre modèle analytique qui décrit exactement la décroissance radioactive, par :

$$N(t) = N_0 2^{-\frac{t}{t_{1/2}}} \quad (\text{éq.37})$$

Ou encore :

$$N(t) = N_0 2^{-\frac{\lambda t}{0,69}} \quad (\text{éq.38})$$

Avec :  $t_{1/2}$  la demi-vie du radioélément et  $\lambda$  sa constante de radioactivité.

##### 2. Pré-test 3

###### 2.1. Énoncé

Dés le collège et jusque là, vous vous êtes développés dans le calcul des puissances. En guise de stimuli de vos compétences sur ce thème mathématique, nous vous demandons de vous conformer aux consignes suivantes :

1ère consigne : que chaque élève travaille seul.

2ème consigne : soit  $a, b, p, q, x, y \in \mathbb{R}$ . Ecrire autrement  $a^p \times a^q$  et  $(b^x)^y$ .

3ème consigne : soit  $x$  l'inconnu tel que  $a \in \mathbb{R}^{+*}$  et  $x, y \in \mathbb{R}$ . Résoudre :  $a^x = a^y$ .

###### 2.2. Réponses attendues

Les réponses attendues se déclinent comme ci-dessous.

- soit  $a, b, p, q, x, y \in \mathbb{R}$ , alors :

$$a^p \times a^q = a^{(p+q)} \quad \text{et} \quad (b^x)^y = b^{(x \cdot y)} \quad (\text{éq.39})$$

- soit  $a \in \mathbb{R}^{+*}$  et  $x, y \in \mathbb{R}$ , alors :

$$\text{Si } a^x = a^y \text{ alors } x=y \quad (\text{éq.40})$$



### 2.3. Résultats et discussion

Pour la 2ème consigne, tous les élèves, toutes branches confondues, ont produit convenablement des réponses justes. Alors que pour la 3ème consigne, tous les élèves de la branche PC (7/7) ont donné la solution escomptée. Alors que pour les élèves de la branche SVT, seulement quatre élèves sur 9 ont trouvé la solution demandée.

Les réponses des élèves montrent que ces derniers possèdent des compétences significatives en matière de maîtrise du calcul des puissances. Sur l'ensemble, leur réussite a atteint une moyenne de 84,38%. En effet, les élèves ont rendu des réponses justes allant de 44,44% à 100% par item. Alors qu'en terme de comparaison entre les deux branches, tous items confondus, 100% de réponses justes est à attribuer aux élèves de la branche PC (Exemples 6, Annexe 5, p 160), et 68,75% pour les élèves de la branche SVT. Ce constat montre que les élèves de la branche SVT, par rapport à ceux de la branche PC, réussissent moins bien les développements mathématiquement.

## 3. Post-test 3

### 3.1 Énoncé

En partant du ModL2t ( $N(t) = N_0 2^{-\frac{t}{t_{1/2}}}$ ) que nous vous avons déjà présenté, nous voulons établir le modèle analytique du temps t.

Donc, sachant que  $\forall N(t)$  et  $N_0 \in \mathbb{R}$ ,  $\exists r(t)$  et  $r_0 \in \mathbb{R}$  tel que :

$$N(t) = 2^{r(t)} \text{ et } N_0 = 2^{r_0}$$

Nous vous demandons de vous conformer aux consignes suivantes :

1ère consigne : de même, chaque élève travaille seul.

2ème consigne : réécrire  $N(t)$  en utilisant les données énoncées ci-dessus.

3ème consigne : établir l'expression du temps t.

### 3.2 Réponses attendues

Pour la réécriture de  $N(t)$  le nombre de la population radioactive selon le registre des puissances à base 2 du temps, les réponses attendues sont :

$$N(t) = 2^{(r_0 - \frac{t}{t_{1/2}})} \text{ ou bien } N(t) = 2^{r_0} * 2^{-\frac{t}{t_{1/2}}} \quad (\text{éq.41})$$

Pour l'établissement de l'expression du temps  $t$  à partir du  $\text{ModL2}^t$ , la réponse attendue est :

$$t = t_{1/2} (r_0 - r) \quad (\text{éq.42})$$

### 3.3 Résultats et discussion

Relativement à la 2ème consigne, tous les élèves ( $100\%=(7+9)/(7+9)$ ) sans exception, ont réécrit justement la partie du  $\text{ModL2}^t$  se rapportant à l'expression analytique de  $N(t)$ , en utilisant les puissances à base 2 du temps.

Relativement à la 3ème consigne, tous les élèves de la branche PC ( $100\%=7/7$ ) ont produit normalement le modèle analytique du temps. Alors que pour les élèves de la branche SVT, sept élèves sur neuf ( $77,78\%=7/9$ ), l'ont établi correctement.

Lors de la présentation de la première partie du  $\text{ModL2}^t$  par l'enseignant, ou lors de la mise en place, par les élèves, de sa deuxième partie, la satisfaction s'est accrue, expliquant la croissance du succès qui a atteint une moyenne de 93,75% ( $93,75\%=(7+9+7+7)/(7+9+7+9)$ ), comme l'atteste l'exemples 7, Annexe 5, p 161. Ceci nous mène à conclure que l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive par le biais du  $\text{ModL2}^t$  est un gage de réussite devant le modèle proposé officiellement ( $\text{ModLe}^t$ ). En effet, avec  $\text{ModL2}^t$ , les difficultés liées aux mathématiques ont été écartées, et du coup, la classe a traité les objets d'enseignement dans des registres et dans des cadres des contenus qu'elle utilise fréquemment.

## 4. Conclusion

Du fait qu'avec  $\text{ModL2}^t$ , le succès de l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive a atteint une moyenne de 93,75%, nous pouvons donc conclure que lors du développement de modèles en sciences physiques, le succès de tout enseignement-apprentissage avec des élèves, au niveau secondaire, exige que l'objet de leurs concentrations doit être focalisé sur le processus de modélisation et de ses contraintes expérimentales et conceptuelles, en l'occurrence, ceux du facteur spécifique «espace de réalité» (Malafosse et al., 2000). De même, la concentration des élèves ne doit pas être dispersée face à des facteurs qualifiés d'obstacles

épistémologiques (Brousseau, 1989), en l'occurrence, les registres mathématiques et leur cadre de rationalité non encore traité au cours du cours mathématique.

## V. Conclusion

L'étude que nous avons menée montre que lors de la diffusion des huit premières secondes de SimulP200, les activités ont débouché sur l'élaboration de modèles graphiques, que les élèves ont produit avec une performance allant de 81,2% de réussite en travaux individuels, à 100% en travail collaboratif dans des groupes à membres tournants. Alors, que lors de l'établissement des modèles analytiques, la réussite des élèves a baissé de presque 40% et 30%, respectivement, entre travaux individuels et travail collaboratif (MAMANE & BENJELLOUN, 2018a).

Aussi, lors de l'élaboration du modèle de  $N(nt_{1/2})$ , le nombre de la population radioactive restante pour les temps  $t=nt_{1/2}$  où  $n$  est un entier naturel, a été l'occasion de l'observation d'un regain conséquent dans les performances des élèves, tous formes de travaux confondues. La réussite à produire le modèle mathématique attendu, a connu un rebond très significatif de 0% à 88,9%, puis à 100%, tous types de travaux confondus (MAMANE & BENJELLOUN, 2018c).

Pour de l'élaboration du ModLI, les réussites dans les productions attendues des graphes, ont passé de 75% à 100%, entre travaux individuels et travail collaboratif en intergroupes à membres tournants. Les élèves se sont totalement bloqués lorsque nous leurs avons demandé de proposer un modèle mathématique à partir du graphe de la décroissance radioactive officiellement programmé (graphe 3.a). Cependant, une réussite des élèves de 31,25% à 100% est observée lors de leurs modélisations mathématiques, à partir du graphe (graphe 3.b) qu'ils ont produit pour ModLI.

En fin, lors de l'expérimentation du ModL2<sup>t</sup>, la satisfaction des élèves s'est accrue, expliquant la croissance de leurs succès. Elle a atteint une moyenne de 93,75% (MAMANE & BENJELLOUN, 2018d).

## D// CONCLUSION

Les deux études d'expérimentations que nous avons menées, ont porté sur deux nouveaux modèles de la loi de la décroissance radioactive, que nous avons élaborés et nommé ModLI et ModL2<sup>t</sup> (le Modèle de Linéarisation par Intervalle et le Modèle des puissances à base 2 du temps).

Dans notre démarche méthodologique spécifique à ce cinquième chapitre, les expérimentations ont été conduites selon l'ingénierie didactique au sens de M.ARTIGUE (Artigue, 1989), où il y a une prégnance du paradigme de l'étude de cas, dont la validation est essentiellement interne, fondée sur la notion d'analyse a priori. En effet, cette étude prend en compte les préférences prononcées des élèves, lors de l'étude exploratoire, sur la mobilisation des ressources TICE. L'implication des élèves a été systématique et opérationnelle, dans toutes les étapes de l'élaboration des deux modèles. Nous avons organisé le travail sous forme d'alternance entre productions individuelles, travail collaboratif en groupes à membres tournants, et diffusions de séquences de ressources TICE. Exclusivement pour cette étude, nous avons conçu la ressource TICE que nous avons appelée **SimulP200** (damier de **Simulation** de la décroissance radioactive du **Polonium 200**).

Ainsi, les premières activités de l'élaboration de modèles graphiques, ont connu une performance de 81,2% de réussite auprès des élèves en travaux individuels. Et 100% de réussite en travail collaboratif dans des groupes d'élèves à membres tournants. Alors, que la réussite dans l'étape de l'établissement des modèles analytiques correspondants, a connu une baisse de presque 40% et 30%, respectivement, entre travaux individuels et travail collaboratif (MAMANE & BENJELLOUN, 2018a).

Les deuxième activités de l'élaboration de modèles analytiques pour le cas restreint de  $N(nt_{1/2})$ , ont connu une performance très significative. Elle a rebondi de 0% à 88,9%, puis à 100%, tous types de travaux confondus (MAMANE & BENJELLOUN, 2018c).

Durant les activités relatives à ModLI et à ModL2<sup>t</sup>, l'échec généralisé connu sous ModLe<sup>t</sup> n'est plus perceptible. C'est pourquoi, lors de l'élaboration du ModLI,

les réussites dans les productions de son modèle graphique, sont passées de 75% à 100%, entre travaux individuels et travail collaboratif en intergroupes à membres tournants (MAMANE & BENJELLOUN, 2019). Et de même, lors de l'expérimentation du ModL2<sup>t</sup>, la croissance du succès a atteint une moyenne de 93,75% (MAMANE & BENJELLOUN, 2018d).

Chez les élèves, ces deux modèles mobilisent des registres sémiotiques et sémantiques dans des cadres de physique et mathématique connus et bien maîtrisés. Alors que l'enseignement de la décroissance radioactive, comme il est introduit suivant les instructions officielles, repose sur des registres et sur des cadres mathématiques inconnus jusque-là par les élèves, expliquant ainsi, les difficultés relevées lors de l'enseignement-apprentissage de ce phénomène. Les élèves ont doublement renforcé leurs confiances en eux, par les issues du débat scientifique et par la contagion de se voir recréer les contextes de production du savoir. Par le biais du ModL1 et du ModL2<sup>t</sup>, les élèves ont acquis deux nouveaux outils pour décrire le phénomène de la décroissance radioactive. L'asynchronisme vérifié entre les programmations officielles des leçons en sciences physiques et en mathématiques, et le travail collaboratif permettant l'interactivité des élèves entre eux et avec les contenus scientifiques des deux disciplines, sur le phénomène de la décroissance radioactive, ont créé des conditions convenables d'asseoir une conscience élevée sur la relation de constitution de ces deux disciplines. En fait, les élèves ont été très satisfaits par nos modèles de la décroissance radioactive, à savoir le ModL1 et le ModL2<sup>t</sup>, comme étant deux outils pour décrire le phénomène (MAMANE & BENJELLOUN, 2018a), (MAMANE & BENJELLOUN, 2018c) et (MAMANE & BENJELLOUN, 2018d).

Nous pouvons donc conclure que l'enseignement-apprentissage de la loi de la décroissance radioactive, a été considérablement amélioré, sous nos deux modèles, le ModL1 et le ModL2<sup>t</sup>. Une étude de validation est raisonnablement requise pour nos deux modèles. Elle sera l'objet du dernier chapitre de ce travail de thèse.

**SIXIEME CHAPITRE : ETUDES DE VALIDATION DU ModLI ET DU  
ModL2<sup>t</sup>**

## A// INTRODUCTION

M.Blanchin (Blanchin, 2010) affirme que : *“Le but de la validation d'une méthode d'analyse est de démontrer qu'elle correspond à l'usage pour lequel elle est prévue. [...] la validation est l'ensemble des opérations nécessaires pour prouver que le protocole est suffisamment exact et fiable pour avoir confiance dans les résultats fournis et ceci pour un usage déterminé”*. Donc, afin d'affiner la cohérence scientifique de l'édifice de cette thèse, nous consacrerons ce sixième chapitre aux études de validation de nos deux modèles, le **Modèle de Linéarisation par Intervalle (ModLI)** et le **Modèle de la Loi en puissances à base 2 du temps (ModL2<sup>t</sup>)**.

Alors, toute disposition prise, nous commençons les études de validation par un passage en revue des modèles existants de la décroissance radioactive. Elle sera suivie par des tests se rapportant à la modélisation mathématique de la dite loi, pour un cas particulier où le temps est définie par  $t = nt_{1/2}$  et où  $n$  est un entier naturel. Nous enchainons par administration des tests de validation du modèle ModLI. Et nous terminerons par ceux relatifs à la validation du ModL2<sup>t</sup>. Nous adjoindrons à l'administration de chaque test ses résultats, analyses, discussions et conclusions.

## B// ORGANISATION

Nous proposons de mener les tests des études de validation dans des situations de classes entières du baccalauréat marocain, des branches SVT et PC. Nous pouvons choisir ces classes de telle sorte qu'aucun des élèves des groupes de travail des études exploratoire et d'expérimentations, n'y participe. Pour parvenir à une telle organisation, nous avons sollicité le concours de l'administration du lycée Mohamed AJANA Meknès. Elle a mis à notre disposition deux classes entières de la deuxième année du baccalauréat, de l'année scolaire qui a suivi celle de nos études exploratoire et d'expérimentations. Une classe de 38 élèves de la branche PC, et une autre classe de 37 élèves de la branche SVT. Dans leurs classes respectives des sciences physiques, ces élèves ont déjà fini les cours officiellement programmés, sur le phénomène de la décroissance radioactive et l'établissement de sa loi.

Après que l'administration du lycée Mohamed Ajana ait présenté le doctorant chercheur aux élèves leur assignant que le déroulement des tests sera filmé avec toutes les autorisations requises. Ce dernier a présenté aux élèves, le professeur l'assistant au cours de l'administration des tests de validations. Il a aussi précisé les directives à suivre et les restrictions qui cadrent le déroulement de cette étape de la recherche scientifique. Cette mise en situation a duré le temps nécessaire, pour expliquer le rôle incontournable des élèves dans la réussite de cette phase de la recherche scientifique. La consigne a stipulé que les élèves veillent se restreindre rigoureusement au travail individuel. Et dans le cas échéant, l'interaction de l'élève ne peut se manifester qu'à très basse voix seulement, et exclusivement avec l'un des deux professeurs responsables de l'administration des tests. Dès lors, le travail a été réparti sur quatre étapes se composant de quatorze séquences. Le chercheur professeur de cette classe, s'est chargé de la partie logistique concernant la mobilisation des TICE. La première étape a été consacrée au survol des modèles déjà existant de la loi de décroissance radioactive. La deuxième étape a été dédiée au prélude de l'analyse a priori. La troisième étape a servi à l'activité de l'expérimentation du ModLI par l'administration de son pré-test et de son post-test. Et en fin, la quatrième étape a été consacrée à l'activité de présentation du ModL2<sup>t</sup> et de l'administration de son pré-test et de son post-test.

## **C// EXPERIMENTATION RESULTATS ET DISCUSSION**

Il s'agit d'une démarche guidée par une analyse a priori sur la capacité des élèves à accomplir le processus de modélisation mathématique, et à produire un modèle analytique acceptable.

### **I. Première étape : passage en revue des modèles existants de la décroissance radioactive**

La première étape de notre étude de validation s'est focalisée sur les activités de la présentation des modèles existants de la loi de décroissance radioactive, par :



- 1<sup>ère</sup> séquence : ModNat le concept du modèle naturel de la décroissance radioactivité

Pour introduire le concept de ModNat, nous avons commencé par la projection de l'illustration 1 (CHARUAU et al., 1996). Elle représente quelques phénomènes accompagnant la radioactivité du Radon 222 ( $^{222}\text{Rn}$ ) dans la nature. Elle sert aussi, à l'introduction de la notion de "famille radioactive", par l'explicitation des étapes intermédiaires reliant entre la disparition du radon 222, et la formation nettement observée, du dernier élément stable de la famille radioactive, le Plomb 206 ( $^{206}\text{Pb}$ ).

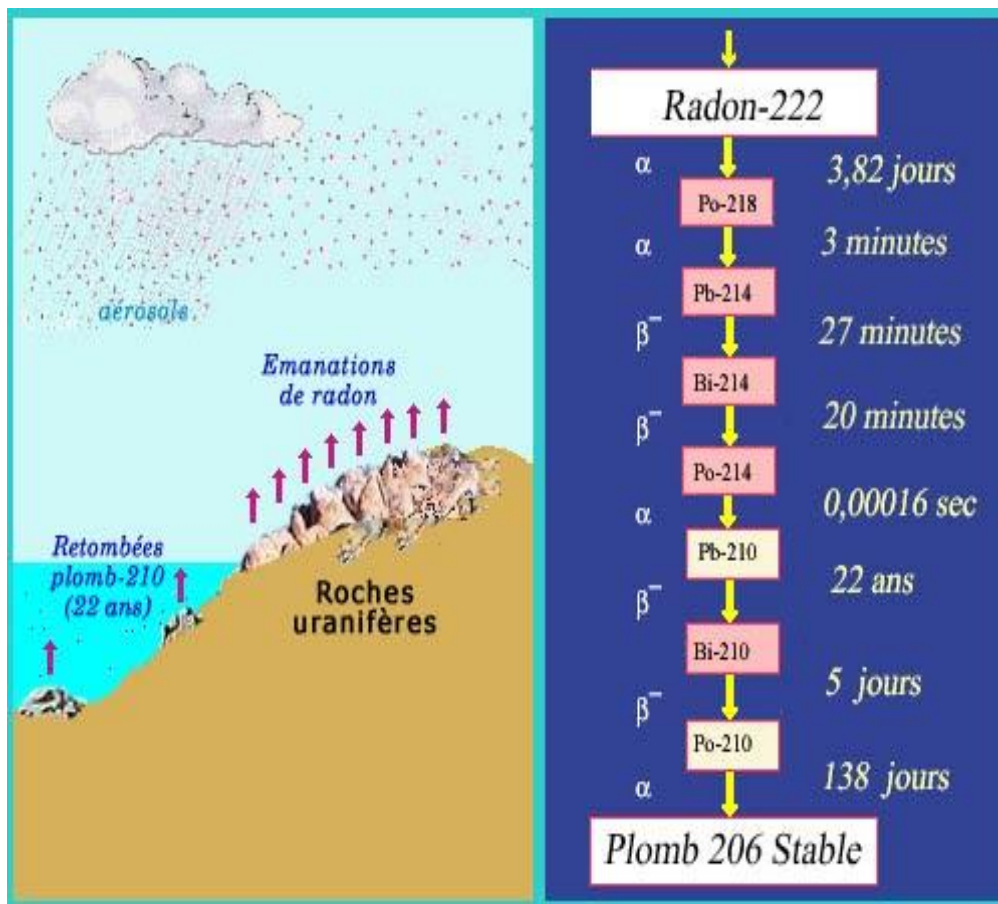


Illustration 1 : Manifestation de la radioactivité du Radon 222 dans la nature (CHARUAU et al., 1996)

Puis, pour renforcer à la fois, chez les élèves les concepts de "ModNat" et de "famille radioactive", nous avons procédé à la projection de l'illustration 2 (Lycée Jean Mermoz - Saint Louis - Haut Rhin France, 2015), d'une expérience menée sur un bloc de granite enfermé sous une cloche en verre. Cette expérience montre de la décroissance radioactive du radon 222 ( $^{222}\text{Rn}$ ). Lui-même présenté par la suite, à

travers l'illustration 3 (EDP-Sciences, 2015), comme étant un descendant radioactif, naturellement gazeux, du radioélément l'uranium 238  $^{238}\text{U}$ .



Illustration 2 : un bloc de granite enfermé sous une cloche en verre  
(Lycée Jean Mermoz - Saint Louis - Haut Rhin France, 2015)

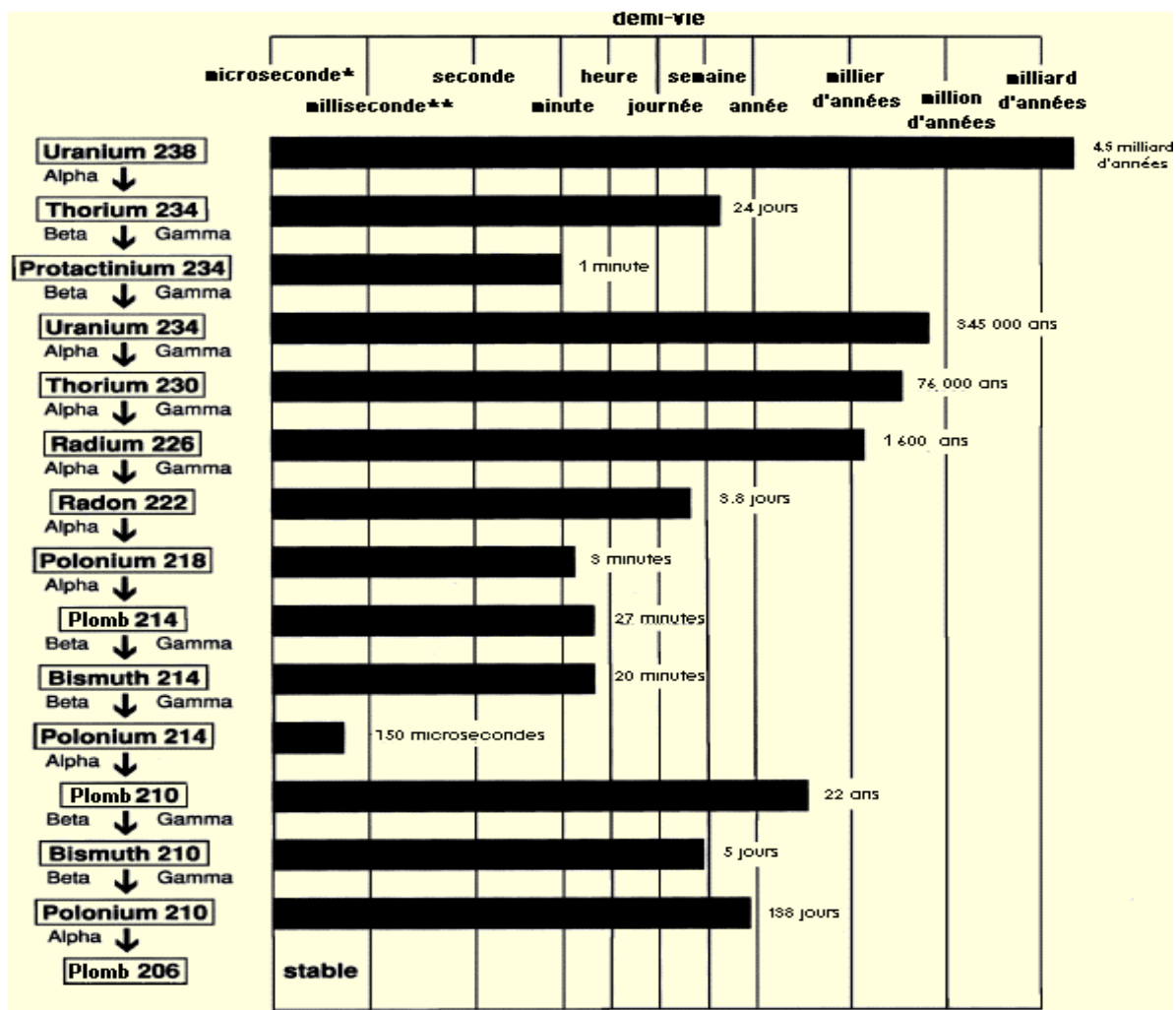


Illustration 3 : Famille radioactive de l'uranium 238 (EDP-Sciences, 2015)

- 2ème séquence : ModTab, le concept de modèles tabulaires de la décroissance radioactive

Pour introduire ce modèle, nous avons fait passer la vidéo 1 de 51s (Fried, 2012). Elle porte sur un exemple d'utilisation du détecteur Geiger Muller. Cette vidéo montre que lorsque cet appareil est rapproché aux objets de notre environnement quotidien, il mesure leurs activités radioactives. Guidés par la préservation de l'information, nous avons annoncé que les mesures doivent être relevées, et transcrites sous forme de tableaux. C'est ainsi que nous avons introduit le concept de modèle<sup>21</sup> tabulaire "ModTab".

Pour essayer de rapprocher entre les modèles mentaux des élèves, à propos de leurs représentations sur le "ModTab", nous avons procédé à la projection de l'illustration 4 (Ministère de l'éducation nationale et de la jeunesse France, 2002). Il s'agit d'un tableau de mesures qui décrit dans le temps, l'évolution de  $a(t)$  l'activité radioactive du Radon 220 ( $^{220}\text{Rn}$ ), et décrit aussi, l'évolution du nombre  $N(t)$  de sa population radioactive.

<b>t(s)</b>	0	14	28	42	56	70	84	98	112	126	140	154
<b>a(Bq)</b>	230	196	160	131	100	91	81	70	50	45	44	34
<b>N</b>	18400	15680	12800	10480	8000	7280	6480	5600	4000	3600	3520	2720

**Illustration 4 : évolution temporelle d'un échantillon de masse  $m=6,7\text{fg}$  (femto gramme) de radon 220** (Ministère de l'éducation nationale et de la jeunesse France, 2002)

- 3ème séquence : ModGraph, le concept de modèles graphiques de la décroissance radioactive

Comme une classe de physique a l'habitude de faire, l'étape qui suit est celle de transférer en graphes, les informations incluses dans le tableau. Nous avons saisi cette idée pour introduire le concept du modèle graphique "ModGraph". Et puis, pour faire la connexion entre les savoirs des élèves et le concept de "ModGraph", nous avons proposé aux élèves l'illustration 5 (Asp, 2015).

<sup>21</sup> Modèle ou registre ? C'est un modèle du fait qu'il est représentatif du phénomène. Le phénomène accepte d'être écrit et lu dans différents registres, en l'occurrence, le registre tabulaire.

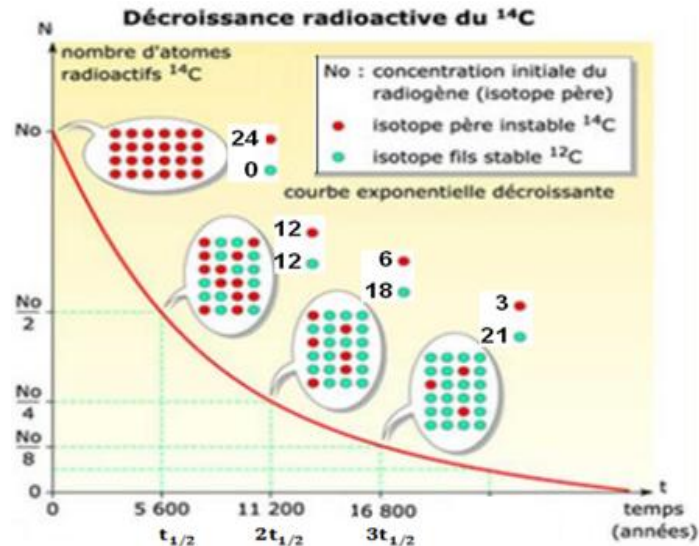


Illustration 5 : modèle graphique de la décroissance radioactive du carbone 14 (Asp, 2015)

Nous avons expliqué aux élèves, le contenu de l'illustration 5. Ils y figurent conjointement, deux "ModGraph" du radioélément carbone 14 ( $^{14}\text{C}$ ). "ModGraph 1" sous forme d'une courbe décroissante. Et "ModGraph 2" sous forme de quatre bulles contenant des boules rouges en nombre décroissant (représentant  $^{14}\text{C}$  l'isotope père), et des boules vertes en nombre croissant (indiquant l'apparition de  $^{12}\text{C}$  l'isotope fils). Ces quatre bulles coïncident respectivement avec les temps :

$$t = t_0 = 0, t = t_{\frac{1}{2}}, t = 2t_{\frac{1}{2}}, t = 3t_{\frac{1}{2}} \quad (\text{éq.43})$$

et respectivement, avec les nombres de radioéléments de  $^{14}\text{C}$  restant :  $N_0, \frac{N_0}{2}, \frac{N_0}{4}, \text{et } \frac{N_0}{8}$ .

- 4ème séquence : ModAnalyt, le concept de modèles analytiques de la décroissance radioactive

Comme officiellement recommandée (Direction des programmes Ministère de l'éducation nationale et de l'enseignement supérieur et de la formation des cadres et de la recherche scientifique Royaume du Maroc, 2007a), nous avons introduit, en contenus fournis aux élèves, le concept de modèles analytiques de la décroissance radioactive, à travers les différentes expressions :

- l'équation différentielle du 1<sup>er</sup> ordre de  $N(t)$  :

$$\frac{dN}{dt} + \lambda N(t) = 0 \quad (\text{éq.44})$$

- l'expression de sa solution en  $N(t)$  :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \text{ avec } \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (\text{éq.45})$$

➤ l'expression du temps  $t = f(N(t))$  :

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_0}{N(t)} \quad (\text{éq.46})$$

## II. Deuxième étape : analyse a priori

### 1. Observations didactiques objets d'analyse a priori

Il s'agit d'une démarche guidée par une analyse a priori sur la capacité des élèves à accomplir le processus de modélisation mathématique dans un cas simple reflétant la notion de la décroissance radioactive, et à produire un modèle analytique acceptable. Le travail se réduit au cas où le temps est défini par  $t = nt_{1/2}$  et  $n \in \mathbb{N}$ .

Dans cette perspective, les tests de cette analyse a priori, sont le moyen de relever des observations didactiques. Elles portent sur les points suivants :

- En terme de cadre d'intelligibilité : l'influence de l'absence des éléments d'interdisciplinarité entre mathématiques et physiques, sur l'activité d'appréhension et de modélisations mathématiques sur la décroissance radioactive ;

- En terme de registres : l'influence des différents passages entre registres sur la recherche de régularités numériques et leur transposition en équation traduisant la loi de la décroissance radioactive.

### 2. Pré-test 4

#### 2.1 Enoncé

##### 5ème séquence

En s'appuyant sur les informations contenues dans l'illustration 5, déduire les valeurs de  $N(t)$  pour les temps  $t = 4t_{1/2}$  et  $t = 5t_{1/2}$ .

#### 2.2 Réponses attendues

Pour les modèles analytiques de la décroissance radioactive (ModAnalyt), dans le cas restreint de  $N(t = nt_{1/2})$ , les productions des élèves attendues sont :

- pour les temps  $t = 4t_{1/2}$ , alors  $N(4t_{1/2}) = \frac{N_0}{16}$  ou bien  $N(4t_{1/2}) = \frac{N_0}{2^4}$

- pour les temps  $t = 5t_{1/2}$ , alors  $N(5t_{1/2}) = \frac{N_0}{32}$  ou bien  $N(5t_{1/2}) = \frac{N_0}{2^5}$

## 2.3 Résultats et discussion

Les résultats sont donnés dans le tableau 31.a suivant :

Elément d'analyse	Branche	Fréquences de réponses		Fréquences de pas de réponses	Total
		admises	non admises		
déduction de la valeur de $N(t)$ pour le temps $t=4t_{1/2}$	PC	89,47%	10,53%	0%	100%
		100%			
	SVT	67,57%	24,32%	8,11%	100%
		91,89%			
Total	78,67% = 59/75	17,33%	4%	100%	
	96% = 72/75				
déduction de la valeur de $N(t)$ pour le temps $t=5t_{1/2}$	PC	84,2%	7,9%	7,9%	100%
		92,11%			
	SVT	59,46%	27,03%	13,51%	100%
		86,49%			
Total	72% = 54/75	17,33%	10,67%	100%	
	89,33% = 67/75				

Tableau 31.a : résultats du pré-test 4

Pour les déductions réussies des valeurs de  $N(4t_{1/2})$  et de  $N(5t_{1/2})$ , elles sont en moyenne observée à 92,66% ( $92,66\% = (72+67)/(75+75)$ ), toutes branches confondues. Mais, les réponses admises, tournent autour d'une moyenne de 75,33% ( $75,33\% = (59+54)/(75+75)$ ). La remarque récurrente que nous pouvons dégager encore, c'est que les performances des élèves de la branche PC dépassent celles des élèves de la branche SVT.

Nous pouvons conclure qu'une bonne partie des élèves est sur la voie de l'appréhension de l'évolution de la population radioactive pour des temps à pas de  $t_{1/2}$ . Donc, le cadre d'intelligibilité de la dévolution du pré-test 4, a permis aux élèves de concevoir un modèle mental.

## 3. Post-test 4

### 3.1 Enoncé

#### 6ème séquence

En s'appuyant sur les informations contenues dans l'illustration 5 et du test précédent, déduire un modèle analytique de  $N(t)$  pour les temps  $t=nt_{1/2}$ , avec  $n$  l'entier naturel que nous appelons "ordre de décroissance radioactive".

### 3.2 Réponse attendue

Pour les modèles analytiques de la décroissance radioactive (ModAnalyt), dans le cas restreint de  $N(t=nt_{1/2})$ , les productions des élèves attendues sont :

- à partir de l'illustration 5 et des résultats du pré-test 4, les élèves déduisent l'expression de  $N(t=nt_{1/2})$  pour  $n$  un entier naturel quelconque, par :

$$N\left(t = nt_{\frac{1}{2}}\right) = \frac{N_0}{2^n} \quad (\text{éq.47})$$

### 3.3 Résultats et discussion

Les résultats sont donnés dans le tableau 31.b suivant :

Élément d'analyse	branche	Fréquences de réponses		Fréquences de pas de réponses	Total
		admises	non admises		
établissement de l'expression analytique de $N(t)$ pour $t=nt_{1/2}$	PC	26/38=68,42%	9/38=23,68%	3/38=7,9%	38/38=100%
		35/38=92,11%			
	SVT	16/37=43,24%	9/37=24,32%	12/37=32,43%	37/37=100%
		25/37=67,57%			
	Total	42/75=56%	16/75=21,33%	15/75=20%	75/75=100%
		58/75=77,33%			

Tableau 31.b : résultats du post-test 4

Pour le cas particulier où  $t= nt_{1/2}$ , le total de **56%** comme fréquence de réponses admises est significatif. En effet, la réussite que les élèves ont engendré pour le modèle analytique de  $N(nt_{1/2})$  a bondi de 0% sous le modèle des instructions officielles, à 68,42% et 43,24%, respectivement chez les élèves des branches PC et SVT, dans ce cas particulier que nous situons comme prélude de ModL2<sup>t</sup>. En fait, parmi les élèves répondants juste, presque 60% sont de la branche PC, contre 40% de la branche SVT. Nous pouvons conclure que les résultats des études d'expérimentations et ceux de l'étude de validation sont compatibles. Cependant, nous interprétons la non maîtrise des mathématiques, par sa traduction chez les élèves de la branche SVT par plus d'abstention (32,43% de pas de réponses). Alors, qu'elle se traduit chez les élèves de la branche PC par plus de réponses hors cadre mathématique (23,68% de réponses non admises (voir exemple 8, annexe 5, p 161)) (MAMANE & BENJELLOUN, 2018d).



## 4. Conclusion

Dans le paradigme de l'étude de cas, la comparaison interne menée, séparément, sur une classe de la 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat de la branche SVT et sur une autre de la branche PC, a permis d'identifier les bonnes performances des élèves dans l'appréhension et l'accomplissement du processus de la modélisation mathématique de la décroissance radioactive, du fait que leurs dévolutions appellent les registres relatifs à des contenus qu'ils utilisent fréquemment. Elles s'opèrent dans le cadre d'intelligibilité escompté. Ainsi, les productions des élèves sont couronnées par l'élaboration d'une expression analytique de la loi de la décroissance radioactive, restreinte au cas où le temps  $t$  est un multiple entier de la demi-vie  $t_{\frac{1}{2}}$ . Cependant, nous notons que les activités se sont rapportées à un cas simple, pour lequel les performances des élèves des branches PC sont en tête devant celles des élèves de la branche SVT (MAMANE & BENJELLOUN, 2018d).

## III. Troisième étape : étude de validation du ModLI

### 1. Pré-test 5

#### 1.1 Enoncé

##### 7ème séquence

Nous avons procédé à une discrétisation par intervalle de temps de pas la demi-vie  $t_{1/2}$ , nous avons pu approcher la courbe réelle en noir, par une succession de fonctions affines en rouge. Visualiser l'illustration suivante :

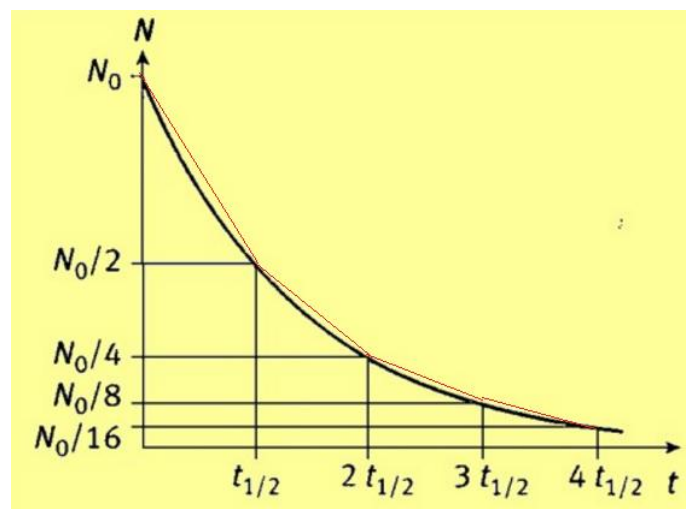


Illustration 6: courbes du ModLe<sup>t</sup> en trait gras et du ModLI en trait fin



### 8ème séquence

Nous donnons ci-dessous, les courbes et les expressions de ces fonctions affines, respectivement pour les trois premiers ordres de décroissance radioactive. Les élèves réalisent les instructions y incluses.

- Courbe du ModLI jusqu'à n=1 :

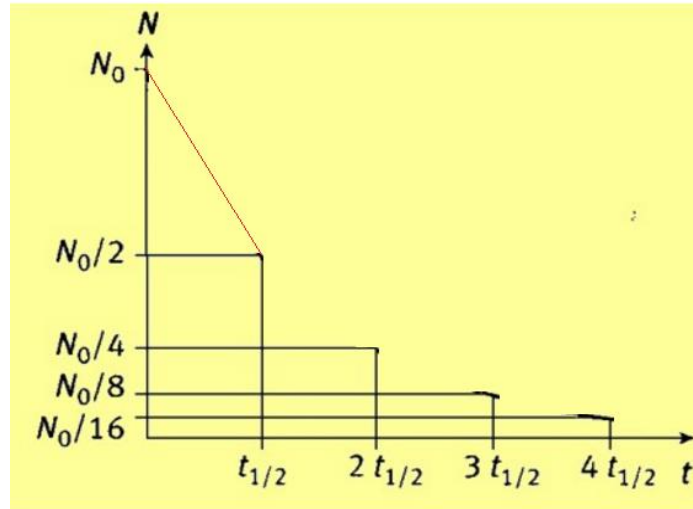


Illustration 6.1 : courbe du **ModLI** jusqu'à n=1

Pour n=1 alors  $t \in ]0, t_{1/2}]$  et  $N(t) = \frac{N_0}{2^1} \left[ (1 + 1) - \frac{t}{t_{1/2}} \right]$  (éq.48)

Etablir l'expression de t pour n=1.

- Courbe du ModLI jusqu'à n=2 :

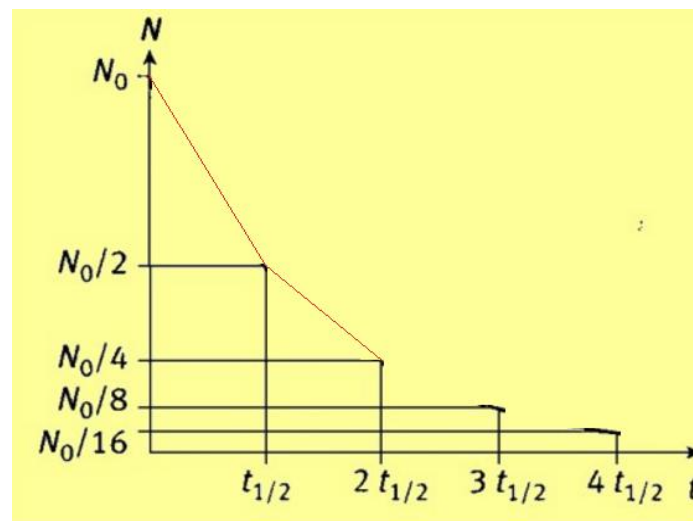


Illustration 6.2 : courbe du **ModLI** jusqu'à n=2

Pour n=2 alors  $t \in ]t_{1/2}, 2t_{1/2}]$  et  $N(t) = \frac{N_0}{2^2} \left[ (2 + 1) - \frac{t}{t_{1/2}} \right]$  (éq.49)

Etablir l'expression de t pour n=2.

- Courbe du ModLI jusqu'à n=3 :

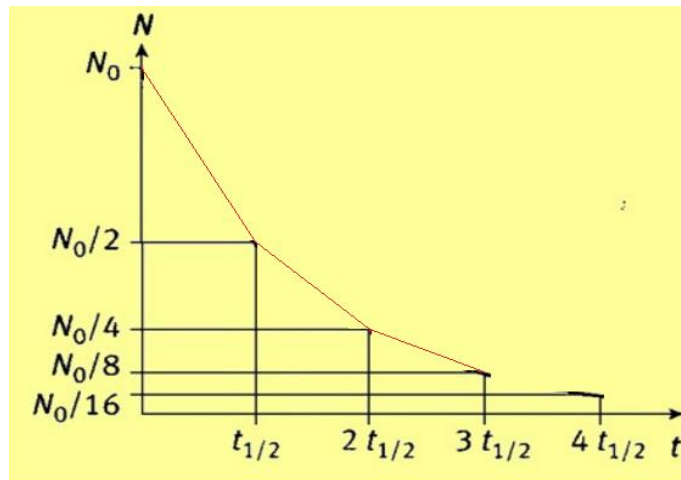


Illustration 6.3 : courbe du **ModLI** jusqu'à n=3

Pour n=3 alors  $t \in ]2t_{1/2}, 3t_{1/2}]$  et  $N(t) = \frac{N_0}{2^3} \left[ (3 + 1) - \frac{t}{t_{1/2}} \right]$  (éq.50)

Etablir l'expression de t pour n=3.

- Courbe du ModLI jusqu'à n=4 :

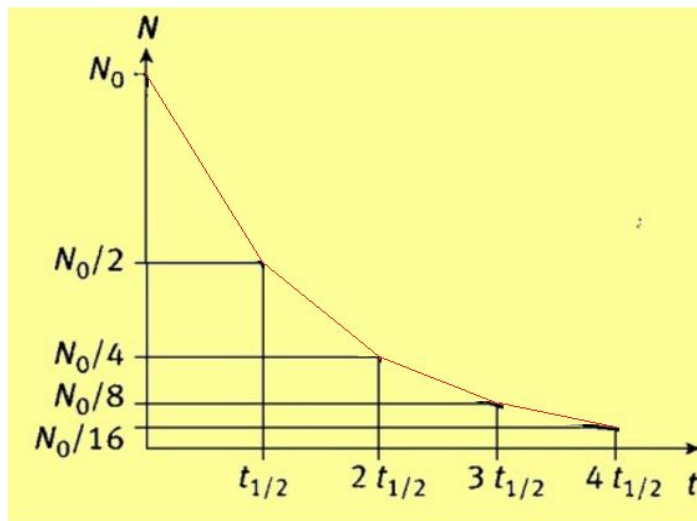


Illustration 6.4 : courbe du **ModLI** jusqu'à n=4

9ème séquence

Remplir le texte à trous ci-dessous :

Pour n=4 alors  $t \in \dots\dots\dots$  et  $N(t) = \dots\dots\dots$ , alors que  $t = \dots\dots\dots$

- En général, pour un ordre de décroissance radioactive n quelconque, l'intervalle de temps correspondant est  $t \in \dots\dots\dots$ , sur lequel l'expression du nombre N(t) de radioélément est  $N(t) = \dots\dots\dots$ , et celle du temps t est  $t = \dots\dots\dots$

## 1.2 Réponses attendues

- Dans le cadre du ModLI, les réponses attendues relatives aux expressions du temps, sont :

$$\text{Pour } n=1, \text{ alors } t = t_{1/2} \left[ (1 + 1) - 2^1 \frac{N(t)}{N_0} \right] \quad (\text{éq.51})$$

$$\text{Pour } n=2, \text{ alors } t = t_{1/2} \left[ (2 + 1) - 2^2 \frac{N(t)}{N_0} \right] \quad (\text{éq.52})$$

$$\text{Pour } n=3, \text{ alors } t = t_{1/2} \left[ (3 + 1) - 2^3 \frac{N(t)}{N_0} \right] \quad (\text{éq.53})$$

$$\text{Pour } n=4, \text{ alors } t = t_{1/2} \left[ (4 + 1) - 2^4 \frac{N(t)}{N_0} \right] \quad (\text{éq.54})$$

- Pour le texte à trous ci-dessous, les réponses attendues sont en gras.

En général, pour un ordre de décroissance radioactive  $n$  quelconque, l'intervalle de temps correspondant est  $t \in ](n - 1)t_{1/2}, nt_{1/2}[$ , sur lequel l'expression du nombre  $N(t)$  de radioélément est  $N(t) = \frac{N_0}{2^n} \left[ (n + 1) - \frac{t}{t_{1/2}} \right]$ , et celle du temps  $t$  est  $t = t_{1/2} \left[ (n + 1) - 2^n \frac{N(t)}{N_0} \right]$ .

## 1.3 Résultats et discussion

Les résultats sont donnés dans le tableau 32. La fréquence nulle ou négligeable des copies ne contenant pas de réponses, rendues par les élèves, toutes branches confondues, montre que le contexte leur est intelligible (voir exemple 9, annexe 5, p 161). En effet, ces élèves ne se sentent plus bloqués dans l'exécution des activités de modélisation, même si 34,67% d'entre eux, ont rendu des réponses non admises. En plus, la réussite des 65,33% des élèves, dans l'élaboration de l'expression générale du ModLI (voir exemple 10, annexe 5, p 162), confirme que l'enseignement-apprentissage de la modélisation, en physique, est possible dans les cadres et registres mathématiques des contenus que ces élèves utilisent fréquemment (MAMANE & BENJELLOUN, 2018d). Ce test reflète la faiblesse des élèves des branches SVT lors de la mobilisation des mathématiques, même pour des cas simples ( $n=1$ ). En revanche, grâce à l'effet de la répétition du même travail (pour  $n=2$ ,  $n=3$ ,  $n=4$ , puis  $n$  quelconque), dans le même contexte, la réussite de ces élèves passe significativement, de 5,41% à 56,76%.

éléments d'analyse	branche	Fréquence de réponses		Fréquence de pas de réponses	Total
		admises	non admises		
établissement de l'expression du temps pour n=1	PC	36.84%	60.53%	2.63%	100%
		97.37%			
	SVT	5.41%	94.59%	0%	100%
		100%			
Total	21.33%	77.33%	1.33%	100%	
	98.67%				
établissement de l'expression du temps pour n=2	PC	44.74%	50%	5.26%	100%
		94.74%			
	SVT	5.41%	81.08%	13.51%	100%
		86.49%			
Total	25.33%	65.33%	9.33%	100%	
	90.67%				
établissement de l'expression du temps pour n=3	PC	73.68%	26.32%	0%	100%
		100%			
	SVT	40.54%	54.05%	5,41%	100%
		94,59%			
Total	57.33%	40%	2.67%	100%	
	97.33%				
déduction de l'expression de N(t) pour n=4	PC	71.05%	18.42%	10.63%	100%
		89.47%			
	SVT	67.57%	29.73%	2.7%	100%
		97.3%			
Total	69.33%	24%	6.67%	100%	
	93.33%				
déductions des expressions générales pour N(t) et pour t	PC	73,68%	26,32%	0%	100%
		100%			
	SVT	56,76%	43,24%	0%	100%
		100%			
Total	<b>65,33%</b>	34,67%	0%	100%	
	100%				

Tableau 32 : résultats du pré-test 5

## 2. Post-test 5

### 2.1 Enoncé

#### 10ème séquence

Nous voulons préparer un échantillon radioactif de polonium 210 ( $^{210}\text{Po}$ ), tel qu'au moment de sa préparation, son activité radioactive soit  $a_0=5\text{Bq}$  et donc le nombre de sa population est  $N_0=86 \times 10^6$  noyaux. La demi-vie du  $^{210}\text{Po}$  est  $t_{1/2}=138\text{j}$ .

Calculer N(t) pour  $t=3\text{j}$  après cette préparation, sachant que  $n=1$ .

**Remarque :** Les données de l'exercice ci-dessus se trouvent, exactement, à la fois sur les manuels scolaires "MASSAR" pour les élèves de la branche SVT, et "FADAE" pour les élèves de la branche PC. Pour adapter l'exercice au contexte de

ModLI, une seule donnée a été ajoutée à la dernière ligne. Elle apporte l'information sur le nouveau paramètre, en l'occurrence, n que nous appelons ordre de décroissance radioactive.

## 2.2 Réponse attendue

La réponse attendue c'est que puisque n=1 alors :

$$N(t) = \frac{N_0}{2^1} \left[ (1 + 1) - \frac{t}{t_{1/2}} \right] = 85,065217 \times 10^6 \quad (\text{éq.55})$$

## 2.3 Résultats et discussion

Les résultats sont donnés dans le tableau 33 ci-dessous.

Eléments d'analyse Branche	Fréquence de situations de réussites via ModLI		Fréquence de situations d'échecs		Total
	utilisation réussie	utilisation non réussie	utilisation du ModLe <sup>t</sup>	non réponse ou autres	
PC	73,68%	13,16%	5,26%	7,89%	100%
	86,84%		13,16%		
SVT	72,97%	10,81%	8,11%	8,11%	100%
	83,78%		16,22%		
Total	<b>73,33%</b>	12%	6,67%	8%	100%
	85,33%		14,67%		

**Tableau 33 : résultats du post-test 5**

Les résultats montrent que même si la durée de l'étude de validation ait été relativement courte, elle a suffi pour que 73,33% des élèves appliquent convenablement le ModLI. Ce modèle offre désormais, un cadre d'intelligibilité adéquat, lors de sa mobilisation dans les enchaînements mathématiques. Cependant, par comparaison avec les résultats du pré-test 5, les élèves restant (26,67%), confirme la persistance des échecs résiduels, quelque soit le processus de l'élaboration d'un modèle mathématique. Ces élèves trainent de très grandes faiblesses, même si le cadre et les registres sont relatifs à des contenus de leurs niveaux d'enseignement (MAMANE & BENJELLOUN, 2018d).

## 3. Conclusion

L'étude de validation du ModLI que nous avons menée nous a permis d'expérimenter un modèle de la décroissance radioactive. Il mobilise des registres sémiotiques et sémantiques dans les cadres physique et mathématique qui entrent dans les cadres d'apprentissage des élèves. Alors que pour le modèle officiel du

programme pour la loi de la décroissance radioactive ModLe<sup>t</sup>, les élèves se bloquent définitivement une fois qu'ils atteignent la phase mathématique de l'introduction des modèles analytiques de la décroissance radioactive, à savoir : les équations différentielles et leurs solutions ; les signes des fonctions logarithme et exponentielle, leurs significations, et les différentes techniques de calcul qui les régissent ; et le calcul des probabilités.

Les résultats de nos études ont révélé que les élèves ont été très satisfaits par le ModLI, comme étant un autre outil leur permettant de dépasser l'échec structural connu sous le ModLe<sup>t</sup>. En effet, chez tous les élèves, toutes branches confondues, la fréquence des copies ne contenant pas de réponses a été nulle ou très négligeable. Par ailleurs, les résultats du test 1 témoignent d'une augmentation du taux de réussite de 65,33% parmi tous les élèves, et ceci dans le processus de la modélisation mathématique aboutissant à l'élaboration de l'expression générale du ModLI. Alors que l'étude de validation montre que sous ModLI, les élèves connaissent une augmentation de réussite avoisinant les 75% dans l'accomplissement des activités en relation avec l'application de leurs apprentissages sur la loi de décroissance radioactive.

Nous pouvons donc conclure que l'enseignement-apprentissage du phénomène de la décroissance radioactive, a été considérablement amélioré, sous notre modèle ModLI, doublement conjugué avec le travail collaboratif entre les élèves, et avec la mobilisation des ressources TICE.

#### IV. Quatrième étape : étude de validation du ModL2<sup>t</sup>

##### 1. Présentation du ModL2<sup>t</sup>

###### 11ème séquence

Sur la base de passages mathématiques logiques, la loi de décroissance radioactive peut s'écrire sous la forme :

$$N(t) = N_0 2^{-\left(\frac{t}{t_1}\right)} \quad \text{ou encoré,} \quad N(t) = N_0 2^{-\left(\frac{\lambda t}{0,69}\right)} \quad (\text{éq.56})$$

L'établissement de l'expression du temps est retenu pour faire l'objet d'un test.

**N.B :** Les données sur les grandeurs  $N(t)$  ou  $m(t)$  ou  $a(t)$  sont fournies sous une forme comme :

$$N(t) = 2^p \quad \text{et} \quad N_0 = 2^{p_0}, \quad \text{avec } p \text{ et } p_0 \in \mathbb{R} \quad (\text{éq.57})$$

**Exemple :**

### 12ème séquence

A l'instant  $t$ , des chercheurs ont prélevé des morceaux de charbon de bois d'une grotte préhistorique. Cet échantillon a contenu une population de  $^{14}\text{C}$  au nombre  $N(t) = 2,6 \cdot 10^{11}$ , et d'activité radioactive  $a(t) = 0,7\text{Bq}$ .

Ces données s'écrivent aussi par :

$$N(t) = 2,6 \cdot 10^{11} \approx 2^{37,92} \quad \text{et} \quad a(t) = 0,7\text{Bq} \approx 2^{-0,51}\text{Bq}. \quad (\text{éq.58})$$

## 2. Pré-test 6

### 2.1 Enoncé

#### 13ème séquence

Sachant qu'on peut toujours écrire les nombres de populations radioactives sous la forme :  $N(t) = 2^p$  et  $N_0 = 2^{p_0}$ , avec  $p$  et  $p_0 \in \mathbb{R}$  (éq.59)

Etablir l'expression du temps  $t$ , en partant d'une des expressions du ModL2t, donnée ci-dessous :

$$N(t) = N_0 2^{-\left(\frac{t}{t_1/2}\right)} \quad \text{ou} \quad N(t) = N_0 2^{-\left(\frac{\lambda t}{0,69}\right)} \quad (\text{éq.60})$$

### 2.2 Réponses attendues

Les réponses attendues relatives à l'expression du temps  $t$  sont :

$$t = \frac{t_1}{2}(p_0 - p) \quad \text{ou} \quad t = \frac{\lambda}{0,69}(p_0 - p) \quad (\text{éq.61})$$

### 2.3 Résultats et discussion

Les résultats sont donnés dans le tableau 34 suivant :

Éléments d'analyse	Branche	Sous ModL2 <sup>t</sup>			Total
		fréquence des réussites		fréquence des échecs	
		réponses admises	réponses non admises		
établissement de l'expression du temps t	PC	65,79%	31,58%	2,63%	100%
		97,37%			
	SVT	54,05%	24,33%	21,62%	100%
		78,38%			
	Total PC et SVT	60%	28%	12%	100%
		88%			

**Tableau 34 : résultats du pré-test 6**

Chez les élèves, les situations de réussites dans les passages entre contenus mathématiques, ont passé de 0% sous ModLe<sup>t</sup> à 88% avec ModL2<sup>t</sup> (voir exemple 11, annexe 5, p 162). Plus encore, la réussite de 60% des élèves dans l'établissement du modèle analytique du temps t, au compte du ModL2<sup>t</sup>, témoigne que ce modèle est mathématiquement abordable. Néanmoins, le fait que 40% des élèves n'ont pas réussi à rendre les réponses attendues, atteste que la scénarisation de l'enseignement-apprentissage du ModL2<sup>t</sup> doit être revue, ou bien ces élèves cumulent, encore une faiblesse en mathématique, dans la maîtrise des calculs des puissances. Cette dernière cause apparaît tangible, du fait que c'est le tiers des élèves, parmi ceux qui ont connu une situation de réussite, qui ont rendu des réponses non admises. Selon cette vision du degré de maîtrise des mathématiques dans le cadre des contenus qu'ils utilisent fréquemment, les élèves sont à classer parmi trois catégories : 60% des élèves maîtrisent les mathématiques requises, 28% ne la maîtrisent pas, et 12% ne retiennent aucune notion de cette mathématique. Nous pouvons, prudemment, conclure que le non aboutissement de 40% des situations d'enseignement-apprentissages des sciences physiques incluant des contenus mathématiques dans le cadre d'apprentissage, est imputable aux difficultés que les élèves ont devant la maîtrise de ces contenus mathématiques.



### 3. Post-test 6

#### 3.1 Enoncé

##### 14ème séquence

La scintigraphie osseuse repose sur la prise d'images après la fixation dans les structures osseuses de molécules phosphatées marquées au technétium 99 ( $^{99}\text{Tc}$ ). En effet, par voie intraveineuse, le traceur est injecté dans le sang, et sa captation par le squelette est maximale au bout d'un moment.

A l'instant  $t_0=0\text{s}$ , une injection contenant du  $^{99}\text{Tc}$  d'activité radioactive  $a_0$  a été administrée à un patient. A l'instant  $t_1$ , une image a été prise des os examinés, dans lesquels l'activité radioactive du  $^{99}\text{Tc}$  a atteint  $a(t_1) = 2^{-0,74} a_0$ .

Calculer la valeur du temps  $t_1$  en heure. La demi-vie du  $^{99}\text{Tc}$  est  $t_{1/2}=6\text{h}$ .

Remarque : Cet exercice est élaboré sur la base d'un exercice tiré de l'examen national du baccalauréat marocain, session de rattrapage 2014, branche SVT.

#### 3.2 Réponse attendue

La réponse attendue est de la forme :

$$N(t_1) = N_0 2^{-\left(\frac{t_1}{t_{1/2}}\right)} \Rightarrow \lambda N(t_1) = \lambda N_0 2^{-\left(\frac{t_1}{t_{1/2}}\right)} \Rightarrow a(t_1) = a_0 2^{-\left(\frac{t_1}{t_{1/2}}\right)}$$

$$\Rightarrow 2^{-0,74} a_0 = a_0 2^{-\left(\frac{t_1}{t_{1/2}}\right)} \Rightarrow t_1 = 0,74 \times \frac{t_{1/2}}{2} = 4,44\text{h} \quad (\text{éq.62})$$

#### 3.3 Résultats et discussion

Les résultats sont donnés dans le tableau 35 suivant :

Eléments d'analyse Branche	Sous ModL2 <sup>t</sup>				Total
	fréquence des réussites		fréquence des échecs		
	avec développement réussi	avec développement non réussi	avec début de réponse	pas de réponse	
PC	52,63%	26,32%	0%	21,05%	100%
	78,95%		21,05%		
SVT	51,35%	24,32%	8,11%	16,22%	100%
	75,68%		24,32%		
Total PC et SVT	<b>52%</b>	25,33%	4%	18,67%	100%
	77,33%		22,67%		

Tableau 35 : résultats du post-test 6

En guise de vérification de notre hypothèse sur les 40% des élèves qui n'ont pas réussi à rendre les réponses attendues, lors du pré-test ci-dessus, ce post-test se distingue par un degré de difficulté mathématique plus élevé, expliquant sa résolution par 52% parmi l'ensemble des élèves (voir exemple 12, annexe 5, p 162). Donc, nous concluons que l'échec du reste des élèves est explicable par leurs faiblesses dans la maîtrise des mathématiques.

#### 4. Conclusion

Avec ModL2<sup>t</sup>, les situations d'échecs des élèves dans les passages entre contenus mathématiques sont surmontées. Les réussites sont passées de 0% sous ModLe<sup>t</sup> à 88% avec ModL2<sup>t</sup>. Donc, à lui seul, ce saut qualitatif permet de prouver l'avantage que prend ModL2<sup>t</sup> par rapport au modèle des instructions officielles (ModLe<sup>t</sup>). Plus encore, le gain de 60% de réussite affichée parmi l'ensemble des élèves, dans l'établissement du modèle analytique du temps  $t$ , au compte du ModL2<sup>t</sup>, témoigne que ce modèle est mathématiquement abordable. Alors que l'étude de validation montre que les 40% restante, traine des faiblesses conséquentes et résiduelles, imputables à leurs cursus scolaires.

Donc, selon cette vision du degré acceptable de maîtrise des mathématiques, les élèves abordent les apprentissages des contenus des sciences physiques, en se concentrant sur les spécificités de la discipline, à savoir, l'espace de réalité, le cadre d'intelligibilité, et le cadre de rationalité. Sans se soucier des éléments de transversalité entre mathématiques et sciences physiques.

## D// CONCLUSION

Ce sixième et dernier chapitre à été le champ que nous avons réservé à l'étude de validation de nos deux modèles. Le **Modèle de Linéarisation par Intervalle (ModLI)** et le **Modèle de la Loi en puissances à base 2 du temps (ModL2<sup>t</sup>)**. Nous rappelons que se sont nos deux alternatives à la situation d'échec que connaît la classe de physique depuis 2007, à cause des directives régissant les programmes selon "les instructions officielles 2007" des sciences physiques (Direction des programmes Ministère de l'éducation nationale et de l'enseignement supérieur et de

la formation des cadres et de la recherche scientifique Royaume du Maroc, 2007a) et des mathématiques (Direction des programmes Ministère de l'éducation nationale et de l'enseignement supérieur et de la formation des cadres et de la recherche scientifique Royaume du Maroc, 2007b). Cet échec est observé lors de la modélisation mathématique de la décroissance radioactive, en cours de la 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat marocain, des branches SVT et PC.

De par sa nécessité scientifique d'exister, notre étude de validation s'est focalisée sur les activités d'initiation à la modélisation. Une série d'illustrations de la décroissance radioactive est diffusée à l'aide d'un support PowerPoint. Ces illustrations couvrent la radioactivité naturelle (ModNat) ((CHARUAU et al., 1996) et (EDP-Sciences, 2015)), la notion de décroissance radioactive implicite dans le concept de famille radioactive (EDP-Sciences, 2015) et explicite dans un tableau (ModTab) (Ministère de l'éducation nationale et de la jeunesse France, 2002) précédé par la diffusion d'une vidéo, la même notion sous deux expressions graphiques conjointes dans une même illustration (ModGraph) (Asp, 2015), et aussi la même notion de décroissance radioactive à travers les expressions analytiques de son équation différentielle et de ses solutions (pour  $N(t)$  et pour  $t$ ). Cela a été l'occasion d'introduire la notion de modèle analytique (modAnalyt) (Direction des programmes Ministère de l'éducation nationale et de l'enseignement supérieur et de la formation des cadres et de la recherche scientifique Royaume du Maroc, 2007a). A la fin de cette séquence, le concept de modélisation a été introduit à travers un retour à l'examen, par toute la classe, des démarches de construction de ces différents modèles.

En vue d'un usage routinier de nos deux modèles dans les classes de physique, lors de l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive et lors de l'établissement de sa loi, nous avons procédé, méthodiquement, à l'administration des pré-tests et des post-tests relatifs à l'étude de validation d'un cas particulier où le temps s'écrit par  $t=nt_{1/2}$  et où  $n$  est un entier naturel (MAMANE & BENJELLOUN, 2018c). Puis successivement, ceux des études de validation du ModLI et du ModL2<sup>t</sup>. Les expérimentations ont été menées dans des situations de classes entières ((MAMANE & BENJELLOUN, 2018a) et (MAMANE & BENJELLOUN, 2018d)). Leurs échantillons ont été constitués par de nouveaux élèves de la 2<sup>ème</sup> année du

baccalauréat marocain, des branches SVT et PC. Ils ont été tous, des élèves de l'année scolaire qui a suivi celle des études exploratoire et d'expérimentations. Le support des tests a été toujours des contenus diffusés par PowerPoint. Les élèves ont produit des réponses individuelles, sur une feuille anonyme que nous leur avons fourni et ramassé, justement à la fin des tests.

Pour le cas particulier où  $t = nt_{1/2}$ , le total de 56% comme fréquence de réponses admises est significative. En effet, la réussite que les élèves ont engendrée pour le modèle analytique de  $N(nt_{1/2})$  a bondi de 0% sous le modèle des instructions officielles, à 68,42% et 43,24%, respectivement chez les élèves des branches PC et SVT, sous ce cas particulier que nous situons comme prélude de ModL2<sup>t</sup> (MAMANE & BENJELLOUN, 2018d).

Pour ModLI, les résultats de nos études ont révélé que les élèves ont été très satisfaits par le ModLI, comme étant un autre outil leur permettant de dépasser l'échec structural connu. En effet, il y a eu une augmentation de réussite de 65,33% parmi tous les élèves, et ce dans le processus de la modélisation mathématique aboutissant à l'élaboration de l'expression générale du ModLI. Et une augmentation de réussite avoisinant les 75% dans l'accomplissement des activités en relation avec l'application de leurs apprentissages sur la loi de décroissance radioactive sous ModLI.

Et pour ModL2<sup>t</sup>, en comparant les déroulements des séances de classe, avec ce qui est officiellement recommandé et avec ModL2<sup>t</sup>, nous concluons que les situations de réussites sont passées de 0% à 88%. Donc, à lui seul, ce saut qualitatif permet de prouver le dessus que prend ModL2<sup>t</sup> par rapport au modèle des instructions officielles. Plus encore, le gain de 60% de réussite affichée parmi l'ensemble des élèves, dans l'établissement du modèle analytique du temps  $t$ , au compte du ModL2<sup>t</sup>, témoigne que ce modèle est mathématiquement abordable. Alors que l'étude de validation montre que les 40% restante, traîne des faiblesses conséquentes et résiduelles, imputables à leurs cursus scolaires.

Donc, selon cette vision du degré acceptable de maîtrise des mathématiques, les élèves abordent les apprentissages des contenus des sciences physiques, en se concentrant sur les spécificités de la discipline, à savoir, l'espace de réalité, le cadre

d'intelligibilité, et le cadre de rationalité. Sans se soucier des éléments de transversalité entre mathématiques et sciences physiques. Nous pouvons conclure donc, que l'enseignement-apprentissage du phénomène de la décroissance radioactive, a été considérablement amélioré, sous nos deux modèles ModLI et ModL2<sup>t</sup>, conjugué avec la mobilisation des ressources TICE.

## CONCLUSION GENERALE

La physique est une science exacte où les objets et les événements de la réalité peuvent être prévus et décrits, à l'aide d'objets et de représentations mathématiques. Leurs mises en correspondance, plus ou moins complexes, peuvent conduire à la formulation mathématique des lois de la physique. Cependant, pour un contenu de la physique, sujet d'enseignement-apprentissage, la conscience du degré de la différence entre le processus de conceptualisation de ses objets et de ses événements (monde matériel : corps et phénomènes), et le processus de conceptualisation des objets correspondants en mathématiques (monde idéal), s'impose en élément décisif dans l'aboutissement souhaitable de toutes démarches en didactiques de la physique. C'est en fait, l'idée centrale du sujet de la présente recherche. Elle a orienté nos travaux autour d'une étude en didactique de la physique, pour le cas de l'enseignement-apprentissage du phénomène de la décroissance radioactive. Cette étude couple entre quatre facteurs : L'interaction entre les difficultés de l'enseignement et l'apprentissage des sciences physiques et celles liées à la maîtrise des mathématiques, pour les classes de la 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat scientifique, des branches SVT (Sciences de la Vie et de la Terre) et PC (Physique et Chimie ; L'expérimentation de nos deux nouvelles alternatives pour l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive, que nous avons appelé "**ModLI**" **Modèle de Linéarisation par Intervalle**, et "**ModL2**" **Modèle de la Loi en puissances à base 2 du temps** ; La mobilisation des TICE ; Et l'alternance entre travaux individuels et travaux collaboratifs.

Pour ce faire, notre travail de thèse a été structuré en six chapitres. Les trois premiers chapitres ont été dédiés, respectivement à l'étude bibliographique, à la problématique, et aux cadres théorique et méthodologique. Puis, nous avons enchaîné par ceux des études : exploratoire, d'expérimentations et de validation.

Comme éléments indispensables des cadres théorique et méthodologique de cette recherche, nous nous sommes intéressés au concept de registres (registre sémiotique, registre sémantique), au concept d'espace de réalité, au concept de cadres (cadres de rationalité et cadre d'intelligibilité), et aux concepts de modèle et de

modélisation. Ces concepts ont servi d'outils clés d'analyse structurant l'ingénierie didactique au sens de M.ARTIGUE. Ainsi, nous avons segmenté la démarche méthodologique selon le déroulement suivant : l'étude bibliographiques autour du sujet de la recherche ; la problématique de la recherche ; une délimitation du paradigme théorique autour des grandes théories d'apprentissage et des concepts théoriques de référence ; formulation des questions et des hypothèses de la recherche ; échantillonnages, et conception du questionnaire et des interviews ; élaboration de deux nouvelles alternatives (ModLI et ModL2<sup>t</sup>) pour l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive, et élaboration d'un nouvel outil TICE ; expérimentation de nos deux nouvelles alternatives, à travers les études exploratoire, d'expérimentations et de validation.

Ainsi, le quatrième chapitre de ce travail a été consacré à l'exploration des préférences des élèves relatives aux TICE à mobiliser lors de l'enseignement-apprentissage de la modélisation mathématique en physique. Notre outil, a été un questionnaire méthodiquement construit sur un support papier, distribué en classe et ramassé à la fin de son administration. Il a été sujet d'une série d'analyses. Les résultats montrent que les élèves sont très fortement attirés par les ressources mobilisables d'abord sur Youtube, très largement en tête avec 75,2%. Puis, ils passent successivement sur les sites fiables, les forums, les sites des lycées marocains, et enfin sur Facebook. Les tests de Chi<sup>2</sup> réalisés sur les préférences des élèves de la 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat des branches SVT et PC, ont montré que les élèves préfèrent à 72,09% les modélisations mathématiques prêtes des phénomènes en sciences physiques, que de les construire. Ils diversifient leurs utilisations des TICE en rapport avec l'expérimentation, bien qu'elles soient à ses balbutiements. Des élèves (40,9% à 45,9%) ont exprimé leurs préférences des TICE lors de la documentation, ou pour la recherche de photos d'expériences ou de leurs schémas. 30% à 46,7% d'élèves se connectent à internet pour la visualisation des simulations d'expériences ou pour la recherche de leurs vidéos, alors que la tendance, peu élevée, s'exprime du côté des recherches d'exercices (68,6%), et surtout, ceux qui sont résolus (86,9%). Ce chapitre a fait l'objet d'une publication dans un journal international.

Après, nous avons consacré le cinquième et le sixième chapitre, successivement, aux études d'expérimentations du ModLI et ModL2<sup>t</sup>, et à leurs études de validation. Ainsi, au cinquième chapitre, les études d'expérimentations ont porté sur nos deux nouveaux modèles de la loi de la décroissance radioactive, que nous avons élaborés et nommé **ModLI** (**Modèle de Linéarisation par Intervalle**) et **ModL2<sup>t</sup>** (**Modèle de la Loi en puissances à base 2 du temps**). Dans notre démarche méthodologique spécifique à ce cinquième chapitre, nous avons pris en compte les préférences prononcées des élèves, lors de l'étude exploratoire, sur la mobilisation des ressources TICE, en l'occurrence, leurs interactions constructives avec SimulP200. L'implication des élèves a été systématique et opérationnelle, dans toutes les étapes de l'élaboration du ModLI, et aussi dans le possible de celle du ModL2<sup>t</sup>. Ainsi, les séquences d'initiation des élèves au concept de modélisation, ont débouché sur des modèles graphiques qu'ils ont produits avec une performance allant de 81,2% de réussite en travaux individuels, à 100% en travail collaboratif dans des intergroupes à membres tournants. Alors que lors de l'établissement des modèles analytiques correspondants, la réussite des élèves a baissé de presque 40% et 30%, respectivement entre travaux individuels et travail collaboratif. Cependant, l'élaboration du modèle analytique de  $N(nt_{1/2})$ , qui est le nombre de la population radioactive restante pour les temps  $t=nt_{1/2}$  où  $n$  est un entier naturel, a été l'occasion de l'observation d'un regain conséquent dans les performances des élèves. La réussite à produire le modèle mathématique attendu, est passée de 0%, pour bondir à 88,9% en travaux individuels, puis à 100% en travail collaboratif. Alors que pour l'élaboration du ModLI, les réussites dans les productions attendues des graphes, sont passées de 75% à 100%, entre travaux individuels et travail collaboratif en intergroupes à membres tournants. Les élèves se sont totalement bloqués lorsque nous leur avons demandé de proposer un modèle mathématique à partir du graphe de la décroissance radioactive officiellement programmé. En revanche, une réussite des élèves de 31,25% en travaux individuels, à 100% en travail collaboratif, est observée lors de leurs modélisations mathématiques, à partir du graphe de la linéarisation par intervalle, qu'ils ont produit pour ModLI. Aussi, lors de l'expérimentation du ModL2<sup>t</sup>, la satisfaction s'est accrue, expliquant la croissance du



succès qui a atteint une moyenne de 93,75%. Chez les élèves, ces deux modèles mobilisent des registres sémiotiques et sémantiques dans les cadres physique et mathématique qui leur sont ceux des contenus qu'ils utilisent fréquemment. Alors que la modélisation mathématique de la décroissance radioactive, comme elle est introduite suivant les instructions officielles, repose sur des registres et sur des cadres mathématiques inconnus jusque-là par les élèves, expliquant ainsi, les difficultés relevées lors de l'enseignement-apprentissage du phénomène. Par le biais du ModLI et du ModL2<sup>t</sup>, les élèves ont acquis deux nouveaux outils pour décrire le phénomène de la décroissance radioactive. Ils en ont été très satisfaits, comme étant deux autres outils pour décrire le phénomène. Nous pouvons donc conclure que l'enseignement-apprentissage du phénomène de la décroissance radioactive, a été considérablement amélioré, sous nos deux modèles.

Le sixième et dernier chapitre de ce travail de thèse, a été le champ des études de validation relatives au ModLI et au ModL2<sup>t</sup>. Toutes dispositions prises, nous avons mené les tests de l'étude de validation dans des situations de classes entières du baccalauréat marocain, des branches SVT et PC. Le support des tests a été toujours des contenus diffusés par PowerPoint. Les élèves ont produit des réponses individuelles, sur une feuille anonyme que nous leur avons fournie et ramassée, à la fin des tests.

En effet, la réussite que les élèves ont engendrée dans la production du modèle analytique de  $N(nt_{1/2})$  a bondi de 0% sous le modèle (exponentiel) des instructions officielles, à 68,42% et 43,24%, respectivement chez les élèves des branches PC et SVT.

Par ailleurs, pour ModLI, les résultats de nos études ont révélé que les élèves ont été très satisfaits, car c'est un outil qui leur a permis de dépasser les situations d'échecs connues. Du coup, il y a eu une augmentation de réussite de 65,33% parmi tous les élèves, et ce dans le processus de la modélisation mathématique aboutissant à l'élaboration de l'expression générale du ModLI. Et une augmentation de réussite avoisinant les 75% dans l'accomplissement des activités en relation avec l'application de leurs apprentissages sur la loi de décroissance radioactive sous ModLI.

Et pour ModL2<sup>t</sup>, en comparant les déroulements de ces séances de classe, avec ce qui est officiellement recommandé, nous concluons que les situations de réussite sont passées de 0% à 88%. Plus encore, le gain de 60% de réussite affichée parmi l'ensemble des élèves, dans l'établissement du modèle analytique du temps  $t$ , en utilisant ModL2<sup>t</sup>, témoigne que ce modèle est mathématiquement abordable. Alors que le reste des élèves a des faiblesses conséquentes et résiduelles en mathématiques et en physique, imputables à leurs cursus scolaires.

Nous pouvons conclure donc, que l'enseignement-apprentissage du phénomène de la décroissance radioactive, a été considérablement amélioré, sous nos deux modèles ModLI et ModL2<sup>t</sup>. Nous pensons que ModLI et ModL2<sup>t</sup>, sont deux nouveaux modèles et exemples d'actions qui pourront contribuer à l'atténuation des difficultés inhérentes à l'application des mathématiques en classe de physique.

Certes, la physique a beaucoup tiré profit du développement des méthodes mathématiques spécifiques aux problèmes physiques. De même, les mathématiques ont connu des développements grâce aux problématiques que suscitent certains domaines de recherche en physique.

## REFERENCES

- Ahaji, K., El Hajjami, A., Lotfi, A., EL MOKRI, A., & CHIKHAOUI, A. (2007). L' évaluation des produits multimédias : « Un processus méthodologique complexe ». *TICE et Didactique II*, 1–15.
- Aissaoui, A. (2010). *Contribution à la modélisation des frottements en Élaboration , expérimentation et évaluation d' un nouveau modèle : diagramme de frottement de glissement ( DFG )*. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah.
- Alcaras, J. (2011). Les théories économiques de la décision à l'épreuve de la quantification – Quand symboliser n'est pas forcément quantifier! *Les Théories Économiques de La Décision à l'épreuve de La Quantification – Quand Symboliser n'est Pas Forcément Quantifier!*, 6(2). Retrieved from <https://www.erudit.org/fr/revues/nps/2011-v6-n2-nps1817572/1005774ar.pdf>
- Artigue, M. (1989). Ingénierie didactique. *Vème École d'été de Didactique Des Mathématiques et de l'informatique Publications de l'Institut de Recherche Mathématiques de Rennes*, 124–128.
- Asp, A. scolaire personnalisée. (2015). La décroissance radioactive du carbone 14. Retrieved August 26, 2015, from [https://www.assistancescolaire.com/enseignant/elementaire/ressources/base-documentaire-en-sciences/la-decroissance-radioactive-du-carbone-14-t\\_t103i03](https://www.assistancescolaire.com/enseignant/elementaire/ressources/base-documentaire-en-sciences/la-decroissance-radioactive-du-carbone-14-t_t103i03)
- Bakaç, M., Taúr÷lu, A. K., & Uyumaz, G. (2011). Modeling radioactive decay, *15*, 2196–2200. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.079>
- Bangou, F. (2006). Intégration des Tice et apprentissage de l'enseignement : une approche systémique. *Alsic*, (Vol. 9), 145–160. <https://doi.org/10.4000/alsic.290>
- Barrette, C. (2009). Métarecherche sur les effets de l'intégration des TIC en pédagogie collégiale. *International Journal of Technologies in Higher Education*, 6. <https://doi.org/10.7202/1000008ar>
- Beaufils, D. (1999). L' EXPERIMENTAL DANS LA CLASSE. *Aster*, 28, 1–6. Retrieved from [http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/8713/ASTER\\_1999\\_28\\_3.pdf?sequence=1](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/8713/ASTER_1999_28_3.pdf?sequence=1)
- Bednarz, N., & Perrin-Glorian, M.-J. (2003). Formation à l'enseignement des mathématiques et développement de compétences professionnelles : articulation entre formation mathématique, didactique et pratique. In *Université du Québec à Montréal et Université Paris 7* (pp. 1–42). Retrieved from [http://emf.unige.ch/files/6014/5459/4120/EMF2003\\_Conference\\_Bednarz.pdf](http://emf.unige.ch/files/6014/5459/4120/EMF2003_Conference_Bednarz.pdf)
- BENSAUDE VINCENT, B. (2005). Paul Langevin : L'histoire des sciences comme remède à tout dogmatisme / Paul Langevin : History of science as a remedy for every dogmatism. *Revue d'histoire Des Sciences*, 58(2), 311–328. <https://doi.org/10.3406/rhs.2005.2251>
- Bernard, C. (1865). Introduction à l'étude de la médecine expérimentale. Retrieved from <http://www.gutenberg.org/cache/epub/16234/pg16234-images.html>
- Bernard, F., & Ailincal, R. (2012). De l' introduction des TICE à l' École aux pratiques actuelles des jeunes: Approche historique des technologies de l'information et de la communication. Raisons, comparaisons, éducations. *La Revue Française d'éducation Comparée*, 215–226.
- Berthet, V. (2011). Cours de Psychologie - Le Cognitivism (1-7). Retrieved November 11, 2014, from <https://studylibfr.com/doc/3014363/psybox.fr>
- BiostaTGV. (2000). Test du Chi2. Retrieved April 23, 2016, from <https://marne.u707.jussieu.fr/biostatgv/?module=tests/chideux>
- Blanchin, M. (2010). Validation des méthodes d'analyse. *Institut Des Biomolécules , Université Montpellier 1*, 1–40. Retrieved from [http://applis.cermav.cnrs.fr/ANGD\\_qualite\\_en\\_chimie/Blanchin2.pdf](http://applis.cermav.cnrs.fr/ANGD_qualite_en_chimie/Blanchin2.pdf)
- Brousseau, G. (1989). *Construction des savoirs , Obstacles et Conflits. Les obstacles épistémologiques et la didactique des mathématiques*. (C. L. éditions A. d'Arc Inc., Ed.) (1989th ed.).
- CHARUAU, J., LABED, V., ROBÉ1, M. C., THÉ VENIN, J. C., AUBERT, C., FAZILEABASSE3, J., ... TYMEN, G. (1996). Manifestation la radioactivité du Radon 222 dans la nature. *Radioprotection*, 31(3), 371–388. Retrieved from <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQZwIjnPb1H6AjGVUZEiwXzN7eZn0EVXAVZbNR8a4IZhB>

F9mkCbaA

- Chemsi, G., Radid, M., Sadiq, M., & Talbi, M. (2011). Conception et validation d'un outil informatisé pour l'évaluation des enseignements et des formations à distance par les étudiants : EVAL-EFDE. *Radisma*, 7, 1–15. Retrieved from [http://ifgu.auf.org/media/document/Chemsi\\_Radisma7.pdf](http://ifgu.auf.org/media/document/Chemsi_Radisma7.pdf)
- Chômât, A., & Larcher, C. (1988). MODELE PARTICULAIRE ET ACTIVITES DE MODELISATION EN CLASSE DE QUATRIEME. *Aster*, 7. Retrieved from [http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/9222/ASTER\\_1988\\_7\\_143.pdf?sequence=1](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/9222/ASTER_1988_7_143.pdf?sequence=1)
- Coen, P., & Schumacher, J. (2006). Construction d'un outil pour évaluer le degré d'intégration des TIC dans l'enseignement. *Revue Internationale Des Technologies En Pédagogie Universitaire*, 3(3), 7–17. Retrieved from <https://edutice.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/194346/filename/coen.pdf>
- Conseil Supérieur de l'Éducation de la Formation et de la Recherche Instance Nationale d'Évaluation du Système d'Éducation de Formation et de la Recherche Scientifique Royaume du Maroc. (2015). *RÉSULTATS DES ÉLÈVES MAROCAINS EN MATHÉMATIQUES ET EN SCIENCES DANS UN CONTEXTE INTERNATIONAL*. (TIMSS, Ed.). Retrieved from <http://www.csefrs.ma/wp-content/uploads/2018/06/TIMSS-Version-Fr-26-05-2018.pdf>
- Coquidé, M. (1998). LES PRATIQUES EXPERIMENTALES : PROPOS D'ENSEIGNANTS ET CONCEPTIONS. *ASTER*, 26. Retrieved from [http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/8694/ASTER\\_1998\\_26\\_109.pdf?sequence=1](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/8694/ASTER_1998_26_109.pdf?sequence=1)
- Develay, M. (1989). Sur la methode experimentale. *Aster*, 8. Retrieved from [http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/9152/ASTER\\_1989\\_8\\_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/9152/ASTER_1989_8_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Direction des programmes Ministère de l'éducation nationale et de l'enseignement supérieur et de la formation des cadres et de la recherche scientifique Royaume du Maroc. (2007a). *Instructions pédagogiques et programmes spécifiques de l'enseignement de la physique et de la chimie au cycle secondaire qualifiant*. Retrieved from [https://waliye.men.gov.ma/Ar/curriculum1/Documents/curr\\_progr Physique et Chimie.pdf](https://waliye.men.gov.ma/Ar/curriculum1/Documents/curr_progr Physique et Chimie.pdf)
- Direction des programmes Ministère de l'éducation nationale et de l'enseignement supérieur et de la formation des cadres et de la recherche scientifique Royaume du Maroc. (2007b). *Instructions pédagogiques et programmes spécifiques de l'enseignement des mathématiques au cycle secondaire qualifiant*. Retrieved from [https://waliye.men.gov.ma/Ar/curriculum1/Documents/curr\\_progr Mathématiques.pdf](https://waliye.men.gov.ma/Ar/curriculum1/Documents/curr_progr Mathématiques.pdf)
- Douady, R. (1994). Ingénierie didactique et évolution du rapport au savoir. *Repères IREM*, 15, 37–61. Retrieved from [http://www.cndp.fr/entrepot/fileadmin/docs/education\\_prioritaire/Maths\\_et\\_ZEP/reperes15rd.pdf](http://www.cndp.fr/entrepot/fileadmin/docs/education_prioritaire/Maths_et_ZEP/reperes15rd.pdf)
- Duhem, P. (1989). La théorie physique: son objet, sa structure. *L'histoire Des Sciences*. Retrieved from <https://books.openedition.org/enseditions/6921?lang=fr#tocfrom1n1>
- Duval, R. (1993). Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives*. Retrieved from [https://mathinfo.unistra.fr/fileadmin/upload/IREM/Publications/Annales\\_didactique/vol\\_05/adsc5\\_1993-003.pdf](https://mathinfo.unistra.fr/fileadmin/upload/IREM/Publications/Annales_didactique/vol_05/adsc5_1993-003.pdf)
- Duval, R. (1995). Quel cognitif retenir en didactique des mathématiques. In *Actes de la VIIIe École d'été de Didactique des Mathématiques* (pp. 198–214). Retrieved from <http://publimath.irem.univ-mrs.fr/biblio/AAR99020.htm>
- Edge, R. D. (1978). Radioactive Decay-An Analogy. In *The Physics Teacher* (pp. 445–458). <https://doi.org/10.1119/1.2340024>
- EDP-Sciences. (2015). Famille radioactive de l'uranium 238. Retrieved August 26, 2015, from <https://encrypted->

tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRittVqe\_JCTAahQ1u80blbGEPKg2haYmAYcqIkWOZa6z9bvsKk

- El BACHARI, E., El Hassan, A., & EL-ADNANI, M. (2010). Projet d'innovation techno pédagogique dans l'enseignement secondaire au Maroc retour d'expérience. *Radisma*, 6. Retrieved from <http://www.radisma.info/document.php?id=1096>
- Elouidadi, O., Essafi, K., Aboutayeb, M., Sendide, K., & Depiereux, E. (2011). Analyse d'attitudes et des besoins d'enseignant marocains en TICE: Cas de l'académie (AREF) de FES-Boulemane, Maroc. *Radisma*, 7, 1–15. Retrieved from [https://pure.fundp.ac.be/ws/files/13292239/Ouidadi\\_Radisma7.pdf](https://pure.fundp.ac.be/ws/files/13292239/Ouidadi_Radisma7.pdf)
- Fried, J.-B. (2012). Compteur Geiger détecteur de radioactivité. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=wCm5Stl4XTg>
- Grau, H. (2000). L'enseignement des sciences physiques fut-il révolutionnaire ? *Annales Historiques de La Révolution Française*, 320, 149–158. <https://doi.org/10.4000/ahrf.157>
- Guenoun, B., & Benjelloun, N. (2014). How university students perceive the integration of ICT in their physics courses. *Journal of Research & Method in Education (IOSR-JRME)*, 4(4), 1–8.
- Guenoun, B., & Benjelloun, N. (2015). Perceptions of the first-year university students of the use of ICT in the teaching of physics: case of a course of electricit. *International Journal of Research in Education Methodology*, 7(3), 1182–1194. <https://doi.org/10.1.1.877.9056>
- Hasni, A., Lenoir, Y., Larose, F., & Squalli, H. (2010). *INTERDISCIPLINARITÉ ET ENSEIGNEMENT DES SCIENCES, TECHNOLOGIES ET MATHÉMATIQUES AU PREMIER CYCLE DU SECONDAIRE : PLACE; MODALITÉS DE MISE EN OEUVRE; CONTRAINTES DISCIPLINAIRES ET INSTITUTIONNELLES*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/273630741\\_Interdisciplinarite\\_et\\_enseignement\\_d\\_es\\_sciences\\_technologies\\_et\\_mathematiques\\_au\\_premier\\_cycle\\_du\\_secondaire\\_place\\_modalites\\_de\\_mise\\_en\\_oeuvre\\_contraintes\\_disciplinaires\\_et\\_institutionnelles](https://www.researchgate.net/publication/273630741_Interdisciplinarite_et_enseignement_d_es_sciences_technologies_et_mathematiques_au_premier_cycle_du_secondaire_place_modalites_de_mise_en_oeuvre_contraintes_disciplinaires_et_institutionnelles)
- Host, V. (1989). Systèmes et modèles : quelques repères bibliographiques. *Aster*, (8), 187–210. Retrieved from <http://ife.ens-lyon.fr/publications/edition-electronique/aster/RA008-09.pdf>
- Hughes, E. A., & Zalts, A. (2000). Radioactivity in the Classroom. *Journal of Chemical Education*, 77(5), 6–7.
- Jesse, K. E. (2003). Computer Simulation of Radioactive Decay. *The Physics Teacher*, 542, 9–11. <https://doi.org/10.1119/1.1631626>
- Johsua, S. (1989). Le rapport à l'expérimental dans la physique de l'enseignement secondaire. *Aster*, 8, 29–53.
- Kastler, M. A. (1977). Ampère et les lois de l'électrodynamique. *Revue d'histoire Des Sciences*, 2(30), 143–157. <https://doi.org/https://doi.org/10.3406/rhs.1977.1477>
- Kheraz, S., & El Hajjami, A. (2016). Comment un MOOC peut contribuer au développement des compétences ? Cas du dispositif MOOCGenieTICE : Développement des compétences des enseignants en matière de l'intégration des TICE. *Association EPI*. Retrieved from <https://www.epi.asso.fr/revue/articles/a1610c.htm>
- Klein, L., & Kagan, D. (2010). "Radio - Active" Learning : Visual Representation of Radioactive Decay Using Dice. *The Physics Teacher*, 45, 5–6. <https://doi.org/10.1119/1.3274361>
- Kuhn, T. S. (1975). Tradition mathématique et tradition expérimentale dans le développement de la physique. *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, 30(5), 975–998. <https://doi.org/10.3406/ahess.1975.293659>
- Lapp, D. R. (2010). Obtaining and Investigating Unconventional Sources of Radioactivity. *The Physics Teacher*, 90, 10–13. <https://doi.org/10.1119/1.3293653>
- Larose, F., Grenon, V., & Palm, S. B. (2004). *Enquête sur l'état des pratiques d'appropriation et de mise en oeuvre des ressources informatiques par les enseignantes et les enseignants du Québec (première partie): L'analyse des données par questionnaire*. <https://doi.org/10.13140/2.1.4357.9685>
- Latouche, D. (2015). La pédagogie inversée. Retrieved from <https://phychim.ac-versailles.fr/spip.php?article925>

- Le Roux, R. (2009). L'impossible constitution d'une théorie générale des machines ? La cybernétique dans la France des années 1950. *Revue de Synthèse, Springer Verlag/Lavoisier*, 130(1), 5–36.
- Legendre, M.-F. (1994). Problématique de l'apprentissage et de l'enseignement des sciences au secondaire : un état de la question. *Revue Des Sciences de l'éducation*, 20(4), 657. <https://doi.org/10.7202/031761ar>
- Legrand, M. (1990). Du behaviorisme au cognitivisme. *L'année Psychologique*, 90, 247–286. Retrieved from [https://www.persee.fr/docAsPDF/psy\\_0003-5033\\_1990\\_num\\_90\\_2\\_29399.pdf](https://www.persee.fr/docAsPDF/psy_0003-5033_1990_num_90_2_29399.pdf)
- Lerouge, A. (1992). *Représentation cartésienne, rationalité mathématique et rationalité du quotidien chez des élèves de collège*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II. Retrieved from <http://www.sudoc.abes.fr/xslt/DB=2.1//SRCH?IKT=12&TRM=01214018X&COOKIE=U10178,Klecteurweb,I250,B341720009+,SY,NLECTEUR+WEBOPC,D2.1,E4d7f2365-305,A,H,R160.179.79.103,FY>
- LÉVY-LEBLOND, J.-M. (2014). Physique et mathématique. Retrieved from <http://www.universalis.fr/encyclopedie/physique-physique-et-mathematique/>
- Lycée Jean Mermoz - Saint Louis - Haut Rhin France. (2015). Radioactivité et réactions nucléaires - TP activité du granite. Retrieved from [http://physicus.free.fr/premiere\\_S/1S-CHAP-08-radioact-reac-nuc.php](http://physicus.free.fr/premiere_S/1S-CHAP-08-radioact-reac-nuc.php)
- Malafosse, D. (2003). Pour une formation inter - didactique Mathématiques - Physique des professeurs de collège et de lycée. *Tréma*, 20–21, 187–209. Retrieved from <https://journals.openedition.org/trema/1480>
- Malafosse, D., Lerouge, A., & Dusseau, J. (2000). Étude en inter-didactique des mathématiques et de la physique de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : espace de réalité. *Didaskalia*, 16, 81–106.
- Malafosse, D., Lerouge, A., & Dusseau, J. (2001). Étude en inter-didactique des mathématiques et de la physique de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : changement de cadre de rationalité. *Didaskalia*, 18, 61–98. Retrieved from [http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/23903/DIDASKALIA\\_2001\\_18\\_61.pdf?sequence=1](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/23903/DIDASKALIA_2001_18_61.pdf?sequence=1)
- Malonga Mougabio, F., & Beaufile, D. (2010). Modélisation et registres sémiotiques : exemple d'étude de manuels de physique de terminale. *Rdst*, 1, 293–316. Retrieved from <http://rdst.revues.org/243>
- MAMANE, A., & BENJELLOUN, N. (2016a). Etude de l'interdépendance entre l'enseignement - apprentissage des sciences physiques et les infrastructures logistiques TICE à la disposition de lycéens marocains. In *Apel'2016 FST Fès: 2ème édition de la conférence international sur les Approches Pédagogique et E-Learning Communication à FST Fès*. Apel'2016 FST fès.
- MAMANE, A., & BENJELLOUN, N. (2016b). Pédagogie inversée et spectre des préférences des élèves marocains de la 2ème année du baccalauréat SVT et PC relatif à l'expérimentation, à la modélisation mathématique et à l'utilisation des TICE en cours de physique. In *CITI'3 UAI Ifrane:3rd edition, ICT study days, "E-Learning and Distance Education: Current Experiences and future Prospects"* 2016. Conférence TICE 3 UAI, Maroc.
- MAMANE, A., & BENJELLOUN, N. (2018a). Mathematical modeling, ICT and collaborative work in Moroccan high schools: From ModLet to ModL2t, experimentation of a semiotic set in the teaching and learning of the radioactive decay law. *IOSR Journal of Research & Method in Education (IOSR-JRME)*, 8(5), 32–40. <https://doi.org/10.9790/7388-0805023240>
- MAMANE, A., & BENJELLOUN, N. (2018b). Mathematical modeling, ICT and collaborative work in Moroccan high schools: From ModLet to ModL2t, experimentation of a semiotic set in the teaching and learning of the radioactive decay law. In *Apel'2018 FST Fès: 3ème édition de la conférence international sur les Approches Pédagogique et E-Learning*.
- MAMANE, A., & BENJELLOUN, N. (2018c). Modélisation mathématique, TICE, et travail collaboratif, et ordre de décroissance radioactive dans de l'enseignement-apprentissage de la loi de la décroissance radioactive au secondaire au Maroc. In *CITEF'2018 FSE Rabat, 2ème Colloque international sur les technologies en éducation et formation : Approches pédagogiques*

- innovantes et dispositifs didactiques*. Communication au CITEF'2018 FSE Rabat.
- MAMANE, A., & BENJELLOUN, N. (2018d). Modélisations mathématiques, TICE et travail collaboratif dans l'enseignement-apprentissage de la décroissance radioactive aux lycées du Maroc par le Modèle de Linéarisation par Intervalle ModLI". In *Workshop LIRDIST Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fés 2018*.
- MAMANE, A., & BENJELLOUN, N. (2018e). Study of the Dependence between the Teaching- Learning of Physics and the ICT Resources available to Pupils in Moroccan High Schools. *IJEIS International Journal of Education and Information Studies*, 8(1), 1–15. Retrieved from [http://www.ripublication.com/ijeis18/ijeisv8n1\\_01.pdf](http://www.ripublication.com/ijeis18/ijeisv8n1_01.pdf)
- MAMANE, A., & BENJELLOUN, N. (2019). Development and Experimentation of a New Mathematical Model for Teaching – Learning the Radioactive Decay Law. *Education Sciences*, 9, 1–19. <https://doi.org/10.3390/educsci9020123>
- Maouni, A., Mimet, A., Khaddor, M., Madrane, M., & Moumene, M. (2014). L' intégration des TIC dans l' enseignement des SVT au Maroc : réalité et attentes. *Radisma*, 10, 1–15.
- Maroc, H. au plan. (2016). *Femmes et Hommes en chiffres 2016*. Retrieved from <https://www.hcp.ma/region-drda/attachment/657245/>
- Martinand, J. (1987). *INTRODUCTION À LA MODÉLISATION*. Retrieved from <http://www.inrp.fr/Tecne/Rencontre/Univete/Tic/Pdf/Modelisa.pdf>
- Martinand, J. (1993). Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations ? *Didaskalia*, 2(février 1992), 89–99. <https://doi.org/10.4267/2042/20187>
- Marty, O. (2015). *Cours Ingénierie didactique*. Retrieved from <https://halshs.archives-ouvertes.fr/cel-01260590/document>
- Mastafi, M. (2013). Intégration et usages des TIC dans le système éducatif marocain : attitudes des enseignants de l'enseignement primaire et secondaire. *Adjectif.Net*, 1–7. Retrieved from <http://www.adjectif.net/spip/spip.php?article228>
- Mayrargue, A., & Savaton, P. (2006). Quels liens entre l'histoire des sciences, l'épistémologie et la didactique des disciplines ? *Tréma*, 26. <https://doi.org/10.4000/trema.98>
- MÉHEUT, M. (2005). L' Expérimental en Sciences physiques. Retrieved from <http://imss-www.upmf-grenoble.fr/prevert/SpecialiteDEMS/Cours 2009/UE-SPC-Experimental-2009.pdf>
- Miller, G. A. (2003). The cognitive revolution : a historical perspective. *TRENDS in Cognitive Sciences*, 7(3), 141–144. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00029-9)
- Ministère de l'éducation nationale et de la jeunesse France. (2002). Baccalauréat des voies générale et technologique Épreuve de physique-chimie de série S Physique , enseignement obligatoire : Décroissance radioactive du radon 220 DÉCROISSANCE RADIOACTIVE DU RADON 220, 0–7. Retrieved from [http://cache.media.eduscol.education.fr/file/Lyce/82/7/radon220\\_111827.pdf](http://cache.media.eduscol.education.fr/file/Lyce/82/7/radon220_111827.pdf)
- OMNÈS, R. (2014). PHYSIQUE-Les fondements et les méthodes. Retrieved August 1, 2014, from <http://www.universalis.fr/encyclopedie/physique-les-fondements-et-les-methodes/>
- Orlandi, É. (1991). CONCEPTIONS DES ENSEIGNANTS SUR LA DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE Analyse de quelques cas à propos de digestion en classe de troisième. *Aster*, 13. Retrieved from [http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/9099/ASTER\\_1991\\_13\\_111.pdf?sequence=1](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/9099/ASTER_1991_13_111.pdf?sequence=1)
- Piaget, J. (1967). logique et connaissances scientifiques. In E. de la Pléiade (Ed.), *logique et connaissances scientifiques, Encyclopédie de la Pléiade*. Encyclopédie de la Pléiade. Retrieved from <http://www.edenlivres.fr/o/42/p/6425/excerpt>
- Puren, C. (1999). La didactique des langues-cultures étrangères : entre méthodologie et didactologie. *Les Langues Modernes*, 3, 26–41. Retrieved from [https://www.aplv-languesmodernes.org/docrestreint.api/1926/fec49a6b534a98737230d5e97a6f5d25138a276a/pdf/1999\\_3\\_puren.pdf](https://www.aplv-languesmodernes.org/docrestreint.api/1926/fec49a6b534a98737230d5e97a6f5d25138a276a/pdf/1999_3_puren.pdf)
- Riopel, M., Potvin, P., & Raïche, G. (2008). Évaluation informatisée des cheminements d' apprentissage de la modélisation scientifique. *REVUE DE L'ÉDUCATION À DISTANCE*, 22(2), 81–92.
- Robardet, G. (1998). La Didactique Dans La Formation Des Professeurs De Sciences Physiques Face

- Aux Représentations Sur L'Enseignement Scientifique. *Aster*, 26.  
<https://doi.org/10.4267/2042/8691>
- Rocheleau, J. (2009). *Les théories cognitivistes de l'apprentissage*. Retrieved from  
[https://oraprdnt.uqtr.quebec.ca/pls/public/docs/GSC332/F766183874\\_Approche\\_cognitiviste\\_apprentissage2009\\_10\\_05.pdf](https://oraprdnt.uqtr.quebec.ca/pls/public/docs/GSC332/F766183874_Approche_cognitiviste_apprentissage2009_10_05.pdf)
- Rosmorduc, J. (1987). L'HISTOIRE DE LA PHYSIQUE PEUT-ELLE ECLAIRER LES OBSTACLES EPISTEMOLOGIQUES ? *Aster*, 5, 117–142. <https://doi.org/https://doi.org/10.4267/2042/9233>
- Saltiel, E. (1994). Un enseignement concret et attractif de la physique doit-il être avant tout expérimental, théorique ? *Didaskalia*, 3, 15–25. Retrieved from [http://ife.ens-lyon.fr/publications/edition-electronique/didaskalia/INRP\\_RD03S\\_3.pdf](http://ife.ens-lyon.fr/publications/edition-electronique/didaskalia/INRP_RD03S_3.pdf)
- Schultz, E. (1997). Dice-Shaking as an Analogy for Radioactive Decay and First-Order Kinetics. *Journal of Chemical Education*, 74(4), 505–507.
- Siemens, G. (2005). Connectivism: A Learning Theory for the Digital Age. *International Journal of Instructional Technology and Distance Learning*, 1–8. <https://doi.org/10.1.1.87.3793>
- Skinner, B. F. (1979). Pour une science du comportement: le behaviorisme, 580–587. Retrieved from [https://www.persee.fr/docAsPDF/phlou\\_0035-3841\\_1971\\_num\\_69\\_4\\_5638.pdf](https://www.persee.fr/docAsPDF/phlou_0035-3841_1971_num_69_4_5638.pdf)
- Tiberghien, A. (1996). Construction of Prototypical Situations in Teaching, 100–114. Retrieved from [https://www.academia.edu/1391963/Tiberghien\\_A.\\_1996\\_.Construction\\_of\\_prototypical\\_situations\\_in\\_teaching\\_the\\_concept\\_of\\_energy.\\_In\\_G.\\_Welford\\_J.\\_Osborne\\_and\\_P.\\_Scott\\_Eds.\\_Research\\_in\\_science\\_education\\_in\\_Europe.\\_Current\\_issues\\_and\\_themes\\_pp.\\_100\\_114\\_.Lo](https://www.academia.edu/1391963/Tiberghien_A._1996_.Construction_of_prototypical_situations_in_teaching_the_concept_of_energy._In_G._Welford_J._Osborne_and_P._Scott_Eds._Research_in_science_education_in_Europe._Current_issues_and_themes_pp._100_114_.Lo)
- Tiberghien, Andrée. (1994). Johsua (Samuel) et Dupin (Jean- Jacques). — Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques. *Revue Française de Pédagogie*, 109(1), 155–156. Retrieved from [http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/rfp\\_0556-7807\\_1994\\_num\\_109\\_1\\_2533\\_t1\\_0155\\_0000\\_2](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/rfp_0556-7807_1994_num_109_1_2533_t1_0155_0000_2)
- Tolman, E. C. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, 55(4), 189–208.
- Vygotski, L. S. (1978). *Mind in society*. (H. U. Press, Ed.). Press, Harvard University. Retrieved from <http://ouleft.org/wp-content/uploads/Vygotsky-Mind-in-Society.pdf>
- Weil-barais, A., & Lemeignan, G. (1990). Apprentissage de Concepts en Mécanique et Modélisation de Situations Expérimentales. *European Journal of Psychology of Education*, 5(4), 391–392. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03173129>
- Zellweger, F. (2005). Overcoming Subcultural Barriers in Educational Technology Support. *18th Annual Conference of the Consortium of Higher Education Researchers*, 1–14. Retrieved from [https://www.alexandria.unisg.ch/29364/1/2005-08-05-subcultural\\_barriers\\_zellweger\\_final.pdf](https://www.alexandria.unisg.ch/29364/1/2005-08-05-subcultural_barriers_zellweger_final.pdf)



## ANNEXE

### 1. A propos des tests relatifs à l'élaboration du questionnaire

Auprès des élèves des deux classes (SVT et PC) de la 2<sup>ème</sup> année du baccalauréat du lycée Mohamed AJANA à Meknès, nous avons lancé un appel d'effectuer toutes sortes de recherches, sur le thème de la décroissance radioactive. Nous leur avons donné un rendez-vous. Nous l'avons saisi pour engager des entretiens, auprès des 20 élèves qui ont volontairement, répondu présent (13 de la branche SVT et 7 de la branche PC). Tous les entretiens ont été enregistrés, avec le consentement des élèves, et après avoir eu l'accord de l'administration du lycée. Après une semaine, nous avons organisé deux séances de travail. La première a été dédiée à une recherche internet libre en classe sur le thème de la décroissance radioactive. Le but est d'observer comment les élèves y procèdent-ils. Cette séance a duré une heure, sous l'encadrement de deux professeurs. Quant à la seconde, elle a été consacrée aux entretiens avec les mêmes 20 élèves sur leurs activités au compte de la classe inversée. Inspiré des observations de cette étape, nous avons pu définir les axes de notre questionnaire, et réaliser sa "version initiale". La "version finale" de ce questionnaire est le fruit de versions précédentes. En effet, la version initiale a fait l'objet d'un premier test. Il a été administré à 13 élèves de la branche SVT et 7 autres de la branche PC. A la suite de quoi, nous avons élaboré et soumis la version intermédiaire à trois professeurs titulaires des sciences physiques au secondaire qualifiant, et à quatre élèves. Cet enchaînement a conduit à l'élaboration de la dite "version finale" de notre questionnaire. Celui que nous avons administré aux 137 élèves (MAMANE & BENJELLOUN, 2018e).

### 2. Axes d'items du questionnaire

Dans la conception de notre questionnaire, nous nous sommes limités à la collecte d'informations sur les élèves, leurs relations avec la mobilisation des TICE, leurs préférences pour les démarches de modélisations, et leurs avis d'appréhender la mathématisation d'un contenu de la physique. En effet, nous avons pris pour cadre la collecte d'informations sur les axes suivants :

- les informations personnelles de l'élève (genre, branche, scolarité) ;
- les informations sur les structures scolaires et personnelles mises à la disposition de l'élève comme outils logistiques TICE (machines, connections, assistance,...), conditions d'accès aux matériels TICE des établissements scolaires et des domiciles des élèves;
- les préférences des élèves relatives aux sites pédagogiques et leurs contenus ;
- préférences des élèves sur les conditions d'intégration des TICE dans l'enseignement et l'apprentissage de la décroissance radioactive ;
- Les conceptions des élèves sur le déroulement du processus d'élaboration de modèles et de la modélisation mathématique en physique ;
- les élèves et leurs relations avec la mobilisation des TICE (en physique et particulièrement pour la décroissance radioactive) en présentiel et en classe inversée ;
- Comment les élèves préfèrent-ils construire le concept de modélisation et de model? (établir des lois, des schémas, ...) ;
- Explorer la démarche expérimentale et/ou la mathématisation que préconisent les élèves. L'utilisation des outils mathématiques dans l'exploitation des données à partir des objets (mathématiques ou non) issues d'une démarche empirique en sciences physiques et lors de la décroissance radioactive ;
- Expliciter les conceptions des élèves sur la différence ou la diversité, et l'inter-connectivité des registres et cadres utilisés habituellement en mathématiques et ceux préconisés en sciences physiques et lors de la décroissance radioactive ;
- La conceptualisation phénoménologique concrète en sciences physiques et abstraite en mathématique sur la décroissance radioactive. Du concret à l'abstrait et vis versa ;
- Mettre en évidence la relation de cause à effet entre les variations des grandeurs physiques mises en jeu lors de la décroissance radioactive : préférences des élèves entre l'introduction du modèle de la loi de la

décroissance radioactive et son élaboration mathématique, préférences des élèves entre l'introduction de trois autres formes analytiques de la loi de la décroissance radioactive et leurs élaborations mathématiques.

### 3. Le questionnaire

#### استمارة المشاركة الفردية في بحث علمي

تلميذنا، شاكرًا لك مسبقًا مشاركتك في بناء أحد أركان بحث تربوي أكاديمي، نوجه إليك هذه الإستمارة قصد ملئها بشكل فردي و بكل تجرد، دون وضع أية إشارة أو إسم يمكن أن يدل عليك .

إن الهدف من هذه الإستمارة ليس هو اختبار معلوماتك ولا تقييمها بأي شكل من أشكال التنقيط، ولكن الهدف هو محاولة التوصل إلى طرائق لتيسير التعليم و التعلم.

إن اتباعك لتعليمات الإستمارة ليجود في صلب مساهمتك القيمة هذه. نجاح هذا البحث برمته لا يتم إلا بإنجاحك عملية ملئ هذه الإستمارة بالجدية و الموضوعية المرجوتان.

هذه الإستمارة فردية في إطار بحث علمي هدفه المساهمة في تطوير التعليم و التعلم  
شكرًا على ملئها بكل عناية و تجرد

في غياب أي توجيه استثنائي، المرجو الجواب على الإقتراحات أسفله بوضع العلامة (x) في الخانة المناسبة للجواب الصحيح في نصرك :

تلميذة	تلميذ	الثانية باك ع ح أ (SVT)	الثانية باك ع ف (PC)	لا أكرر السنة الثانية باكوريا	نعم أكرر السنة الثانية باكوريا

#### 1. معلومات حول استعمالك للتكنولوجيات الحديثة للإتصال و التواصل :

- تتوفر ثانويتنا على ربط بشبكة الإنترنت : نعم  لا  لا أعلم
- يتوفر مختبر الفيزياء بثانويتنا على ربط بشبكة الإنترنت : نعم  لا  لا أعلم
- أتوفر على هاتف ذكي : نعم  لا  أحيانا
- أتوفر على ربط بشبكة الإنترنت بالمنزل : نعم  لا  أحيانا
- أستكمل تحصيلي الدراسي في الفيزياء، بارتباطي بشبكة الإنترنت لمدة زمنية هي : h/.....  
و ذلك بتوجيه من الأستاذ : دائما  غالبا  أحيانا  أبدا
- في شأن استكمال تحصيلي الدراسي في الفيزياء، أرتبط بشبكة الإنترنت من أجل الإطلاع على :  
(المرجو ترتيب اختيارك بدءا من الرقم 1، ممنوح منك للشيء الذي بسببه ترتبط أكثر بالإنترنت)

وثائق	صور لتجارب	تبيانات لتجارب	أفلام لتجارب	محاكاة لتجارب	تمارين	تمارين و حلول

- أجد ما أبحث عنه على : (المرجو ترتيب اختيارك بدءا من الرقم 1، ممنوح منك للموقع الأكثر زيارة)

يوتوب	فيس بوك	المنتديات	موقع إلكتروني	موقع إلكتروني
youtube	facebook	forum	موقع إلكتروني خاص و موثوق	موقع إلكتروني لثانوية مغربية

2. التحولات النووية صنفان، تلقائية و مفتعلة.

صحيح	خطأ	لا أعلم

3. افتراض : إذا زاد قدر كمية مادة مشعة فإن قدر نشاطها الإشعاعي (أي كمية الإشعاعات المنبعثة منها) :

يزيد	ينقص	يزيد و ينقص	لا يتغير

4. افتراض : إذا تغير نوع المادة المشعة فإن قدر نشاطها الإشعاعي :

يتغير	لا يتغير	قد يتغير

5. مع مرور الزمن، أفترض أن قدر كمية النشاط الإشعاعي لعينة من مادة مشعة يكون :

ثابتا	في تزايد	في تناقص	يزيد و ينقص عشوائيا

6. علما أنه يوجد قانون تخضع له تغيرات النشاط الإشعاعي لعينة مشعة بدلالة الزمن. أفترض أنه يمكن التوصل إلى تعبيره بالرموز عن طريق : (المرجو ترتيب المراحل حسب أنسب الأجوبة إليك بالأرقام ابتداء من 1)

الرجوع إلى	التحقق التجريبي عن طريق	التحقق بالرياضيات
أستاذ	تجربة القسم	عن طريق البرهنة
كتاب مدرسي	عرض فيديو للتجربة	
كتب أخرى موثوقة	عرض محاكاة للتجربة	عن طريق مسلمة
وثائق من مواقع الأنترنت الموثوقة	مشاهدة التجربة على مواقع الأنترنت الموثوقة	

شكرا على مساهمتكم

#### 4. Code source Python de SimulP200

```
from tkinter import Tk, Canvas, Frame, BOTH, Label, StringVar

from random import randint

from time import sleep

import numpy as np

dt=30

class Example(Frame):

    def __init__(self, n, m, size):

        super().__init__()
```

```

self.n = n

self.m = m

self.size = size

self.R = []

100) self.canvas = Canvas(self, width= 10 + self.n*self.size + 200 , height=10 + self.m*self.size +

self.t=0

self.T=np.arange(0,5520)

self.N=(1000*np.exp(-0.001*self.T)).astype('int')

self.initUI()

def initUI(self):

    self.master.title("")

    self.status_label=StringVar()

    self.status_label.set("Simulation de la décroissance radioactive du polonium 200 (demi-
vie:690s)\nChaque carreau orange est un noyau radioactif. En se désintégrant, il vire au vert")

    w3 = Label(self.master, textvariable=self.status_label,font=("Helvetica", 24))

    w3.pack()

    self.time_label=StringVar()

    self.time_label.set("t = %ds"%self.t)

    self.reds_label=StringVar()

    self.reds_label.set("N(t) =% d"%self.N[self.t])

    w = Label(self.master, textvariable=self.time_label,font=("Helvetica", 24))

    w.pack()

    w2 = Label(self.master, textvariable=self.reds_label,font=("Helvetica", 24))

    w2.pack()

    self.pack(fill=BOTH, expand=1)

    x = 10

    for i in range(self.n):

        y = 10

        for j in range (self.m):

            self.R.append(self.canvas.create_rectangle(x, y, x + self.size , y + self.size,
outline="#f00", fill="#fb0"))

            y = y + self.size

```

```

x = x + self.size

self.canvas.pack(fill=BOTH, expand=1)

def change (self):

    self.t=self.t+1

    self.time_label.set("t = %ds"%self.t)

    self.reds_label.set("N(t) = %d"%self.N[self.t])

    if(len(self.R)>self.N[self.t]):

        p = randint(0,len(self.R)-1)

        self.canvas.itemconfigure(self.R[p], fill="#0f0")

        self.R.pop(p)

root = Tk()

ex = Example(40, 25, 20)

for i in range(5520):

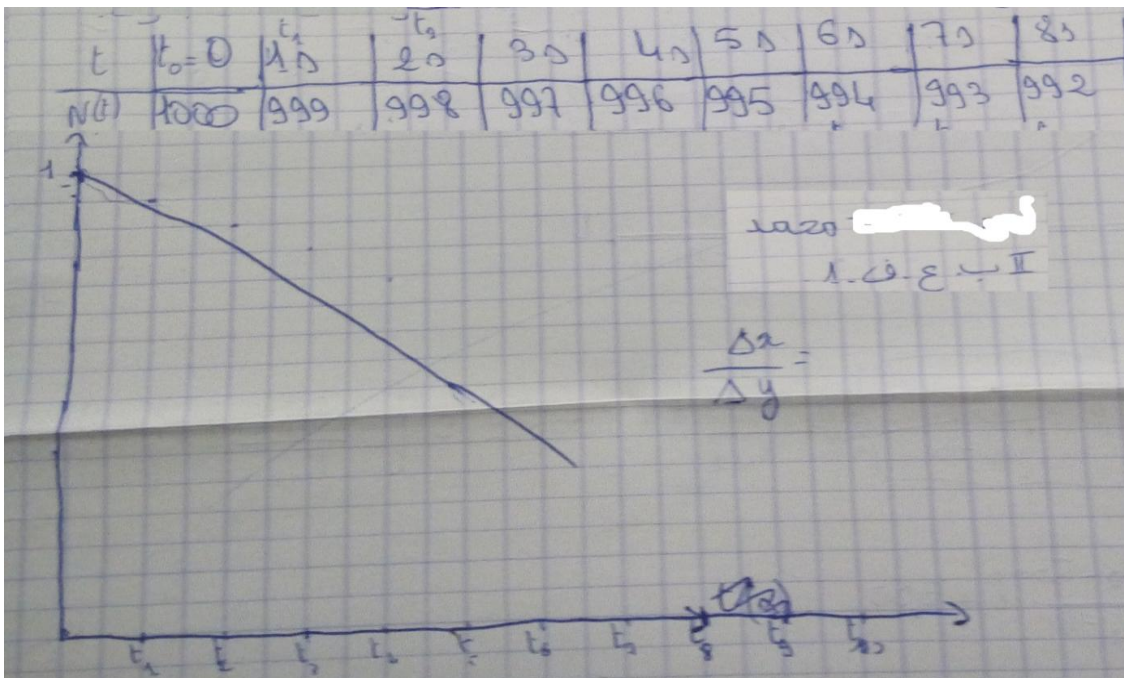
    ex.after(dt+i*dt, ex.change)

root.mainloop()

```

## 5. Exemples de productions des élèves au cours des tests

- Exemple 1 :





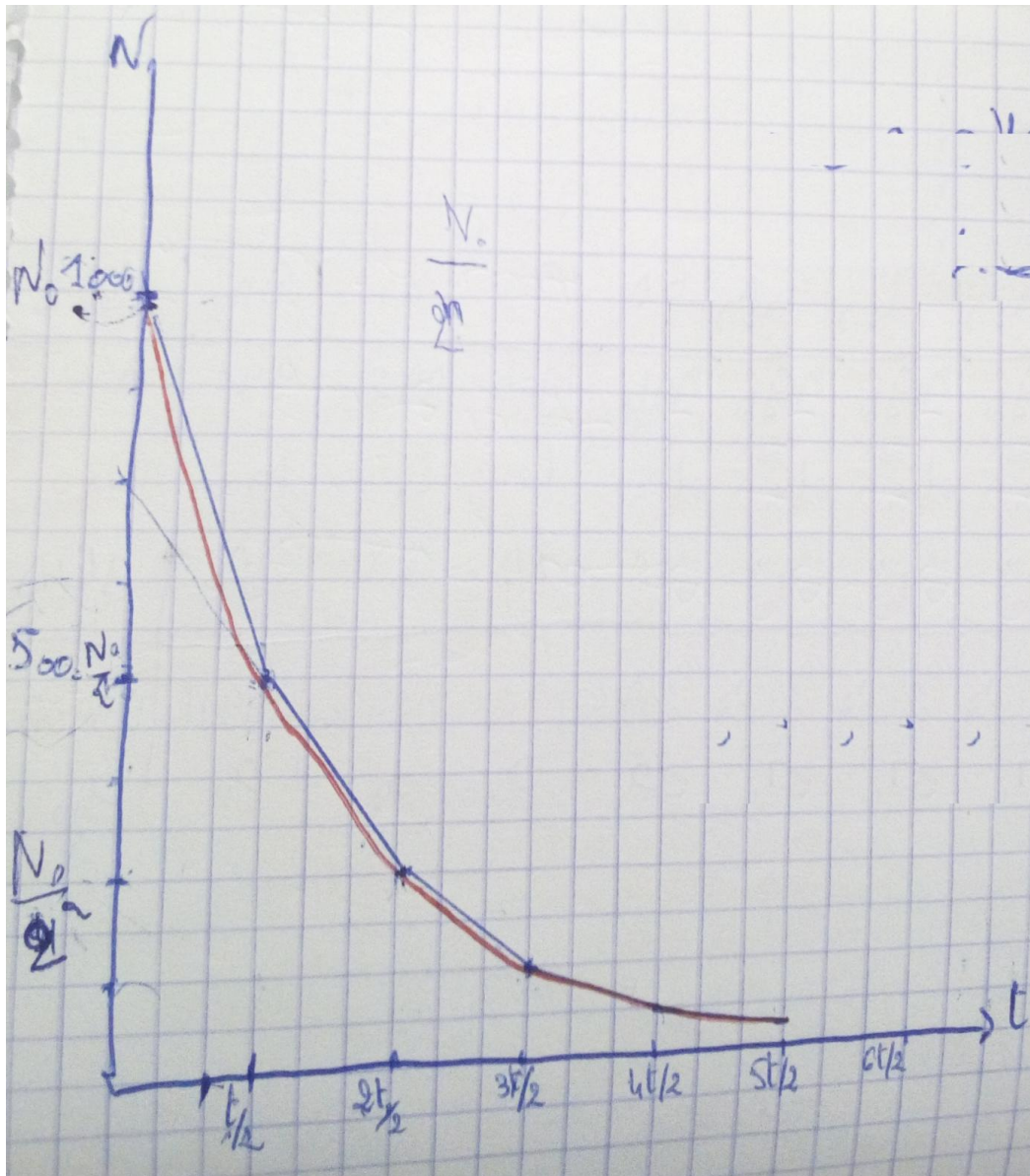
- Exemple 2:

<p>polylogarithme</p> <p>S.V.T</p>	$N$	$N_0 = 1000$	$\frac{N_0}{2}$	$\frac{N_0}{2^2}$	$\frac{N_0}{2^3}$	$\frac{N_0}{2^4}$	$\frac{N_0}{2^5}$	$15 \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 2 \end{array} \right.$
	$t$	$t_0 = 0$	$\frac{t+1}{2}$	$\frac{2t+1}{2}$	$\frac{3t+1}{2}$	$\frac{4t+1}{2}$	$\frac{5t+1}{2}$	

$N$	$\frac{N_0}{2^0}$	$\frac{N_0}{2^1}$	$\frac{N_0}{2^2}$	$\frac{N_0}{2^3}$	$\frac{N_0}{2^4}$	$\frac{N_0}{2^5}$	$\frac{N_0}{2^6}$
$t$	$t_0 = 0$	$\frac{t+1}{2}$	$\frac{2t+1}{2}$	$\frac{3t+1}{2}$	$\frac{4t+1}{2}$	$\frac{5t+1}{2}$	$\frac{6t+1}{2}$

- Exemple 3 :



- Exemple 4 :

$$\left( \frac{N_0}{2^n} \left( \frac{t}{t_{1/2}} + 2^n \right) \right)$$

$$\frac{N_0}{2^n} \left( \frac{t}{t_{1/2}} + \frac{2t_{1/2}}{t_{1/2}} \right)$$

$$[2t_{1/2}; 3t_{1/2}] : N(t) = \frac{185-250}{3t_{1/2}-2t_{1/2}} t + N_0 = \frac{N_0}{2^2} - \frac{N_0}{2^2} \frac{t}{t_{1/2}} = \frac{N_0}{2^2} \left( 2 - \frac{t}{t_{1/2}} \right)$$

$$[0; t_{1/2}] : N(t) = \frac{N_0}{2^1} - \frac{N_0}{2^1} \frac{t}{t_{1/2}} = \frac{N_0}{2^1} \left( 2 - \frac{t}{t_{1/2}} \right)$$

$$[t_{1/2}; 2t_{1/2}] : N(t) = \frac{N_0}{2^2} - \frac{N_0}{2^2} \frac{t}{t_{1/2}} = \frac{N_0}{2^2} \left( 2 - \frac{t}{t_{1/2}} \right)$$

$$[2t_{1/2}; 3t_{1/2}] : N(t) = \frac{N_0}{2^3} - \frac{N_0}{2^3} \frac{t}{t_{1/2}} = \frac{N_0}{2^3} \left( 4 - \frac{t}{t_{1/2}} \right)$$

$$N(t) = \frac{N_0}{2^n} \left[ (n+1) - \frac{t}{t_{1/2}} \right]$$

22/1/2016 صباح الاحد  
 تاسوعاء ابن الرومي II ع ف ا كتاب

- Exemple 5 :

$$N(t) = \frac{N_0}{2^n} \left[ (n+1) - \frac{t}{t_{1/2}} \right]$$

طابفة  
 الزهراس  
 SVT

$$2^n \times \frac{N(t)}{N_0} = (n+1) - \frac{t}{t_{1/2}}$$

$$\frac{t}{t_{1/2}} = (n+1) - 2^n \times \frac{N(t)}{N_0}$$

$$t = t_{1/2} \left[ (n+1) - 2^n \times \frac{N(t)}{N_0} \right]$$

- Exemple 6 :

$$a^x \times a^y = a^{x+y}$$

$$(a^x)^y = a^{x \cdot y}$$



- Exemple 7 :

$$N(t) = 2^{n_0} \times 2^{-t/4h}$$

$$2^n = 2^{n_0 - t/4h}$$

$$M = n_0 - t/4h$$

$$-t = (n_0 - M) \times 4h$$

- Exemple 8 :

PC ♀	Stie zis	mt <sub>112</sub>
$N = \frac{N_0}{2^t}$	$N = \frac{N_0}{2^t}$	$N = \frac{N_0}{2^{2m}}$

- Exemple 9 :

$$N(t) = \frac{N_0}{2^t} \left[ (1+t) - \frac{t}{4h} \right]$$

$$N(t) = \frac{N_0}{2^t} (1+t) - \frac{N_0}{2^t} \frac{t}{4h}$$

$$\frac{N_0}{2^t} \frac{t}{4h} = + \frac{N_0}{2^t} (1+t) / N(t)$$

$$\frac{t}{4h} = \frac{N_0/2^t (1+t)}{N_0/2^t}$$

$$t = \frac{N_0/2^t (1+t)}{N_0/2^t} \times \frac{1}{4h} \times \frac{t/4h}{N(t)}$$

$$t = \frac{N_0}{2^t} (1+t) \times \frac{2^t}{N_0} \times \frac{1}{4h} \times \frac{t/4h}{N(t)}$$

$$N(t) = \frac{N_0}{2^2} \left[ (2+t) - \frac{t}{4h} \right]$$

$$t = \frac{N_0}{2^2} (2+t) \times \frac{2^2}{N_0} \times \frac{t/4h}{N(t)}$$


---


$$N(t) = \frac{N_0}{2^3} (3+t) - \frac{N_0}{2^3} \frac{t}{4h}$$

$$\frac{N_0}{2^3} \frac{t}{4h} = \frac{N_0}{2^3} (3+t) - N(t)$$

$$t = \left[ \frac{N_0}{2^3} (3+t) - N(t) \right] \times \frac{2^3}{N_0} \times \frac{t/4h}{N(t)}$$

- Exemple 10 :

$$\} 3^{t/12}, 4^{t/12} \}$$

$$n = 4$$

$$N(t) = \frac{N_0}{2^4} \left[ (4+1) - \frac{t}{12} \right]$$

$$N(t+1) = \frac{N_0}{2^4} (4+1) - \frac{N_0}{2^4} \frac{t}{12}$$

$$\frac{N_0}{2^4} \frac{t}{12} = \frac{N_0}{2^4} (4+1) - N(t)$$

$$t = \left[ \frac{N_0}{2^4} (4+1) - N(t) \right] \times 12 \times \frac{2^4}{N_0}$$


---


$$\} n+1^{t/12}, n^{t/12} \}$$

$$n = n$$

$$N(t) = \frac{N_0}{2^n} \left[ (n+1) - \frac{t}{12} \right]$$

$$N(t+1) = \frac{N_0}{2^n} (n+1) - \frac{N_0}{2^n} \frac{t}{12}$$

$$\frac{N_0}{2^n} \frac{t}{12} = \frac{N_0}{2^n} (n+1) - N(t)$$

$$t = \left[ \frac{N_0}{2^n} (n+1) - N(t) \right] \times 12 \times \frac{2^n}{N_0}$$

- Exemple 11 :

$$N(t) = N_0 2^{-(t/12)} \quad \text{لدينا}$$

$$N(t) = 2^x \quad \text{و} \quad N_0 = 2^y \quad \text{نفس}$$

$$N(t) = 2^y 2^{-(t/12)}$$

$$= 2^y 2^{-(t/12)}$$

$$= y 2^{-(t/12)}$$

$$= y 2^x \quad \text{في} \quad t/12$$

$$t = t/12 (y - x)$$

- Exemple 12 :

$$2014 \text{ في شهر كانون الثاني}$$

$$a_n = 2^{-0,74} \quad \text{و} \quad a_0 = 1 \quad \text{و} \quad t_{N_n} = 6 \text{ h}$$

$$t = t_{N_n} (y - x)$$

$$a_0 2^{-t/t_{N_n}} = 2^{-0,74} a_0$$

$$-t/t_{N_n} = -0,74$$

$$t = 0,74 \times 6$$

ﻭﺻﻠﻰ ﺍﻟﻠﻪ ﻭﺳﻠﻢ ﻭﺑﺎﺭﻙ ﻋﻠﻰ ﻧﺒﻴﻨﺎ ﻣﺤﻤﺪ ﻭﻋﻠﻰ ﺍﻟﻪ ﻭﺻﺤﺒﻪ