

Université de Montréal

**Un paradigme d'expérimentation au laboratoire de sciences pour
l'identification et l'optimisation statistique d'un modèle algébrique par
interaction visuo-graphique**

**Par
Georges Touma**

**Département de didactique
Faculté des sciences de l'éducation**

**Thèse présentée à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)
en sciences de l'éducation option didactique**

octobre, 2006

© Georges Touma, 2006



LB

5

U57

2007

V.001

AVIS

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

**Université de Montréal
Faculté des études supérieures**

Cette thèse intitulée :

**Un paradigme d'expérimentation au laboratoire de sciences pour
l'identification et l'optimisation statistique d'un modèle algébrique par
interaction visuo-graphique**

Présentée par:

Georges Touma

A été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

**Gisèle Lemoyne
présidente-rapporteur**

**Pierre Nonnon
directeur de recherche**

**Jean Portugais
membre du jury**

**Laurencelle Louis
examineur externe**

**Camarero Ricardo
représentant du doyen de la FES**

RÉSUMÉ

Cette recherche de développement s'intéresse principalement à la modélisation algébrique des phénomènes physiques. Nous avons proposé et validé une méthode de Régression Graphico-Statistique (RGS) en sciences expérimentales qui permet de produire le modèle mathématique d'un phénomène physique. Cette méthode, que nous avons intégrée dans un environnement d'expérimentation assistée par ordinateur (ExAO), procède par itération visuelle et graphique. Elle permet non seulement d'ajuster n'importe quelle fonction algébrique sur un ensemble de points expérimentaux, mais aussi de l'optimiser, d'évaluer son erreur-type de prédiction et d'obtenir un critère scientifique pour rejeter les points singuliers ou aberrants. Nous avons montré que des élèves de niveau secondaire et collégial utilisant cette méthode ont pu compléter le cycle d'induction et de déduction en sciences expérimentales en effectuant non seulement une prédiction sous forme algébrique, linéaire ou non linéaire, mais aussi en associant à celle-ci une valeur d'incertitude.

Mots clés : phénomènes physiques, ExAO, induction, déduction, prédiction, modélisation algébrique, régression graphico-statistique (RGS), incertitude, erreur-type.

ABSTRACT

This developmental research pertains to algebraic modelling of physical phenomena. We developed and validated a method, Graphical-Statistical Regression (GSR), which allows for the adjustment of a mathematical model to a physical phenomenon in experimental sciences. This method proceeds by visual and graphical iterations. Additionally, it also allows for the modelization of a set of experimental points by any algebraic function and its optimization. Furthermore, it helps to evaluate the standard error of prediction of the model and to provide scientific criteria to reject singular points. We demonstrated that secondary and high-school level students, by using this method, can complete the cycle of logical induction and deduction in experimental sciences not only by setting up a linear or non-linear algebraic model, but also by giving a range of uncertainty of its fit to the data.

Keywords: physical phenomena, induction, deduction, prediction, algebraic modelling, Graphical-Statistical Regression (GSR), uncertainty, standard error.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES TABLEAUX	xvi
REMERCIEMENTS.....	xvii
INTRODUCTION	1
Chapitre 1: Problématique	3
1.1 Intentions des programmes des sciences	4
1.2 Une situation problématique.....	6
1.2.1.1 Problèmes liés à la modélisation mathématique en sciences expérimentales... 7	
1.2.1.2 L'absence d'outils mathématiques appropriés à la modélisation mathématique au secondaire et au collège	9
1.3 Élaboration de l'idée de solution	11
1.4 Les questions soulevées par cette recherche et l'idée de développement.....	14
Chapitre 2: Considérations théoriques	16
2.1 Registres sémiotiques au sens de Duval (1995).....	17
2.1.1 Formation de représentations dans un registre sémiotique	20
2.1.2 Activité de traitement.....	20
2.1.3 Activité de conversion	21
2.1.4 Conclusion	23
2.2 Cadre de rationalité.....	25
2.2.1 Instabilité des structures des registres sémiotiques lors d'un changement de cadre de rationalité à l'école secondaire et au collégial.....	28
2.2.2 Registres sémiotiques transversaux.....	30
2.2.3 Conclusion	31
2.3 Notion de modèle.....	32
2.3.1 Représentation, conception et concept.....	34
2.4 Modélisation scientifique.....	35
2.5 Modélisation didactique.....	39
2.5.1 Activité de construction inductive d'un modèle mathématique.....	41

2.5.2	Méthodes et outils en mathématiques appliquées pour l'activité inductive de construction d'un modèle	43
2.5.2.1	Modèle linéaire.....	43
2.5.2.2	Détermination graphique et visuelle avec ordinateur.....	43
2.5.2.3	Détermination graphique et visuelle de la meilleure courbe sans ordinateur ..	43
2.5.2.4	Limites et problèmes	44
2.5.2.5	Méthode des moindres carrés	45
2.5.2.6	Limites et difficultés de la méthode des moindres carrés.....	46
2.5.2.7	Conclusion.....	47
2.5.3	Activités déductives à partir du modèle mathématique	49
2.5.3.1	Détermination des incertitudes par la méthode des extrêmes dans la phase déductive.....	51
2.5.3.2	Quelques exemples impliquant des opérations et des fonctions très simples..	51
2.5.3.3	Limites et difficultés de la méthode des extrêmes.....	52
2.5.3.4	Détermination des incertitudes par le calcul différentiel dans la phase déductive.....	52
2.5.3.5	Limites et difficultés du calcul différentiel	52
2.5.3.6	Conclusion.....	54
2.5.4	Conclusion sur les activités cognitives d'interprétation inductive et déductive appliquées en sciences expérimentales.....	54
2.6	Applications pédagogiques assistées par ordinateur.....	55
2.6.1	Conclusion	59
2.7	Théorie des Situations Didactiques (TSD)	61
	Chapitre 3: Méthodologie	65
3.1	Recherche de développement technologique en éducation	66
3.1.1	Mise à l'essai fonctionnelle.....	68
3.1.2	Mise à l'essai empirique	69
3.1.3	Mise à l'essai systématique.....	71
	Chapitre 4: Modèle d'action et prototype	72
4.1	Fondements théoriques de l'idée de cette recherche.....	73
4.1.1	Construire et optimiser un modèle algébrique correspondant à un ensemble de points expérimentaux.....	73
4.1.2	Déterminer visuellement l'incertitude sur son modèle	75
4.2	Actions possibles dans l'environnement d'apprentissage d'ExAO	76

4.2.1	Actions possibles dans l'environnement d'apprentissage d'ExAO pour l'activité d'interprétation inductive	77
4.3	Prototype.....	77
4.3.1	Régression Graphico-Statistique (RGS)	78
4.3.2	Fenêtre Graphique.....	79
4.3.3	Fenêtre des écarts	80
4.4	Fenêtre d'histogramme	81
Chapitre 5: Mise à l'essai fonctionnelle.....		82
5.1	Évaluation de la conception de la méthode de RGS et son implantation informatique... 84	84
5.2	Déverminage du prototype (logiciel MicrolabExAO).....	90
5.3	Validation de contenu de la méthode de Régression Graphico-Statistique (RGS)... ..	91
5.3.1	Validation avec l'étude de la Pression de l'eau.....	91
5.3.1.1	Branchement du matériel à l'ordinateur	92
5.3.1.2	Préparation du logiciel.....	92
5.3.1.3	Expérimentation et acquisition de données	92
5.3.1.4	Modélisation algébrique de la pression de l'eau en fonction de la profondeur avec la méthode RGS.....	93
5.3.1.5	Modélisation algébrique de la pression de l'eau en fonction de la profondeur avec la méthode des moindres carrés	95
5.3.1.6	Comparaison des résultats des deux méthodes (RGS et moindres carrés avec Excel).....	96
5.3.2	Validation avec l'étude de la Chute libre.....	97
5.3.2.1	Branchement du matériel à l'ordinateur	97
5.3.2.2	Préparation du logiciel.....	97
5.3.2.3	Modélisation algébrique de la chute libre avec la méthode RGS.....	98
5.3.2.4	Modélisation algébrique de la chute libre avec la méthode des moindres carrés.....	111
5.3.2.5	Comparaison des deux méthodes (RGS et moindres carrés dans Excel).....	112
5.3.3	Validation avec l'étude de la loi des gaz parfaits.....	112
5.3.3.1	Branchement du matériel à l'ordinateur	112
5.3.3.2	Préparation du logiciel.....	112
5.3.3.3	Expérimentation et acquisition de données	113
5.3.3.4	Modélisation algébrique:	113

5.3.3.5	Modélisation algébrique de la loi des gaz parfaits avec la méthode RGS.....	114
5.3.3.6	Modélisation algébrique de la loi des gaz parfaits avec la méthode des moindres carrés.....	115
5.3.3.7	Comparaison des résultats des deux méthodes.....	117
5.3.4	Validation avec l'étude de la décharge d'un condensateur.....	118
5.3.4.1	Branchement du matériel à l'ordinateur.....	118
5.3.4.2	Préparation du logiciel.....	118
5.3.4.3	Expérimentation et acquisition de données de la décharge d'un condensateur.....	118
5.3.4.4	Modélisation algébrique.....	119
5.3.4.5	Modélisation algébrique de la décharge du condensateur avec la méthode RGS.....	119
5.3.4.6	Modélisation algébrique de la décharge du condensateur la méthode des moindres carrés.....	120
5.3.4.7	Comparaison des résultats des deux méthodes.....	122
5.3.5	Validation avec l'étude du mouvement pendulaire oscillatoire avec un amortissement visqueux.....	125
5.3.5.1	Branchement du matériel à l'ordinateur.....	125
5.3.5.2	Préparation du logiciel.....	125
5.3.5.3	Expérimentation et acquisition de données.....	125
5.3.5.4	Modélisation algébrique.....	126
5.3.5.5	Modélisation algébrique du mouvement pendulaire avec un frottement visqueux avec la méthode RGS.....	127
5.3.5.6	Modélisation algébrique du mouvement pendulaire avec un frottement visqueux en utilisant le logiciel Régressi.....	130
5.3.5.7	Comparaison des deux méthodes.....	132
5.4	Mise à l'essai fonctionnelle sur la conception didactique avec deux experts.....	132
Chapitre 6: Mise à l'essai empirique.....		134
6.1	Analyse et interprétation des résultats bruts des différents groupes du collège Marie de France.....	138
6.2	Analyse et interprétation des commentaires des groupes.....	140
6.2.1	Pour ce que les étudiants n'ont pas apprécié par rapport à Régressi.....	141
6.2.2	Pour ce que les élèves ont apprécié par rapport à Régressi.....	142

6.3	Limites de la mise à l'essai empirique.....	145
6.4	Conclusion	146
Chapitre 7: Résumé et conclusion		147
7.1	Résumé	148
7.2	Conclusion	150
Références.....		153
ANNEXE 1:Protocole d'expérimentation		a
ANNEXE 2:Questionnaire fourni aux experts		e
ANNEXE 3:Réponse du deuxième expert(Professeur en didactique).....		f
ANNEXE 4:Réponse du troisième expert (Professeur en sciences au secondaire).....		g
ANNEXE 5:Expert dans le domaine des régressions linéaires et non linéaires		h
ANNEXE 6:Analyse des données qui sont contenues dans le fichier .XAO des sujets.....		k
6.1	Analyse des données du groupe 1	k
6.1.1	Modélisation algébrique par le chercheur des données du groupe 1	k
6.1.2	Modélisation algébrique du groupe 1 avec la méthode RGS	l
6.1.3	Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 1	l
6.1.4	Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe1.....	l
6.2	Analyse des données du groupe 2.....	m
6.2.1	Modélisation algébrique des données du groupe 2 effectuée par le chercheur	m
6.2.2	Modélisation algébrique du groupe 2 avec la méthode RGS	n
6.2.3	Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 2	n
6.2.4	Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 2.....	n
6.3	Analyse des données du groupe 3.....	o
6.3.1	Modélisation algébrique des données du groupe3 effectuée par le chercheur	o
6.3.2	Modélisation algébrique du groupe 3 avec la méthode RGS	p
6.3.3	Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 3	p
6.3.4	Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 3.....	p
6.4	Analyse de données du groupe 4	q
6.4.1	Modélisation algébrique des données du groupe 4 effectuée par le chercheur	q
6.4.2	Modélisation algébrique du groupe 4 avec la méthode RGS	r

6.4.3	Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 4	r
6.4.4	Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 4.....	r
6.5	Analyse des données du groupe 5.....	s
6.5.1	Modélisation algébrique des données du groupe 5 effectuée par le chercheur	s
6.5.2	Modélisation algébrique du groupe 5 avec la méthode RGS	t
6.5.3	Tableau comparatif de la modélisation algébrique du groupe 5 et du chercheur	t
6.5.4	Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 5.....	t
6.6	Analyse des données du groupe 6.....	u
6.6.1	Modélisation des données du groupe 6 effectuée par le chercheur	u
6.6.2	Modélisation algébrique du groupe 6 avec RGS	v
6.6.3	Tableau comparatif de la modélisation algébrique de groupe 6 et du chercheur	v
6.6.4	Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 6.....	v
6.7	Analyse des données du groupe 7.....	w
6.7.1	Modélisation par le chercheur des données du groupe 7 effectuée par le chercheur.....	w
6.7.2	Modélisation algébrique du groupe 7 avec la méthode RGS	x
6.7.3	Tableau comparatif de la modélisation algébrique du groupe 7 et du chercheur.....	x
6.7.4	Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 7	x
6.8	Analyse des données du groupe 8.....	y
6.8.1	Modélisation algébrique des données du groupe8 effectuée par le chercheur	y
6.8.2	Modélisation algébrique des données du groupe 8 avec la méthode RGS	z
6.8.3	Tableau comparatif de la modélisation algébrique du groupe et du chercheur	z
6.8.4	Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 8... .	z
6.9	Analyse des données du groupe 9.....	aa
6.9.1	Modélisation des données du groupe 9 effectuée par le chercheur	aa
6.9.2	Modélisation algébrique du groupe 9 avec la méthode RGS	bb
6.9.3	Tableau comparatif de la modélisation algébrique du groupe 9 et du chercheur.....	bb
6.9.4	Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 9..	bb
6.10	Analyse des données du groupe 10.....	cc
6.10.1	Modélisation des données du groupe 10 effectuée par le chercheur	cc

6.10.2	Modélisation algébrique du groupe 10 avec la méthode RGS	dd
6.10.3	Tableau comparatif de la modélisation algébrique du groupe 10 et du chercheur.	dd
6.10.4	Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 10.....	dd
6.11	Analyse des données du groupe 11	ee
6.11.1	Modélisation des données du groupe 11 effectuée par le chercheur	ee
6.11.2	Modélisation algébrique des données du groupe 11.....	ff
6.11.3	Tableau comparatif de la modélisation algébrique du groupe 11 et du chercheur.	ff
6.11.4	Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 11.....	ff
6.12	Analyse des données du groupe 12.....	gg
6.12.1	Modélisation algébrique des données du groupe 12 effectuée par le chercheur	gg
6.12.2	Modélisation algébrique du groupe 12 avec la méthode RGS	hh
6.12.3	Tableau comparatif de la modélisation algébrique du groupe 12 et du chercheur.	hh
6.12.4	Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 12.	hh
ANNEXE 7: Commentaires des groupes.....		ii
ANNEXE 8: Mise à l'essai fonctionnelle (Étudiant de 2 ^{ième} année en génie logiciel).....		ll
ANNEXE 9: Mise à l'essai fonctionnelle : Experte en technologie éducationnelle.....		ppp
ANNEXE 10: Protocole de La Loi D'ohm pour les étudiants du secondaire 5.....		xxx
ANNEXE 11: Réponses et résultat du premier élève Du secondaire 5		zzz
ANNEXE 12: Réponses et résultat du Deuxième élève du secondaire 5		bbbb
ANNEXE 13: Réponses et résultat du troisième élève du secondaire 5.....		dddd
ANNEXE 14: Données brutes du phénomène de la pression de l'eau		ffff

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Instabilité des structures des registres sémiotiques	28
Figure 2: Registre sémiotique inter-cadre (Lerouge, 2000)	30
Figure 3: Cycle de modélisation en sciences expérimentales	36
Figure 4: Démarche scientifique selon Nonnon (1986)	37
Figure 5: Les activités mathématiques dans la démarche scientifique	38
Figure 6: Activité d'interprétation	41
Figure 7(a): Interprétation, Conversion et Traitement	42
Figure 8: Position en fonction du temps d'un mobile	44
Figure 9: Circuit électrique de la loi d'Ohm	49
Figure 10: Représentation graphique de la loi d'Ohm	50
Figure 11: Activités cognitives d'interprétation	54
Figure 12: Métaphore de la lunette cognitive de Nonnon (1986)	57
Figure 13: Modélisation et lunette cognitive de Nonnon (1999, p.337)	58
Figure 14: Méthodologie de Recherche et de Développement en éducation	67
Figure 15: Représentation graphique des données expérimentales de la Chute libre	74
Figure 16: Les fenêtres du module RGS	79
Figure 17: fenêtre graphique	80
Figure 18: Histogramme	84
Figure 19: Modélisation graphique et diagramme à bandes	87
Figure 20: Histogramme corrigé	88
Figure 21: Représentation graphique de la pression de l'eau en fonction de la profondeur	93
Figure 22: Modélisation algébrique de la pression de l'eau en fonction de la profondeur avec la méthode RGS	94
Figure 23: Modélisation algébrique de la pression de l'eau en fonction de la profondeur dans Excel	95
Figure 24: Distribution des écarts selon l'équation de la pression de l'eau en fonction de la profondeur calculée par Excel	96
Figure 25: Représentation graphique du mouvement d'un corps en chute libre	98
Figure 26: Choix de la parabole pour modéliser algébriquement les données du phénomène de la chute libre	99
Figure 27: Ajustement visuel de la parabole sur les données expérimentales du phénomène de la chute libre	100

Figure 28: Visualisation des écarts entre la parabole symbolique et les données expérimentales de la chute libre	101
Figure 29: Première réduction des écarts qui contribuent à la courbure dans la fenêtre des écarts, ce qui revient à ajuster la courbure de la fonction symbolique dans la fenêtre graphique.....	102
Figure 30: Réduction des écarts qui contribuent à la pente dans la fenêtre des écarts ce qui revient à éliminer la translation horizontale de la fonction théorique aux données expérimentales dans la fenêtre graphique	102
Figure 31: Réduction des écarts qui contribuent à la translation verticale des écarts ce qui revient à éliminer la translation verticale de la fonction théorique aux données expérimentales dans la fenêtre graphique	103
Figure 32 : Réduction de l'échelle des écarts entre la courbe symbolique et les données expérimentales de la chute libre (- 0.2% à 0.2%)......	104
Figure 33: Deuxième réduction des écarts qui contribuent à la courbure dans la fenêtre des écarts ce qui revient à ajuster la courbure de la fonction théorique dans la fenêtre graphique.	105
Figure 34: Deuxième réduction des écarts qui contribuent à la pente dans la fenêtre des écarts ce qui revient à éliminer la translation horizontale de la fonction théorique aux données expérimentales dans la fenêtre graphique	106
Figure 35 : Visualisation des écarts entre la fonction symbolique et les données expérimentales de la chute libre (de - 0.1% à 0.1%)......	107
Figure 36: Représentation de la distribution des écarts entre la fonction parabolique et les données expérimentales de la chute libre dont l'intervalle de la classe centrale est de 1% de l'échelle comme intervalle.....	108
Figure 37: Représentation de la distribution des écarts entre la fonction parabolique et les données expérimentales de la chute libre dont l'intervalle de la classe centrale à 0.00195% de l'échelle comme intervalle.....	109
Figure 38: Résultat final de la Modélisation algébrique de la chute libre en déterminant l'incertitude sur la prédiction avec le modèle trouvé (erreur-type).....	110
Figure 39: Modélisation algébrique dans Excel.....	111
Figure 40: Représentation graphique des données expérimentales du phénomène de la loi des gaz parfait.....	113
Figure 41: Résultat final de la modélisation algébrique des données expérimentales du phénomène de la loi des gaz parfaits avec la méthode RGS.....	115
Figure 42: Données brutes du phénomène de la loi des gaz parfaits dans Excel.....	116

Figure 43: Changement de Variable et Modélisation dans Excel des données expérimentales de la loi des gaz parfaits	117
Figure 44: Représentation graphique des données expérimentales du phénomène de la décharge du condensateur	119
Figure 45: Modélisation algébrique des données expérimentales de la décharge du condensateur avec la méthode RGS.....	120
Figure 46: Résultat de la modélisation algébrique par Excel des données expérimentales de la décharge d'un condensateur.....	121
Figure 47: Changement de variable et régression linéaire pour modéliser la décharge du condensateur dans Excel.....	122
Figure 48: Modélisation algébrique de la décharge du condensateur dans Excel en éliminant les points qui tendent vers l'asymptote.....	123
Figure 49: Résultat final de la modélisation algébrique des données expérimentales de la décharge du condensateur après l'élimination des points qui tendent vers l'asymptote.....	124
Figure 50: Représentation graphique des données expérimentales du mouvement pendulaire avec un amortissement visqueux.....	126
Figure 51: Ajustement visuel de la fonction exponentielle sur les sommets des données expérimentales du phénomène mouvement pendulaire avec frottement visqueux avec la méthode RGS.....	127
Figure 52: Ajustement visuel de la fonction sinusoïdale sur les données expérimentales en tenant compte seulement de la première amplitude avec la méthode RGS.	128
Figure 53: Modélisation avec la méthode RGS des données expérimentales du mouvement pendulaire avec un amortissement visqueux en multipliant la fonction exponentielle par la fonction sinusoïdale	129
Figure 54: Résultat final de la modélisation algébrique avec la méthode RGS des données expérimentales du mouvement pendulaire avec un frottement visqueux en déterminant l'incertitude de mesures avec le modèle trouvé (Erreur-type).....	130
Figure 55: Résultat de la modélisation algébrique des données expérimentales du mouvement pendulaire avec un frottement visqueux en utilisant le logiciel Régressi	131
Figure 56 : Modélisation algébrique par le chercheur des données du groupe 1	k
Figure 57 : Modélisation algébrique du groupe 1 avec la méthode RGS	l
Figure 58 : Modélisation algébrique des données du groupe 2 effectuée par le chercheur	m
Figure 59 : Modélisation algébrique du groupe 2 avec la méthode RGS	n
Figure 60 : Modélisation algébrique des données du groupe 3 effectuée par le chercheur	o

Figure 61 : Modélisation algébrique du groupe 3 avec la méthode RGS	p
Figure 62 : Modélisation algébrique des données du groupe 4 effectuée par le chercheur	q
Figure 63 : Modélisation algébrique du groupe 4 avec la méthode RGS	r
Figure 64 : Modélisation algébrique des données du groupe 5 effectuée par le chercheur	s
Figure 65 : Modélisation algébrique du groupe 5 avec la méthode RGS	t
Figure 66 : Modélisation des données du groupe 6 effectuée par le chercheur	u
Figure 67 : Modélisation algébrique du groupe 6 avec RGS	v
Figure 68 : Modélisation par le chercheur des données du groupe 7 effectuée par le chercheur ...	w
Figure 69 : Modélisation algébrique du groupe 7 avec la méthode RGS	x
Figure 70 : Modélisation algébrique des données du groupe 8 effectuée par le chercheur	y
Figure 71 : Modélisation algébrique des données du groupe 8 avec la méthode RGS	z
Figure 72 : Modélisation des données du groupe 9 effectuée par le chercheur	aa
Figure 73 : Modélisation algébrique du groupe 9 avec la méthode RGS	bb
Figure 74 : Modélisation des données du groupe 10 effectuée par le chercheur	cc
Figure 75: Modélisation algébrique du groupe 10 avec la méthode RGS	dd
Figure 76 : Modélisation des données du groupe 11 effectuée par le chercheur	ee
Figure 77 : Modélisation algébrique des données du groupe 11	ff
Figure 78 : Modélisation algébrique des données du groupe 12 effectuée par le chercheur	gg
Figure 79 : Modélisation algébrique du groupe 12 avec la méthode RGS	hh
Figure 80: Résultat de la modélisation algébrique du premier élève au secondaire 5	aaaa
Figure 81: Résultat de la modélisation algébrique du deuxième élève au secondaire 5	cccc
Figure 82: Résultat de la modélisation algébrique du troisième élève au secondaire 5	eeee

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Instabilité des structures des registres sémiotiques (Tiré de Malafosse D., 2002, p.64-65).....	29
Tableau 2: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique de tous les groupes.....	138
Tableau 3: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 1.....	l
Tableau 4: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 1.....	l
Tableau 5: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 2.....	n
Tableau 6: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 2.....	n
Tableau 7: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 3.....	p
Tableau 8: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 3.....	p
Tableau 9: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 4.....	r
Tableau 10: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 4.....	r
Tableau 11: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 5.....	t
Tableau 12: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 5.....	t
Tableau 13: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 6.....	v
Tableau 14: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 6.....	v
Tableau 15: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 7.....	x
Tableau 16: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 7.....	x
Tableau 17: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 8.....	z
Tableau 18: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 8.....	z
Tableau 19: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 9.....	bb
Tableau 20: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 9.....	bb
Tableau 21: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 10.....	dd
Tableau 22: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 10.....	dd
Tableau 23: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 11.....	ff
Tableau 24: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 11.....	ff
Tableau 25: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 12.....	hh
Tableau 26: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 12.....	hh

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier ma famille et Chantal pour leur amour, leur support et leur encouragement sans lesquels je n'aurais pas complété cette recherche. Je remercie aussi mon directeur de thèse Pierre Nonnon, dont l'aide et la vision de la didactique des sciences et des mathématiques, m'ont soutenu pour élaborer le sujet et la problématique de cette recherche. Je témoigne toute ma reconnaissance à mes collègues du laboratoire de robotique pédagogique, et plus particulièrement à Marthe, à Yves, à Isidore, à Pauline, à Claire et à Alice pour leur support durant mes premières années d'intégration au Québec. Je suis aussi reconnaissant à tous les élèves qui ont participé aux mises à l'essai et qui m'ont grandement aidé à finaliser cette recherche. Je remercie aussi l'école secondaire St-Maxime, le collège Marie de France et le cégep de Montmagny, en particulier Éric, Sylvain, Lionel, Martin et Gilles pour avoir mis à ma disposition des locaux et des équipements lors des mises à l'essai du prototype. Je remercie aussi tous les organismes subventionnaires d'avoir financé mes études doctorales; merci à la fondation Michel Gaucher et à la faculté des études supérieures de l'Université de Montréal. Je tiens finalement à remercier l'Université d'Ottawa, en particulier la faculté d'éducation, pour m'avoir donné la chance d'être membre de leur corps professoral et son support pour la finalisation de cette recherche.

INTRODUCTION

Pour la plupart des chercheurs scientifiques, dont Galilée fut le précurseur, «faire de la science» signifie mettre sur pied une expérimentation contrôlée, prendre des mesures, reconnaître la présence de fluctuations dans les données, tenter de repérer ou de construire un modèle mathématique (algébrique) général qui convienne aux données, faire les ajustements paramétriques, et vérifier, grâce a ces ajustements, si le modèle convient ou non, et si oui s'assurer que les « erreurs » d'ajustement ont un comportement décent (i.e. aléatoire et « normal »). Ainsi, cette démarche se joue dans l'interaction triple entre mesures réelles, modèle mathématique, jugement (numériquement appuyé) du chercheur.

Notre recherche de développement veut être un support et une actualisation de cette interaction dans un environnement d'Expérimentation Assistée par Ordinateur (ExAO). Elle veut donc permettre à des élèves de compléter cette démarche en leur fournissant une nouvelle méthode de modélisation algébrique qui soit accessible à leur niveau d'études.

La suite de ce travail est divisée en sept chapitres. Dans le chapitre 1 *Problématique*, nous éluciderons la problématique de cette recherche sur les difficultés rencontrées par des élèves pour compléter la démarche expérimentale en y intégrant le processus de modélisation graphique d'un phénomène physique. Nous proposerons ensuite une idée de solution en soulevant quelques questions sur les conditions de réalisation de cette recherche de développement, son utilité et son réalisme. Dans le chapitre 2 *Considérations théoriques*, nous présenterons des considérations concernant les registres sémiotiques (Duval 1995), les cadres de rationalité (Lerouge, 2000), la modélisation scientifique et didactique, l'utilisation de l'ordinateur au laboratoire et la lunette cognitive (Nonnon, 1986), ces considérations ayant pour but principal d'enrichir et d'appuyer théoriquement notre démarche de développement. Dans le chapitre 3 *Méthodologie de recherche*, nous précisons et détaillons rapidement toutes les étapes de la méthodologie de recherche en didactique pour mener à terme notre développement. Dans le chapitre 4 *Modèle d'action et prototype*, nous effectuons la description de l'environnement d'apprentissage d'ExAO en nous concentrant plus particulièrement à

préciser l'idée de développement : une nouvelle méthode de modélisation algébrique en sciences expérimentales, la Régression Graphico-Statistique (RGS). Dans le chapitre 5 *Mise à l'essai fonctionnelle*, nous présenterons, lors du déverminage du prototype, les erreurs détectées par les experts et les corrections suggérées ainsi que les modifications effectuées par le chercheur. Nous présenterons aussi une validation de contenu qui consistera à valider la méthode RGS en comparant ses résultats avec les résultats des méthodes traditionnelles. Dans le chapitre 6 *Mises à l'essai empirique*, nous présenterons les résultats obtenus ainsi que leur analyse et interprétation. Dans le chapitre 7 *Résumé et conclusion*, nous résumerons notre recherche et conclurons sur les bénéfices didactiques de cette nouvelle méthode et discuterons de son implantation possible dans les programmes de formation secondaire et collégiale.

Chaptire 1: Problématique

Dans le but de préciser la problématique de notre recherche, nous allons commencer ce chapitre en décrivant les intentions des programmes de formation en sciences des ministères de l'Éducation québécois, ontarien et français. Plus spécifiquement, nous allons parler de la démarche scientifique dans une activité de laboratoire en nous intéressant plus particulièrement aux difficultés rencontrées par les élèves lors de la modélisation mathématique d'un phénomène en physique. Nous nous intéresserons principalement à l'étude de la relation de causalité entre deux variables en physique, à la fonction de transfert qui nous permet de prédire une variable en fonction d'une autre et à l'évolution de l'incertitude associée à cette prédiction. Nous poursuivrons ensuite en soulevant quelques questions sur le rôle que pourrait jouer l'ordinateur pour aider les élèves à surmonter ces difficultés avant de proposer une solution particulière, qui sera décrite comme un modèle pour supporter des actions de l'élève dans le chapitre IV, un environnement assisté par ordinateur intégrant les sciences et les mathématiques dans la démarche scientifique, et l'évaluation de l'incertitude de mesure dans la prédiction.

1.1 Intentions des programmes des sciences

Depuis au moins 1998, l'une des intentions principales des programmes des ministères de l'Éducation québécois et français est de favoriser la démarche scientifique de l'élève durant une activité de laboratoire en sciences expérimentales. Selon le Ministère de l'Éducation québécois (MEQ) (2004), l'enseignement des sciences et de la technologie doit privilégier des situations d'apprentissage contextualisées, ouvertes et intégratives, débouchant sur des activités diversifiées afin de donner un sens concret aux objets d'études, d'éveiller l'intérêt et de favoriser la démarche scientifique de l'élève. Dans ces situations d'apprentissage, l'élève est amené à « *jouer un rôle d'investigation lors d'une expérimentation en laboratoire, d'une exploration sur le terrain ou de la construction d'un objet technique en atelier* » (MEQ 2004, p.272). Ainsi, l'élève est invité à contribuer à l'élaboration et à la mise en œuvre d'une démarche scientifique. Pour ce faire, et tel qu'exigé aussi par le programme cadre de sciences du Ministère de l'Éducation ontarien (2005), l'élève est appelé à formuler une hypothèse, à expérimenter, à mesurer, à calculer, à comprendre le concept de variable et de mesure, à interpréter ses résultats, à prédire avec un modèle et à communiquer à l'aide de plusieurs langages utilisés en sciences tel que le langage mathématique. En France, le groupe responsable du programme de physique et de chimie de l'Inspection Générale de l'Éducation

Nationale (IGEN, 1998) propose plusieurs objectifs majeurs qui permettront « *d'augmenter réellement l'efficacité de l'enseignement des sciences physiques* » (IGEN, 1998, p.1-7).

Citons-en quelques uns :

- *« prédire un phénomène, un résultat expérimental;*
- *prendre conscience, grâce à une pratique réfléchie, des questions relatives à la mesure, à sa précision, au sens à donner aux résultats d'un mesurage;*
- *s'initier à la démarche expérimentale : formuler une hypothèse, élaborer un protocole permettant de la tester, le mettre en œuvre, analyser les résultats, tirer des conclusions;*
- *choisir des grandeurs à mesurer, décider de valeurs de paramètres, de conditions expérimentales, d'échelle, de nombre de mesures* » (IGEN, 1998, p.1-7).

Notons que, dans une démarche scientifique, notamment à l'étape de la modélisation mathématique d'un phénomène physique, on devrait tenir compte des incertitudes sur les mesures des données expérimentales pour pouvoir élaborer ce modèle mathématique. Cet aspect est d'abord essentiel pour permettre à l'élève d'élaborer un modèle explicatif qui soit aussi calculable et prédictif avec une certaine marge d'incertitude, le mettre en œuvre afin de le rejeter, le rectifier ou l'accepter avant de le communiquer à autrui. Cet aspect est essentiel parce qu'il permet aussi à l'élève de mieux organiser, collecter, représenter, interpréter, analyser et prédire ses données tirées d'expériences à l'aide des langages mathématiques (algébrique, analytique, etc.). Cet aspect est essentiel aussi parce qu'il lui permet de réussir des activités de modélisation mathématique en sciences expérimentales. Pour ces raisons, dans le cadre de notre recherche, nous nous intéresserons plus particulièrement à l'étude des difficultés rencontrées chez certains élèves lors de la modélisation mathématique de phénomènes physiques sous la forme de l'écriture algébrique d'une relation de causalité entre les variables à l'étude d'un phénomène physique.

1.2 Une situation problématique

La mise en œuvre des deux nouveaux programmes de formation de l'école québécoise et de l'école ontarienne révèle des aspects paradoxaux quant aux attentes qu'elle soulève.

- Le nouveau programme de chacune de ces provinces du Canada demande aux élèves d'expérimenter des phénomènes physiques, de recueillir des données, de les représenter sur un graphique, de les analyser et de les interpréter¹.
- Cependant, le nouveau programme de chacune de ces provinces du Canada ne donne pas explicitement à l'élève une méthode en mathématiques appliquées avec laquelle il pourrait analyser, interpréter, justifier, prédire et modéliser algébriquement les données empiriques, et communiquer ses résultats, en tenant compte des incertitudes de mesures inhérentes aux résultats des expériences en sciences physiques.

Un des buts principaux de ces deux nouveaux programmes est de rendre l'élève autonome dans ses apprentissages, de lui donner la capacité de communiquer, avec un langage approprié, le résultat de ses propres expérimentations et d'effectuer une démarche scientifique. Cependant, rien ne nous indique de quel langage il s'agit, ni comment on peut se l'approprier. Selon nous, il devrait être question du langage mathématique puisque ce langage est utile et efficace non seulement pour communiquer, comme le demandent les deux ministères, les résultats d'expériences, mais aussi pour prédire un phénomène en réussissant une activité de modélisation algébrique. Notons qu'à notre avis ces formulations et explications devraient inclure une approximation statistique qui permette d'énoncer celles-ci avec une marge d'incertitude définie.

Pour clarifier notre problématique, donnons l'exemple de l'étude de la chute libre d'un corps. Comment, dans une démarche expérimentale, un élève peut-il communiquer sans pouvoir justifier que l'ensemble de points des données expérimentales de cette expérience correspond à un modèle algébrique de type parabolique? Notons que les moyens actuels² mis à sa

¹ Curriculum de l'Ontario de la 9^{ème} à la 10^{ème} année, p.36. Programme de formation de l'école québécoise, vision systémique de liens interdisciplinaires, p.326

² Calculatrices programmables et graphiques, Excel, Régressi etc.

disposition en mathématiques ne lui donnent pas accès à la compréhension du processus de modélisation algébrique, ni à l'évaluation de l'incertitude des mesures expérimentales. Ainsi, comment peut-il réussir cette activité de modélisation algébrique sans avoir les outils conceptuels pour évaluer la pertinence de son modèle et la précision de ses mesures?

Notons que dans les collèges pré-universitaire québécois et ontariens, les enseignants se contentent le plus souvent d'utiliser des calculatrices programmables³ ou des tableurs comme Excel et Régressi afin d'obtenir automatiquement la meilleure courbe passant par un ensemble de points donné. Les enseignants se trouvent alors obligés d'accepter la réponse obtenue par l'étudiant avec la calculatrice ou le tableur sans que ceux-ci comprennent les méthodes sous-jacentes en mathématiques appliquées qui sont utilisées dans ces calculatrices et ces tableurs. Sur la complexité de ces méthodes utilisées dans l'enseignement des sciences expérimentales, Beaufils (1993, p.124) confirme ces constatations en notant que:

*« les démarches dites « du physicien » présentées aux élèves sont souvent fondées sur une mise en avant exclusive de l'expérience (découverte de loi, induction de théorie, expérience cruciale, etc.)...[...]... Si l'alternative centrée sur les méthodes modernes de modélisation relève d'une épistémologie plus satisfaisante en ce qui concerne la relation théorie/expérience, elle reste problématique au niveau de l'enseignement secondaire dès lors qu'elle se place sur un plan **quantitatif et mathématique**. Elle ne peut en effet être mise en œuvre de façon immédiate du fait, en particulier, de la limitation de la complexité des modèles mathématiques et des méthodes informatiques. »*

1.2.1.1 Problèmes liés à la modélisation mathématique en sciences expérimentales

De nombreux auteurs ont remarqué que les élèves utilisaient peu les mathématiques comme support dans la résolution de problèmes pour s'expliquer des phénomènes physiques.

Nonnon (1986, p.22) notait :

« ... les élèves manipulent la fonction linéaire du premier degré dans les cours de mathématiques à la fin du secondaire. L'approche est généralement magistrale et les élèves sont à même de calculer des valeurs de y en fonction de x , ainsi que de repérer un point sur le graphique à partir de ses projections en x et en y . Ils peuvent aussi apprendre à passer de la fonction algébrique à la fonction graphique, et inversement identifier la fonction à partir de sa

³ Les curriculums des provinces du Québec et de l'Ontario recommandent fortement l'utilisation des calculatrices graphiques programmables et les tableurs.

représentation. Ils sont capables par exemple de déterminer une fonction du premier degré passant par deux points. Par contre, ils sont rarement capables de l'utiliser, en dehors des mathématiques, comme support dans la résolution de problèmes. »

A propos du rôle assigné à l'activité mentale de modélisation en sciences expérimentales, Astolfi et Drouin (1992, p.66) notaient que

« il est possible d'y établir des relations quantitatives entre grandeurs repérables ou mesurables, la construction de telles relations étant souvent contemporaine de celle des grandeurs elles-mêmes [...]. Dans de très nombreux cas, la nature mathématique de la relation restera inconnue des élèves, tant il est vrai que même la plus simple fonction mathématique (fonction linéaire) reste difficile à comprendre et à manier à ce niveau».

Sur ce sujet, Béguin, Marcellus, et Vitale (1996, cités dans Caron 2002, p.34) précisent qu'en se référant à des situations concrètes issues des sciences expérimentales, l'élève

« peut se contenter d'un énoncé spontané (ex : un liquide se refroidit plus quand il est chaud), en ne voyant pas la pertinence de lui substituer un énoncé plus formel (ex : dans un intervalle de temps, la chute de température est proportionnelle à la différence entre la température instantanée et la température environnante) et encore moins la formule mathématique qui lui est associée».

En France, l'enquête menée par Séré, Journeaux et Winther (1998), auprès d'enseignants au lycée, montre que le traitement statistique des mesures expérimentales est très peu présent dans la pratique de l'enseignement. Ces auteurs concluent que *« pour l'instant, les enseignants peuvent [...] exprimer ce qu'il faudrait « faire », en se gardant de le faire par manque du temps et aussi de concepts indispensables »* (Séré et al. 1998, p.241-254). Une autre étude menée par Beaufils et al. (1999) sur les travaux pratiques en physique a montré plusieurs problèmes sur la prise en compte des incertitudes de mesures. Citons en quelques-uns:

« - Certaines méthodes de mesures et de traitement de données sont utilisées à contre-emploi:

- Sur le plan pédagogique par l'utilisation de dispositif ad hoc plus au moins sophistiqué n'éclairant pas le phénomène et la nature des mesures effectuées,*
- Sur le plan des méthodes par la mise en œuvre de méthodes d'optimisation incompatibles avec la nature des données ou du modèle, par la non prise en compte des incertitudes expérimentales, ni dans l'analyse ni dans la production des résultats»* (Beaufils et al, 1999, p.101-116).

Dans sa thèse, Ayçaguer-Richoux (2000, p.153) a mentionné que, dans une activité de laboratoire en physique, les démarches observées chez les enseignants

«comportent pour la plupart une 'confrontation' entre des résultats expérimentaux et un modèle théorique [...] et les incertitudes sur les mesures, sur les valeurs des paramètres obtenus pourtant 'un des outils privilégiés pour cette confrontation' (Guillon, 1995, p.117), ne sont ni prises en compte ni même évoquées. »

Cette auteure précise ensuite :

«obtenir une courbe avec un palier, une droite qui passe par l'origine, une valeur ayant le bon ordre de grandeur suffit pour valider l'accord modèle - résultats expérimentaux [...] la confrontation se réduit à une "comparaison à vue" entre résultats expérimentaux et théoriques. »
(Ayçaguer-Richoux, 2000, p. 154).

1.2.1.2 L'absence d'outils mathématiques appropriés à la modélisation mathématique au secondaire et au collège

Au secondaire et au collège, les théorèmes et axiomes qui sont enseignés en mathématiques ne sont pas directement applicables en physique, par exemple, pour déterminer le modèle algébrique (linéaire, parabolique, hyperbolique, sinusoïdal, exponentiel, logarithmique, ou etc.) correspondant à un ensemble de points issu d'une interaction des variables à l'étude d'un phénomène physique. On doit alors utiliser des méthodes et théorèmes qui sont issus des mathématiques appliquées. Ainsi, le modèle algébrique sera, dans un premier temps, élaboré par des algorithmes d'optimisations spécifiques qui tiendront compte des incertitudes de mesures tels que la méthode:

- 1) des moindres carrés (la régression linéaire d'un degré quelconque) et,
- 2) des moindres carrés pondérés ou généralisés, permettant la modélisation des fonctions non linéaires dont les paramètres sont optimisés par des algorithmes tels que l'algorithme de Marquadt, de Newton, ou etc.),
- 3) etc.

Dans un deuxième temps, ce modèle devra être validé à partir des activités d'interpolation, d'extrapolation et de prédiction du même phénomène physique. De plus, il devra être répété, à plusieurs reprises, dans des conditions différentes. Ce dernier point permet d'associer statistiquement une incertitude au modèle algébrique, ce qui ajoute une dimension prédictive et probabiliste au phénomène à l'étude.

Actuellement, à cause de la complexité de ces méthodes (moindres carrés, Newton etc.), on ne peut les inclure dans les programmes du secondaire et du collège en sciences malgré le fait qu'elles constituent les seuls moyens scientifiques reconnus pour pouvoir effectuer le cycle d'induction et déduction en sciences expérimentales et élaborer un modèle algébrique décrivant la relation stochastique des variables à l'étude d'un phénomène en sciences, en particulier en physique. Ainsi, au secondaire et au collège, l'enseignant ne peut utiliser les moyens didactiques et les méthodes en mathématiques appliquées nécessaires pour enseigner aux élèves la modélisation algébrique telle qu'elle est véritablement élaborée en sciences expérimentales, une modélisation algébrique et prédictive qui tienne compte de l'ajustement flou entre l'ensemble des points observés et le modèle, et des incertitudes sur les mesures observées. De façon générale, le problème didactique auquel nous sommes confronté découle des deux questions suivantes :

- 1) Comment donner à l'élève la capacité d'élaborer et d'optimiser un modèle algébrique adéquat d'un phénomène en sciences expérimentales, en particulier en physique?
- 2) Comment donner à l'élève la capacité d'évaluer l'incertitude sur son modèle algébrique?

Pour tenter de répondre à ces deux questions, nous allons approfondir et évaluer le rôle de l'ordinateur dans une séance de laboratoire. Puis, en misant sur une certaine interaction élève/ordinateur/données expérimentales, nous allons chercher une solution pour aider l'élève à effectuer la modélisation algébrique qui intègre les incertitudes de mesures, sans avoir recours aux méthodes complexes d'optimisation qui demandent des notions de mathématiques appliquées et qui ne sont ni de niveau secondaire ni même de niveau collégial.

1.3 Élaboration de l'idée de solution

Notre idée de recherche prolonge l'ensemble des travaux effectués au Laboratoire de Robotique Pédagogique de l'Université de Montréal. Actuellement, il existe trois types de didacticiels au laboratoire en sciences expérimentales, soit l'Expérimentation Assistée par Ordinateur (ExAO), la Simulation Assistée par Ordinateur (SAO) et le troisième qui intègre l'ExAO et la SAO dans une même application. L'ExAO consiste à réaliser des expériences réelles par l'intermédiaire des capteurs et d'un microcontrôleur afin de représenter en temps réel et sur l'écran de l'ordinateur l'évolution des variables à l'étude. La SAO consiste à simuler une expérience donnée et la représenter sur l'écran de l'ordinateur. Aucune de ces applications ne permet à l'élève d'effectuer, dans sa démarche scientifique, une activité de modélisation algébrique qui tiendrait compte des incertitudes de mesures. On peut citer les travaux récents de Riopel (2005) en ExAO et SAO, de Fournier (2001) en ExAO et de Cervera (1998) en SAO du laboratoire de Robotique pédagogique de l'Université de Montréal.

Cervera (1998) a conçu un environnement d'apprentissage assisté par ordinateur basé sur des simulations de phénomènes complexes et abstraits en hydraulique et en pneumatique. Son environnement permet à l'élève d'observer l'évolution de variables impliquées dans ces phénomènes sur l'écran de l'ordinateur. Étant donné que ces variables sont simulées à l'aide des modèles algébriques du phénomène à l'étude, l'élève n'a pas l'occasion d'effectuer l'activité de modélisation algébrique des phénomènes hydrauliques car les données sont simulées et, bien qu'elles contiennent de «l'erreur de mesure» simulée, le modèle induit lui-même reste exempt d'incertitude.

Fournier (2002) a conçu un environnement d'apprentissage d'ExAO permettant à l'élève de construire un système de mesure. Cette activité de construction permet à l'élève d'effectuer un processus de modélisation essentiellement inductif lui permettant d'étudier une relation de causalité entre deux variables et d'utiliser celle-ci pour construire un instrument de mesure. Quant à Riopel (2005), en combinant l'ExAO et la SAO, et en gardant son environnement en contact avec la réalité, il permet à l'élève d'effectuer les démarches inductives et déductives du processus de modélisation scientifique dans une séance de laboratoire.

Les environnements de Fournier (2002) et Riopel (2005) ne permettent pas à l'élève d'effectuer l'activité de modélisation algébrique en tenant compte des incertitudes de mesures sur leurs données empiriques. Fournier (2002) et Riopel (2005) se contentent de superposer, en ajustant les coefficients d'une équation algébrique, la courbe symbolique et la courbe empirique pour trouver le modèle algébrique qui correspond au phénomène à l'étude. Ici, on ne fait pas d'optimisation qui permettrait, comme dans la méthode de Gauss-Legendre (régression linéaire par les moindres carrés), de minimiser les écarts entre la courbe théorique et les données empiriques. On n'évalue pas non plus l'incertitude sur la prédiction de la variable à l'étude.

Les élèves de niveau secondaire ou collégial n'ont que peu ou pas de connaissance en mathématiques appliquées et en statistique pour effectuer des régressions linéaires et non linéaires sur des données empiriques issues d'une expérience de laboratoire. Il ne suffit plus alors de rendre signifiant le caractère probabiliste des données empiriques puisque les élèves ne possèdent pas les bases mathématiques correspondantes. Les solutions pratiques qui s'offrent à nous a priori sont alors de deux ordres:

- 1) inclure dans le curriculum les méthodes de régressions linéaires et non linéaires;
- 2) nier le caractère stochastique des données empiriques.

Ces deux solutions ne sont toutefois pas satisfaisantes. La première solution serait inconcevable puisque, comme nous l'avons déjà dit, elle fait appel à des concepts et méthodes en mathématiques appliquées et en statistiques trop avancées pour les niveaux secondaire et collégial. La deuxième solution réduit l'analyse mathématique à une simple superposition d'une courbe symbolique que l'on place approximativement sur l'ensemble de points formés par les données empiriques. Nous préférons chercher une solution qui donnerait aux élèves une base suffisante, à la fois cognitive et visuelle, pour induire le modèle approprié à des données d'expérience ou rendre ce modèle adéquat par rapport aux données obtenues, ce en imitation des méthodes et concepts plus routiniers appliqués par les chercheurs professionnels. Le caractère relativement abstrait de l'analyse en mathématique décourage les élèves qui ne voient dans ce travail qu'un exercice fastidieux. Il est vrai que la division des curriculums ne favorise pas une intégration entre les sciences et les mathématiques, ce qui a pour conséquence de présenter l'analyse mathématique comme un exercice académique sans utilité, sans finalité pratique. D'autre part, les élèves en physique sont souvent découragés par le recours obligatoire aux mathématiques pour décrire et expliciter les phénomènes. Ce qui se traduit trop souvent par des applications de formules

n'ayant guère de sens pour les élèves et ne leur laissant aucun rôle dans la saisie cognitive de la modélisation en jeu. Ces cours de physique donnés de manière magistrale laissent peu de place à l'expérimentation et à l'investigation scientifique et encore moins de place à l'analyse et à la modélisation mathématiques, réduisant ainsi l'activité de l'élève à la seule application de formules. En occultant ainsi chez l'élève l'analyse et la construction des objets mathématiques, on réduit ses capacités de compréhension, de généralisation et de transfert (Girouard et Nonnon, 1999) de ses savoir-faire en mathématiques vers l'étude d'autres phénomènes scientifiques. En somme, on limite son autonomie intellectuelle en ne lui permettant pas de développer lui-même sa compréhension et son expression mathématiques, des habiletés nécessaires pour expliciter et communiquer les résultats de ses propres investigations scientifiques en tenant compte du caractère probabiliste de ses résultats. Ainsi, on ne devrait plus se contenter de prédire des résultats à partir du graphique ou d'une équation, comme le faisaient Riopel (2005) et Fournier (2003), ni à partir d'une équation obtenue automatiquement par un tableur comme Excel ou Régressi. L'élève devrait être à même de trouver ou d'optimiser son équation et lui associer une marge de tolérance ou d'incertitude. On ne peut donner aux élèves une structure de pensée scientifique sans y intégrer d'une manière ou d'une autre les prérequis nécessaires en mathématiques appliquées et calcul probabiliste. Pour donner une prééminence à la réalité dans la démarche scientifique, il nous faut ici trouver le moyen de leur donner ces concepts avant, ou mieux en même temps que la démarche expérimentale. Nous voulons donc, par la production tangible de cette recherche, dans le contexte de la «lunette cognitive» de Nonnon (1986), leur donner ces concepts et ces méthodes en mathématiques appliquées d'une manière visuelle et graphique en même temps qu'ils opèrent des ajustements entre la fonction symbolique et les données empiriques.

Cette recherche a été entreprise dans le but de répondre à ces problèmes. Nous voulons utiliser et exploiter les possibilités didactiques qu'offre un environnement d'ExAO en lui ajoutant de nouvelles potentialités sur la modélisation algébrique et l'évaluation des incertitudes de mesures, c'est-à-dire:

Concevoir un environnement d'ExAO, avec lequel l'élève pourra s'engager et comprendre l'ensemble du processus de modélisation algébrique en sciences expérimentales.

1.4 Les questions soulevées par cette recherche et l'idée de développement

Actuellement, il n'existe aucun environnement assisté par ordinateur qui permette à un élève du secondaire ou de cégep de s'engager dans un processus complet de modélisation algébrique. C'est-à-dire, un environnement qui ne soit pas comparable aux tableurs grapheurs existants, tels qu'Excel et Régressi, qui donnent à l'élève un résultat automatique et qui ne permettent pas d'accéder à la compréhension du processus mathématique sous-jacent à la modélisation algébrique.

Serait-il possible de concevoir un tel environnement utilisable au secondaire ou au collège, dans une activité de laboratoire en sciences expérimentales ?

Les professeurs pourraient-ils l'intégrer et l'utiliser facilement dans le cadre de cette activité de laboratoire avec des élèves ?

Les élèves pourraient-ils l'utiliser facilement et de manière autonome pour effectuer tout le processus de modélisation algébrique ?

Pour concilier les paradigmes des nouveaux programmes, les heures limitées de présence au laboratoire, notre intention est de donner aux élèves et aux étudiants un langage approprié en mathématique, un langage de codage mathématique avec lequel ils pourront effectuer le processus de modélisation algébrique. Ainsi, notre idée de recherche est de:

Concevoir un environnement d'apprentissage informatisé d'ExAO qui permette à l'élève d'effectuer une modélisation algébrique, incluant l'optimisation et l'évaluation de l'incertitude, sans recourir formellement aux méthodes en mathématiques appliquées telles que les méthodes de régression linéaire et non linéaire qui sont utilisées traditionnellement dans les calculatrices programmables ou les tableurs grapheurs.

Nous devons être conscients ici que les schèmes disponibles chez les élèves risquent de ne pas être suffisants, mais que l'approche visuo-graphique, que nous allons proposer plus tard dans notre modèle d'action au chapitre 4, devrait être une occasion d'œuvrer au développement de ces nouveaux schèmes.

Dans ce chapitre, nous avons défini et clarifié la problématique de notre recherche. Ensuite, nous avons proposé une idée de développement à caractère technologique qui devrait ouvrir une perspective nouvelle pour faciliter une compréhension plus complète du processus expérimental en incluant un accès plus direct, plus facile, voire même plus sensible au

processus complexe de la modélisation algébrique. Dans le chapitre suivant, nous allons examiner les théories et modèles nous permettant d'inscrire cette recherche dans un cadre théorique (considérations théoriques)

Chaptire 2: Considérations théoriques

Le but de ce chapitre est de présenter les considérations théoriques en rapport avec notre problématique, qui justifieront l'ensemble de notre démarche de Recherche et de Développement (Laurencelle, 2005).

Durant le processus de modélisation mathématique d'un phénomène physique, on doit passer d'un cadre de rationalité physique à un cadre de rationalité mathématique mobilisant ainsi des registres sémiotiques différents (Lerouge, 1992) pour décrire le phénomène physique par une relation algébrique. Ainsi, nous allons d'abord aborder la théorie de registres sémiotiques en mathématique, plus particulièrement les trois activités cognitives de la pensée liées à la sémosis: la formation de représentations dans un registre sémiotique, le traitement, la conversion. Nous allons ensuite discuter la théorie de cadres de rationalité et soulever les problèmes de discontinuité et de rupture des registres sémiotiques inhérents à un changement de cadre de rationalité. Plus spécifiquement, pour contrer les limites et l'insuffisance de ces trois activités cognitives, dont parle Duval (1995), pour que l'apprenant ait accès au contenu conceptuel d'une représentation mathématique en sciences expérimentales et vice versa, nous allons intégrer à ce modèle celui du changement de cadre de rationalité (Lerouge, 1999). Nous poursuivrons en abordant la notion de modèle. Cela nous conduira à examiner la modélisation scientifique en sciences et en mathématiques ainsi que la modélisation didactique. Nous pensons que c'est à cause d'une rupture entre sciences et mathématiques que l'élève a de la difficulté à élaborer des modèles mathématiques des phénomènes scientifiques. Pour terminer, nous discuterons du recours à l'expérimentation assistée par ordinateur pour surmonter ces difficultés en favorisant la compréhension, la manipulation et la critique de modèles par l'élève.

2.1 Registres sémiotiques au sens de Duval (1995)

Un savoir mathématique ne s'appréhende et n'acquiert du sens que par l'intermédiaire de systèmes d'expressions et de représentations sémiotiques. On en distingue plusieurs. Les nombres s'appréhendent par le biais du système d'écriture décimale, fractionnaire, binaire etc., les objets mathématiques s'appréhendent par le biais des écritures algébriques, analytiques, symboliques ou par leurs représentations graphiques voire par l'invocation de figures géométriques, etc. En physique, par exemple, l'appropriation des interactions entre les variables d'un phénomène à l'étude requiert l'utilisation de plusieurs systèmes de représentations sémiotiques, comme les écritures algébriques dimensionnelles, les

représentations graphiques (oscillographes), la langue maternelle, les notations symboliques, etc.

Duval (1995) définit un registre sémiotique comme étant un système sémiotique permettant à l'élève les trois activités cognitives fondamentales de sa pensée:

- «constituer une trace ou un assemblage de traces perceptibles qui soient identifiables comme une représentation de quelque chose dans un système déterminé » ;
- «transformer les représentations par les seules règles propres au système de façon à obtenir d'autres représentations pouvant constituer un apport de connaissance par rapport aux représentations initiales » ;
- « convertir les représentations produites dans un système en représentations d'un autre système, de telle façon que ces dernières permettent d'explicitier d'autres significations relatives à ce qui est représenté » (p.21).

Pour cet auteur, la compréhension en mathématiques repose sur la distinction entre l'objet et sa représentation sémiotique. Toute confusion entre ces deux derniers

«entraîne, à plus ou moins long terme, une perte de compréhension. Les connaissances acquises deviennent alors vite inutilisables hors de leur contexte d'apprentissage... » (Duval, 1995, p 2).

Ainsi, en mathématiques l'utilisation des représentations sémiotiques ne se limite pas à des fins de communication. Elle est nécessaire aussi au développement de l'activité cognitive de l'élève voire même de l'activité de résolution de problème mathématique elle-même.

Pour Duval, le fait que, d'une part, « l'appréhension des objets mathématiques ne peut être qu'une appréhension conceptuelle », et d'autre part, « c'est seulement par le moyen des représentations sémiotiques qu'une activité sur des objets mathématiques est possible » (cité dans Malafosse, 2002, p.41), constitue « le paradoxe cognitif de la pensée mathématique » (cité dans Malafosse, 2002, p.41). Ce paradoxe justifie l'intérêt et la nécessité des registres sémiotiques. Par exemple, la droite géométrique, au sens d'Euclide, est un ensemble de points alignés qui forment une courbe continue illimitée. Les élèves appréhendent ainsi cette notion par le biais de sa représentation graphique ou algébrique. Or, pour Duval (1988a, p.14),

« C'est justement cette notion de « point » qui fait problème : un ensemble de points sur le registre figuratif est discret, il ne peut être continu... Il y a donc un écart sémantique irréductible entre ces deux « représentations » que l'on cherche implicitement à réunir pour donner un sens à la notion de point »

Ainsi, tant en mathématiques qu'en physique, l'étude, de ces systèmes d'écriture et ces représentations sémiotiques s'avère très importante parce qu'elle accroît le développement des activités cognitives chez l'élève.

L'analyse des difficultés relatives à la conceptualisation, au développement du raisonnement scientifique et de l'activité cognitive de l'élève fait face à trois phénomènes inter reliés. Le premier est celui de la « *diversification des registres de représentation sémiotique* » (Duval, 1995, p. 21) dont chacun pose des problèmes et des questions d'apprentissage spécifiques. Par exemple, le langage naturel et les langues symboliques seraient deux registres différents dont chacun est régi par ses propres règles. Le deuxième est celui de la « *différenciation entre représentant et représenté* » (Duval, 1995, p. 22). Ce phénomène est associée, d'une part à l'appropriation par l'élève de ce dont une représentation tient lieu (afin de pouvoir y associer d'autres représentations), et d'autre part à l'intégrer dans des procédures de traitement. Or, cette différenciation ne se fait jamais de façon spontanée. Le troisième phénomène est celui de la « *coordination entre les différents registres* » (Duval, 1995, p. 22). Ces phénomènes sont essentiellement associés à la *sémiosis*. Pour Duval, pour qu'une représentation donne à l'élève accès à l'objet qu'elle symbolise et à son concept, deux conditions doivent être remplies :

- « *qu'il dispose d'au moins deux systèmes sémiotiques différents pour produire la représentation d'un objet, d'une situation, d'un processus...* »
- « *qu'il puisse convertir « spontanément » d'un système sémiotique à l'autre, sans même le remarquer, les représentations produites* » (Duval 1995, p. 22).

Ainsi, il y a trois activités cognitives fondamentales qui sont liées à la *sémiosis*:

- 1) la formation de représentations dans un registre sémiotique
- 2) le traitement
- 3) la conversion.

2.1.1 Formation de représentations dans un registre sémiotique

L'activité de formation de représentations dans un registre sémiotique doit respecter ses règles de conformité. Selon Duval (1995, p.37-38), ses règles portent essentiellement sur :

- « la détermination (strictement limitée, ou au contraire ouverte) d'unités élémentaires (fonctionnellement homogènes ou hétérogènes....) : symboles, vocabulaire... »
- « les combinaisons admissibles d'unités élémentaires pour former des unités de niveau supérieur : règles de formation pour un système formel, grammaire pour les langues naturelles... »
- « les conditions pour qu'une représentation d'ordre supérieur soit une production pertinente et complète: règles canoniques propres à un genre littéraire ou à un type de production dans un registre. »

Ces règles de conformité permettent à un individu de reconnaître le registre auquel une représentation sémiotique donnée appartient. Par exemple, elles permettent d'identifier une représentation comme étant une écriture algébrique, une écriture numérique, une loi en physique ou une figure géométrique. Notons que cette reconnaissance n'implique pas nécessairement, ni la compréhension de ce qu'une représentation dénote, ni son utilisation ni son exploitation.

Comme le précise Duval, la formulation de représentations sémiotiques est une activité qui est beaucoup plus complexe que l'application des règles de conformité. Elle implique la « sélection d'un certain nombre de caractères d'un contenu perçu, imaginé ou déjà représenté en fonction des possibilités de représentation propres au registre choisi » (Duval 1995, p.38).

2.1.2 Activité de traitement

Pour cet auteur, il faut distinguer entre une activité de traitement et une activité de conversion. Or, on les confond très souvent.

Selon Duval, un traitement est la transformation d'une représentation en une autre mais dans le même registre. Donc, cette activité de transformation est tout à fait interne à un registre donné. Par exemple, pour factoriser l'expression algébrique suivante : $x^2 - 8x + 12$ on doit transformer sa représentation sémiotique en une autre qui sera aussi dans le même registre algébrique du départ, celle d'un produit de deux facteurs : $(x - 6)*(x - 2)$. Le calcul, qu'il soit

arithmétique, algébrique ou symbolique, est en général un traitement. La paraphrase en est aussi un exemple dans le registre du discours. L'activité de traitement d'une représentation est engendrée par des règles d'expansion propres à cette représentation. Les règles d'expansion sont différentes de celles des règles de conformité. Selon ces règles, la nouvelle représentation produite à partir de celle du départ sera établie dans le même registre de départ.

2.1.3 Activité de conversion

La conversion est aussi la transformation d'une représentation, d'un objet, d'une situation ou d'une information dans un registre, en une autre qui représente le même objet, situation ou information de départ, cette fois, dans un registre différent. Donc, cette activité de transformation est tout à fait externe par rapport au registre et à la représentation de départ. Par exemple, le passage d'une équation algébrique d'une droite à sa représentation graphique ou inversement, la mise en évidence de la correspondance entre le coefficient directeur du registre algébrique et l'angle formé avec l'axe des abscisses du registre graphique permettraient la conversion de cette droite entre ces deux registres. Selon Duval (1995, p.41), *« la conversion requiert que l'on perçoive la différence entre ce que Frege appelait le sens et la référence des symboles ou des signes, ou entre le contenu d'une représentation et ce qu'elle représente. »*

Sans ce discernement, la conversion deviendrait alors une activité impossible voire même une activité incompréhensible. Prenons l'exemple de Duval (1995) sur le calcul numérique. Plusieurs élèves savent bien additionner deux nombres ayant chacun soit une écriture décimale soit une écriture fractionnaire. Cependant, certains ont de la difficulté à additionner deux nombres s'ils sont écrits l'un en écriture décimale et l'autre en écriture fractionnaire car les élèves ne pensent pas à convertir l'écriture décimale en une écriture fractionnaire ou inversement. En plus, même si la question posée sur le calcul exige cette conversion préalable, plusieurs élèves auront de la difficulté ou même ne la réussiront pas. Duval analyse cette difficulté par le fait que l'écriture décimale, l'écriture fractionnaire et l'écriture exponentielle forment trois registres différents de représentation de nombres. Dans ce cas, il faut distinguer *« la signification opératoire attachée au signifiant et le nombre représenté »* (Duval, 1995, p.41). Dans cet exemple, la signification opératoire pour 0.25, $\frac{1}{4}$ et $25 \cdot 10^{-2}$ est différente pour chaque cas car les règles d'expansion du traitement qui

permettent ces trois additions ne sont pas les mêmes, même si elles donnent toutes les mêmes résultats:

$$0.25 + 0.25 = 0.5 ; \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2} ; 25.10^{-2} + 25.10^{-2} = 50.10^{-2}$$

Ces trois signifiants ont chacun une signification opératoire différente mais leur représentation sémiotique représente et signifie le même nombre. Ainsi, selon Duval, « *Si la signification opératoire attachée au signifiant et commandant la procédure de traitement n'est pas différenciée de l'objet nombre représenté, alors la substitution par conversion de 0.25 à $\frac{1}{4}$ n'est plus concevable.* » (Duval 1995, p.42).

Plusieurs recherches en didactique des mathématiques montrent que:

« la conversion des représentations sémiotiques constitue l'activité cognitive la moins spontanée et la plus difficile à acquérir chez la grande majorité des élèves » (Duval, 1995, p.44)

Selon Duval, l'activité de conversion dépend du degré de non congruence entre les deux représentations de départ et d'arrivée. « *Pour déterminer si deux représentations sont congruentes ou non, il faut commencer par les segmenter en leurs unités significatives respectives, de telle façon qu'elles puissent être mises en correspondance.* » (Duval, 1995, p.47). Pour que deux représentations soient congruentes, on trouve trois critères qui sont relatifs:

- 1) à la possibilité d'une correspondance « sémantique » des éléments signifiants
À chaque unité signifiante simple de la représentation de départ, on peut associer une unité signifiante simple de celle d'arrivée.
- 2) à l'univocité « sémantique » terminale
À chaque unité signifiante élémentaire de la représentation de départ, il ne correspondrait qu'une seule unité signifiante élémentaire dans le registre de la représentation d'arrivée.
- 3) à l'organisation des unités significatives
Selon le même ordre dans les deux représentations, les organisations respectives des unités signifiantes des deux représentants comparés de départ et d'arrivée permettent d'appréhender les unités en correspondance sémantique.

Pour ce chercheur, il n'y a pas de méthodes spécifiques ou de règles générales selon lesquelles l'élève, en les appliquant, sera capable de réussir l'activité de conversion, cela, pour deux raisons. La première correspond au phénomène de non-congruence dont les cas sont toujours des cas particuliers et qui ne peuvent pas être généralisés. La seconde est celle de l'identification des unités significantes dans les deux registres de départ et d'arrivée d'un objet. Cette identification dépend du type des registres de départ et d'arrivée ainsi que de l'objet représenté lui-même. Donc, la discrimination des unités significantes varie en fonction de l'objet et des registres où il est représenté. Par exemple, les règles de discrimination des unités significantes des deux représentations cartésienne et algébrique d'une droite sont différentes de celles des deux représentations géométrique et algébrique d'une homothétie. Cette activité cognitive de discrimination est le cœur, voire la condition nécessaire de toute activité cognitive de conversion donc de toute activité de coordination entre plusieurs registres hétérogènes. Or, souvent c'est la discrimination de ces unités significantes qui fait défaut. Selon Duval (1995, p.77), « *la discrimination des unités significantes propres à chaque registre doit donc faire l'objet d'un apprentissage spécifique* » car, souvent, c'est elle qui fait défaut lors d'une activité de conversion et de coordination. Pour cet auteur, « *l'activité conceptuelle implique la coordination des registres de représentation* ». Il précise ensuite, pour que l'élève puisse « *discriminer le représentant et le représenté, ou la représentation et le contenu conceptuel que cette représentation exprime, instancie ou illustre* », il doit parvenir au stade de la coordination inter-registre.

2.1.4 Conclusion

Dans cette section, nous avons souligné les trois activités cognitives fondamentales de la sémiotique, qui sont: la formation de représentations dans un registre sémiotique, le traitement et la conversion. Selon Duval (1995), l'apprentissage mono registre entraîne une compréhension mono registre qui ne permet aucun transfert. C'est-à-dire, dès que les élèves sortent du contexte où s'est fait l'apprentissage, plusieurs se montrent incapables d'utiliser leurs connaissances acquises en dehors de ce contexte, en particulier en sciences. Selon cet auteur, seul l'apprentissage fondé sur la coordination entre registres entraîne une compréhension intégrative qui donnera ces possibilités de transfert. Avec notre prototype d'ExAO, nous voulons donc que l'élève exerce ces trois activités cognitives durant le processus de modélisation algébrique d'un phénomène en physique.

Dans la section suivante, nous nous intéressons à la notion de cadre de rationalité. Ensuite, nous allons discuter des problèmes de continuité et de rupture des registres sémiotiques lors d'un changement de cadre de rationalité durant le processus de modélisation algébrique d'un phénomène en physique. Puisqu'il y aurait un autre changement de cadre de rationalité entre les mathématiques et la physique, nous allons voir que la seule coordination entre les registres sémiotiques mathématiques, au sens de Duval, n'est plus suffisante pour qu'un élève ait accès au contenu conceptuel d'une représentation sémiotique d'un modèle algébrique d'une interaction de variables d'un phénomène physique.

2.2 Cadre de rationalité

Pour distinguer l'aspect personnel de l'aspect culturel (ex : conceptions et concepts), Lerouge (2000) fait la distinction entre processus et procédure, registre symbolique et registre sémiotique, situation familière et situation de référence, rationalité personnelle et rationalité culturelle. Selon cet auteur, « *la distinction processus/procédure renvoie à la dualité de l'implicite et de l'explicite dans la description des phénomènes* » (Lerouge 2000, p.174-175). Ainsi, un processus est une activité mentale impossible à appréhender tandis qu'une procédure est une suite de prescriptions que l'on peut parfaitement exécuter et expliciter. Bunge (1983) fait référence à trois catégories d'objets :

- les objets matériels ayant une existence propre et matérielle. Par exemple une ficelle tendue ou une règle ;
- les objets mentaux ayant une existence psychique. Par exemple, la conception de la droite chez un sujet particulier ;
- les objets conceptuels qui font référence aux théories et modèles scientifiques. Par exemple, le concept de la droite, les axiomes et la démonstration en mathématique.

Par opposition à la notion de registres sémiotiques, Lerouge (2000) définit des registres symboliques pour désigner l'objet mental engendrant un ensemble structuré de symboles connotés subjectivement et remplissant une fonction de désignation, de traitement et de communication dans l'élaboration personnelle de la connaissance.

Une situation familière est disponible « *comme objet mental produit par l'expérience du sujet, et sur laquelle il fonde tout ou partie de la signification d'une conception* » (Lerouge, 2000, p.176). Tandis qu'une situation de référence est « *une situation culturellement identifiée sur laquelle est construite tout ou partie de la signification d'un concept* » (Lerouge, 2000, p.176).

Lerouge (2000) définit aussi la rationalité personnelle d'un élève comme « *un réseau d'objets mentaux dont les nœuds sont les conceptions, et les relations, les processus d'inférences stabilisés par le sujet.* » (Lerouge, 2000, p.174). Selon cet auteur, les conceptions de l'élève et leurs processus sont élaborés et opérationnalisés en utilisant divers registres symboliques greffés sur le registre fondamental de langue naturelle dont la signification fait référence à

des situations familières. Lerouge distingue deux types de processus d'inférence : les processus de construction des conceptions et les processus de validation de ces constructions. Ainsi, la rationalité personnelle « *apparaît comme le système global de structuration des connaissances d'un sujet particulier à un moment de son histoire.* » (Lerouge, 2000, p.174) Il précise ensuite que cette notion est dynamique parce qu'elle dépend des conceptions, de la chronologie de développement et des apprentissages de chaque sujet. Par opposition à la notion de rationalité personnelle, cet auteur définit la notion de rationalité culturelle d'une discipline comme « *un réseau d'objets conceptuels dont les nœuds sont les concepts de la discipline, et les relations, les procédures d'inférences culturellement stabilisées dans cette discipline.* » (Lerouge, 2000, p.174). Cette fois-ci, les concepts et les procédures sont élaborés et opérationnalisés par divers registres sémiotiques institués dont la signification fait renvoi à des situations de référence. Il distingue aussi deux types de procédures d'inférence : la procédure de construction des concepts et celle de validation propres à la discipline. La rationalité culturelle d'une discipline scientifique apparaît ainsi comme « *le système global de structuration des savoirs dans cette discipline, stabilisé par la culture humaine en un lieu et à une époque donnés* » (Lerouge, 2000, p.174).

En tenant compte de la dialectique entre rationalité personnelle et culturelle, et de la dualité familier/scientifique mise en évidence par Vygotski (1934) au sujet des processus de conceptualisation, Lerouge (2000) retravaille la définition de cadre de Douady (1984) pour proposer la notion de cadre de rationalité. Ainsi, un cadre de rationalité est « *un ensemble cohérent de fonctionnement local de la rationalité culturelle ou personnelle « cadré » en fonction d'un apprentissage particulier* » (Lerouge, 2000, p.176). Il est caractérisé par quatre composantes: son monde d'objets, ses processus et procédures de conceptualisation et de validation et leurs registres de signifiants, sémiotiques et symboliques. Ainsi, les processus et les procédures de traitement et de validation en mathématiques sont opérationnalisés par un raisonnement déductif à partir des axiomes tandis qu'en physique ces derniers sont souvent opérationnalisés par un raisonnement inductif élaborant la formulation d'une loi à partir d'un ensemble fini de données expérimentales. Par conséquent, grâce à ces différentes composantes, on peut distinguer les cadres de rationalité personnelle et culturelle des mathématiques des cadres de rationalité personnelle et culturelle de la physique. Puisqu'un cadre culturel de rationalité s'inscrit complètement dans la logique d'une discipline, un problème se pose. Comment analyser alors les activités et les processus cognitifs centrés sur

des objets conceptuels appartenant à des cadres culturels différents ayant des procédures différentes de traitement et de validation (exemple : la croissance linéaire du cadre culturel des mathématiques et la loi d'Ohm du cadre culturel de la physique)? Pour résoudre ce problème, Lerouge (2000) scinde la notion de cadre de rationalité par la théorie des champs conceptuels de Vergnaud puisque cette dernière s'inscrit dans une logique transdisciplinaire, impliquant deux cadres de rationalités différents. Notons qu'un champ conceptuel « *est un ensemble de situations dont la maîtrise progressive appelle une variété de concepts, de procédures, et de représentations symboliques en étroite connexion ; comme l'ensemble des concepts qui contribuent à la maîtrise des situations* » (Vergnaud, 1995, p.184).

2.2.1 Instabilité des structures des registres sémiotiques lors d'un changement de cadre de rationalité à l'école secondaire et au collégial

Les recherches de Malafosse, Dusseau et Lerouge (2000-2001) sur l'utilisation des registres graphiques et algébriques en physique, en particulier « *l'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* » (Malafosse, Lerouge, Dusseau, 2001), ont montré que, dans une activité de laboratoire en science, lors d'un changement d'un cadre de rationalité à un autre, les structures de ces derniers sont instables, c'est-à-dire « *le principe d'unité de représentation dans un registre donné n'est pas maintenu* » (Malafosse, 2002, p.64) et que la continuité entre chacun de ces registres est illusoire.

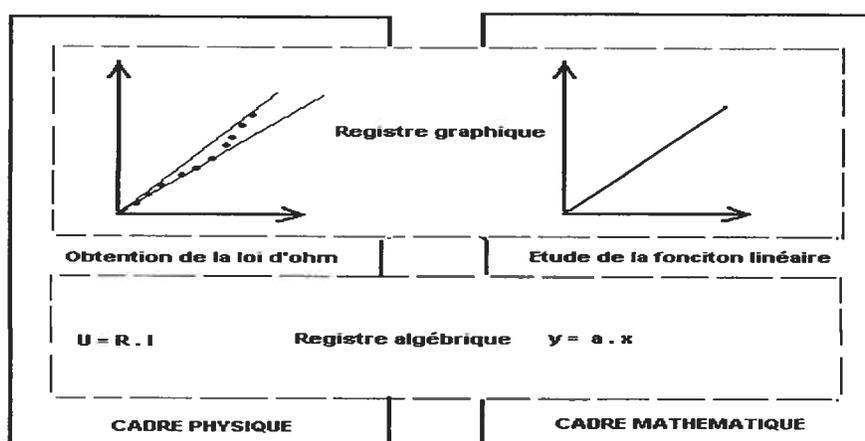


Figure 1: Instabilité des structures des registres sémiotiques

Selon ces auteurs, le point graphique en mathématique ressemble beaucoup au point graphique du plan (U, I) nécessaire à la vérification expérimentale de loi d'Ohm. Par contre, « *les relations structurelles du registre graphique qui autorisent les passages entre le point et la droite résistent moins bien au changement de cadre de rationalité : les changements de registre graphique/algébrique, et inversement s'en trouvent alors fortement affectés* », et « *lorsqu'on change de cadre disciplinaire, le principe d'unité de représentation dans un registre n'est pas maintenu* » (Malafosse, 2002, p.64) ce que résume le tableau 1 qui consiste à distinguer les propriétés caractéristiques des objets conceptuels suivant: point, droite et axe dans chaque cadre de rationalité en physique et en mathématique.

Cadre scolaire de la physique de troisième	Cadre scolaire mathématique
Tout point graphique du plan représente un état accessible au système mesuré. Pour tenir compte des incertitudes des mesures, on associe à tout couple de mesures (U, I) soit un point plus ou moins incertain, soit une surface (tache) dont la forme et l'aire dépendent de la qualité de la mesure.	A tout couple de nombres (x, y) on associe par bijection un point graphique du plan XOY de coordonnées x et y. Ce point a les propriétés géométriques d'un point géométrique.
Les axes graphiques ont les propriétés géométriques des droites orientées mais ils sont dimensionnés (par exemple, l'axe des abscisses a pour dimension une intensité, alors que l'axe des ordonnées est un axe de tension).	Les axes graphiques ont aussi les propriétés géométriques des droites orientées mais ils ne sont pas dimensionnés.
La forme et l'aire de chaque tache dépendent des conventions de mesure et de représentation (vecteurs unitaires dont la longueur dépend du choix des unités de mesures, convention de branchement des appareils de mesure).	Le point reste un point par changement d'unité des axes de coordonnées.
L'ensemble des taches graphiques représente l'ensemble des états probablement accessibles au système, à la précision des mesures près. Les incertitudes expérimentales ne permettent pas d'établir une relation de bijection entre l'ensemble des points graphiques couverts par les taches et l'ensemble des couples de mesures. La juxtaposition des taches donne une autre tache encore affectée d'incertitude. La propriété de continuité est occultée par celle d'imprécision des mesures.	L'ensemble des points graphiques est une droite graphique. La tache graphique n'a pas de sens.
Pour des raisons de limites expérimentales et d'imprécision des mesures, la bande est de longueur et d'épaisseurs finies.	Les propriétés géométriques de la droite graphique sont celles de la droite géométrique (longueur infinie, épaisseur nulle, etc.).
Le passage de la tache au point graphique et de la bande à la droite graphique se fait dans la perspective d'une idéalisation des procédures expérimentales et par interpolation et extrapolation de nature inductive des résultats expérimentaux idéalisés. Cette phase d'idéalisation conserve aux unités significatives du registre graphique des éléments de rationalité du cadre de la physique. En particulier, tout point graphique est affecté d'autant de dimensions physiques (tension et intensité) que de dimensions géométriques (deux pour une représentation plane).	Pour Duval (1988a, p. 14), « <i>la figuration d'un point relève d'une autre procédure de représentation que celle de la droite : elle est marquage d'une pure localisation, résultant d'une pure visée déictique, ou de croisement de deux droites tracées</i> ». « <i>Le tracé de la droite se génère dans un mouvement et la propriété de continuité relève de cette représentation dynamique</i> ».
Tant qu'elle n'est pas tracée, la droite graphique n'est pas convertible dans le registre algébrique sous la forme d'une relation fonctionnelle. C'est par construction de la droite qu'on crée le signifié.	La représentation graphique de la droite et sa conversion dans le registre analytique sous forme d'une relation fonctionnelle de type affine coexistent toujours. Le signifié correspondant existe par définition.

Tableau 1: Instabilité des structures des registres sémiotiques (Tiré de Malafosse D., 2002, p.64- 65).

2.2.2 Registres sémiotiques transversaux

Le souci d'analyser la rupture et la continuité des registres sémiotiques en changeant de cadre de rationalité amène Lerouge (2000) à postuler l'existence d'un registre transversal contextualisé à chacun des cadres mobilisés. Il considère donc qu'un registre sémiotique au sens de R. Duval « *peut être commun à plusieurs cadres ou spécifique à un cadre particulier, mais qu'il est typé par chacun des cadres dans lequel il fonctionne* ». Il considère ensuite que dans un cadre de rationalité donné, il apparaît un registre intra-cadre qu'on peut considérer stable au sens de Duval, et un registre inter-cadre dont il postule l'instabilité dans le changement de cadre.

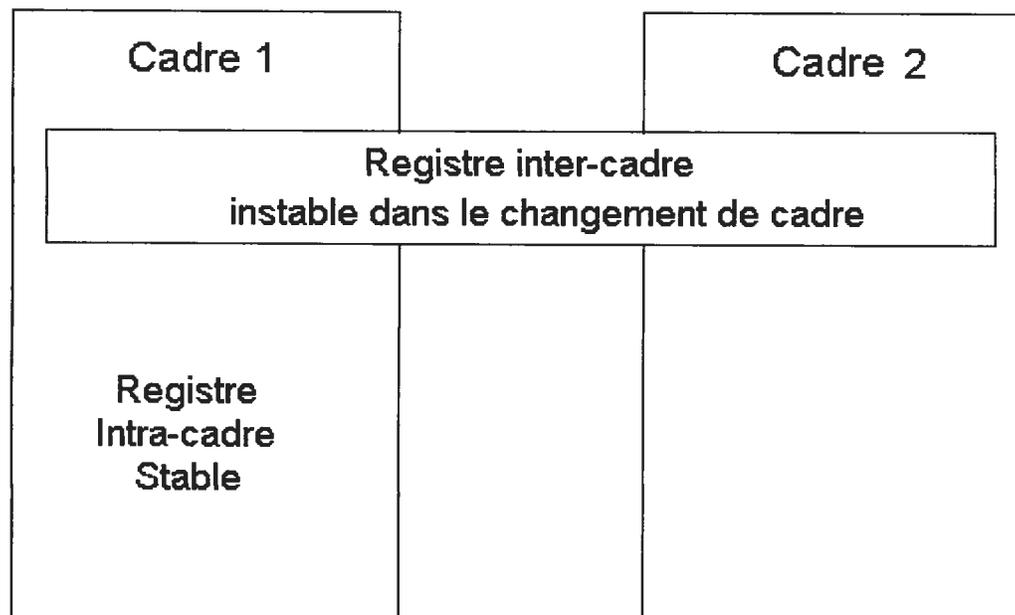


Figure 2 Registre sémiotique inter-cadre (Lerouge, 2000)

2.2.3 Conclusion

Lerouge (2000) postule qu'au niveau sémiotique, le jeu intra- ou inter-registres développe la distanciation du signe et de l'objet conceptuel, mais que la validité sémantique de ce jeu est à rechercher dans les cadres de rationalité. Or cet auteur souligne que souvent, « *les enseignants se placent généralement dans l'hypothèse de continuité des registres sémiotiques entre les mathématiques et la physique, ce qui met les élèves dans l'illusion de continuité quand on change de cadre disciplinaire* » (Malafosse, Lerouge, Dusseau 1999). A notre avis, si les professeurs du secondaire et du collège se placent dans cette hypothèse de fausse continuité c'est parce qu'ils n'ont pas les outils en mathématiques appliquées nécessaires pour enseigner la modélisation algébrique en tenant compte des incertitudes de mesures. En fait, la réalité expérimentale (les ensembles de points issus de mesure) est a priori informe et polymorphe, ce polymorphisme étant aggravé par le flou des incertitudes. D'autre part, les élèves n'ont guère d'appréhension du polymorphisme algébrique et de la constructibilité d'un modèle mathématique : ce dans ce rapport que se joue la conversion inter-registre. Ainsi, cette hypothèse de continuité ne permet pas à l'élève d'exercer ce jeu afin de distancier le signe de l'objet conceptuel et accéder au contenu conceptuel de la représentation sémiotique. On se pose alors la question suivante: comment aider l'élève à réussir ce jeu pour accéder de façon autonome au contenu conceptuel d'une représentation sémiotique d'un phénomène en physique (ex : la loi d'Ohm ci dessus) sans avoir les prérequis nécessaires en mathématiques appliquées (ex : méthode des moindres carrés, ou règle de minimisation)?

Avant de répondre à cette question, étant donné que, c'est par le jeu intra cadre et/ou inter-cadre (cadres mathématique et physique), intra et/ou inter-registre, que l'élève construit ses modèles, nous allons dans le paragraphe suivant définir la notion de modèle en sciences expérimentales et en mathématiques.

2.3 Notion de modèle

Astolfi et Drouin (1998, p.93) définissent un modèle comme étant:

«une représentation mentale d'un système, construite pour appréhender et rendre « pensable » un réel complexe (acceptabilité du modèle), en réponse à une question posée par le système».

Selon ces auteurs, un modèle possède trois résonances évoquant:

Des images et des schémas : le modèle sera ici un objet concret (maquette, modèle réduit), un schéma sous forme d'une image concrète ou une analogie. Par exemple, le modèle iconique représentant un atome, une molécule ou la structure de l'ADN...Que ce soit un objet concret ou un schéma, ce modèle privilégie l'aspect figuratif sur l'aspect opératif de la pensée.

Une théorie: le modèle tend à mettre en avant son côté construit et formel, par opposition au côté empirique. Le modèle ici semble être un artefact ou une interprétation plausible de la réalité, sans qu'il soit nécessairement une traduction fidèle de cette dernière. Ceci le distingue d'une théorie scientifique qui est un ensemble cohérent de lois. Dans ce cas, selon Giordan et Martinand cités dans Astolfi et Devely (1993, p.94), les modèles *«aident à penser le complexe : en identifiant et manipulant de bons systèmes, ils permettent de décrire les variables d'état et d'interaction, les relations internes entre ces variables, les valeurs des contraintes extérieures».*

La mathématisation : le modèle scientifique est très souvent associé à la formalisation mathématique. Dans ce cas, selon Giordan et Martinand cités dans Astolfi et Devely (1993, p.94), les modèles *«facilitent la représentation du caché : en remplaçant les représentations premières par des variables, des paramètres et des relations entre variables, ils font passer à des représentations plus relationnelles et hypothétiques»* et même plus synthétiques.

Ensuite, selon ces auteurs, un modèle se présente comme un objet construit qui sera un substitut de la réalité, la simplifiant pour mieux la comprendre, une interface, *« sans importance intrinsèque »* (p.65), avec laquelle on pense tout en facilitant le processus

intellectuel ainsi que l'intelligibilité d'un phénomène. En mathématique, selon Blum et al. (2003), un modèle est la description ou la représentation d'un résultat issu d'une interaction avec une situation problème réelle ou abstraite afin de la simplifier, la structurer et la rendre plus précise pour mieux la comprendre. Que ce soit en mathématiques ou en sciences expérimentales, la définition du terme modèle semble recueillir un assez large consensus chez les didacticiens de ces deux disciplines sur le fait qu'un modèle semble être tout d'abord une simplification et un substitut de la réalité pour mieux la prédire et la comprendre. Pour lui donner un statut scientifique, le modèle doit être, selon Dupin (1995) :

Calculable : ici, le terme calculable ne se limite pas à l'algèbre ou à l'analyse. Le sens de cette composante du modèle est pris au sens plus large « *où des inférences maîtrisées peuvent être produites à partir des relations de base du modèle* » (p.249). Les méthodologies employées pour conduire ce calcul sont intrinsèques au modèle. Cette définition nous permet de prendre en compte des modèles qualitatifs.

Explicatif : « *permettant des mises en relations, des mises en ordre au sein d'une représentation d'une réalité complexe, il [modèle] crée des espaces de compréhension et de sens où vont pouvoir s'organiser des connaissances nouvelles* » (Dupin, 1995, p.249).

Productif : le modèle peut produire des phénomènes nouveaux, qui par exemple n'auraient jamais été observés et expérimentés.

Prédictif : par son aspect calculable, le modèle permet de prédire des valeurs probables, c'est-à-dire proches des valeurs expérimentales mesurées avec une certaine marge d'erreur.

Pertinent à son objet : « *la science construit un modèle découpant dans l'extrême complexité du réel des aspects très limités, définissant les limites de validité du modèle. Le scientifique se taille des objets à la mesure des connaissances qu'il pourra produire à leur propos.* » (Dupin, 1995, p.249).

Cohérent: le modèle doit avoir une cohérence interne : il doit respecter des règles précises de fonctionnement et de la logique formelle. Il doit avoir aussi une cohérence externe avec ce qu'on sait par ailleurs. Selon Dupin (1995), la cohérence externe « *joue un rôle éminent de garantie de scientificité du modèle bâti : la non cohérence externe révèle, dans la plupart des cas, une inadéquation du modèle (faux ou insuffisant) et, parfois, une avancée historique dans le domaine des connaissances, invalidant des pans entiers du déjà-là* » (p.249).

Ayant défini le terme modèle et par souci de clarté, nous aimerions par la suite définir les termes représentation, conception et concept.

2.3.1 Représentation, conception et concept

Dans le cadre de cette recherche, en nous référant à la définition du modèle d'Astolfi et Drouin (1998), nous réservons le terme représentation à la description mentale du modèle. Nous allons aussi adopter la définition d'Astolfi du terme concept. Selon cet auteur (1990), un concept est un « *outil intellectuel qui se veut objectivé et qui établit entre des phénomènes une relation suffisamment générale et invariante pour autoriser la prévision de résultats ou d'effets* ». Ainsi, un modèle scientifique sera constitué et opérationnalisé objectivement par un ensemble de concepts. Vergnaud (1990) rend la définition d'un concept indissociable d'un triplet (référence, signifié, signifiant) de trois ensembles respectifs:

- « - *l'ensemble des situations qui donnent un sens au concept*
- *L'ensemble des invariants sur lesquels repose l'opérationnalité du concept*
- *L'ensemble des formes langagière et non langagière qui permettent de représenter symboliquement le concept, ses propriétés, les situations et les procédures de traitement* » (p.145-146).

Puisque l'opérationnalité objective des modèles scientifiques repose sur un ensemble cohérent de concepts, alors l'opérationnalité subjective des modèles de l'élève reposera sur un ensemble de conceptions qui lui sont propres. Selon Joshua et Dupin (1999, p.122), plusieurs sources contribuent à l'émergence des conceptions de l'élève. Citons-en quelques-unes:

- L'environnement social de l'élève engendré par des relations et des exigences au niveau de croyances religieuses, politiques et historiques pouvant produire des

fausses conceptions. Par exemple, avant le 16^{ième} siècle, on croyait que c'était le soleil qui tournait autour de la terre.

- Le rapport affectif de l'élève qu'il entretient avec les objets et les personnes. Citons l'exemple d'Hewson et Hamlyn (1983), cités dans Joshua et Dupin (1999, p.122), de la fausse conception associant la chaleur à un sentiment de tristesse et de malheur chez les populations sud-africaines.

Cette opérationnalité subjective du modèle n'est toutefois pas satisfaisante pour se faire une représentation ayant valeur de prédiction et d'explication pour l'objet représenté. En intégrant la démarche scientifique, principalement une démarche inductive et une modélisation mathématique, on va permettre la construction d'un modèle scientifique.

2.4 Modélisation scientifique

Astolfi, Peterfalvi et Vérin (1998) notaient que la démarche scientifique ne consiste pas seulement à l'observation et à l'expérimentation, mais aussi à la construction des modèles. Ainsi, en sciences expérimentales, la modélisation scientifique est en général le processus par lequel un individu tente d'élaborer un modèle en se référant à une situation concrète ou abstraite. Selon Larcher, cité dans Astolfi, Peterfalvi et Vérin (1998, p.95), « *la modélisation est une démarche qui consiste à élaborer, en référence à un réel complexe, une construction mentale nouvelle, « manipulable » en vue d'assurer une fonction explicite. Elle est, en ce sens, une étape incontournable à la fois dans le processus même de construction des connaissances scientifiques et lors de l'utilisation de ces connaissances* ». En mathématique, selon Blum et al. (2003, p.5) « *the process leading from a problem situation to a mathematical model is called mathematical modelling* ».

Le processus de modélisation en science est généralement cyclique et itératif. Comme le schéma l'indique (voir fig.1), la modélisation en science repose essentiellement sur deux activités cognitives de la pensée : l'induction et la déduction.

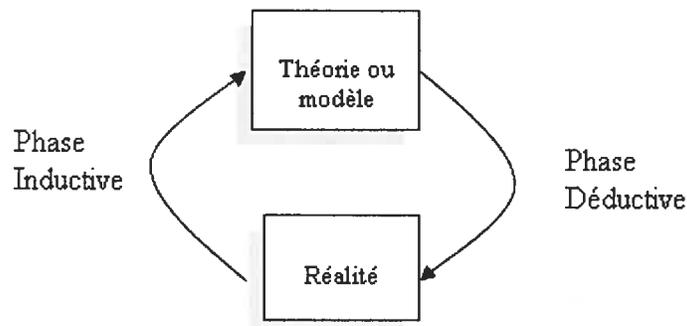


Figure 3: Cycle de modélisation en sciences expérimentales

Dans la phase inductive, l'élaboration d'un modèle repose sur l'interaction avec la réalité qui nous permettra de bien la comprendre, la décrire et l'expliquer. Donc, dans cette phase, l'activité cognitive de la pensée part essentiellement du concret vers l'abstrait ou encore du particulier vers le général. Dans la phase déductive, l'activité cognitive de la pensée part cette fois-ci de l'abstrait vers le concret ou encore du général vers le particulier. Dans le but de vérifier et d'améliorer le modèle construit dans la phase inductive, on tente, avec ce dernier, de prédire les résultats d'une ou de plusieurs expériences et de les valider en les confrontant avec les résultats recueillis par l'expérience elle-même. Ainsi, par essai et erreur, on parcourt ce cycle fermé afin d'obtenir le modèle le plus pertinent. Ce cycle fermé, induction et déduction, définit le processus de modélisation en sciences expérimentales qui sera appelé « *démarche scientifique ou méthode scientifique* » (Beaugrand, 1988, p.1 et 6). Il semble que ce cycle itératif soit aussi adopté en mathématiques mais sans lui attribuer le même terme « *démarche scientifique ou méthode scientifique* ». Selon Blum et al. (2003), en interaction avec une situation ou un problème réel, on élabore un modèle mathématique qui, à son tour, selon les règles et les méthodes mathématiques, nous fournit des résultats. Dans cette phase, le modèle est « *un moyen d'étude, d'expérimentation et d'observation* » (Rojat, 2004, p.1-3). Ces résultats seront interprétés pour décrire de nouveau la situation. Dans cette phase, le modèle joue « *le rôle d'un outil d'explication et/ou d'exposition de conceptions scientifiques* » (Rojat, 2004, p.1-3). Ainsi, le modèle, comme objet d'étude, sera validé lorsque les prédictions réalisées avec ce dernier permettront de décrire et de comprendre cette situation de problème. Blum et al. (2003) précisent ensuite que ce processus sera répété, dans le but de modifier, d'améliorer, d'optimiser et d'obtenir le modèle le plus cohérent et le plus pertinent. Sur ce sujet, reprenons les termes de Blum et al. (2003):

«it has become common to use that notion [modelling] also for the entire process consisting of structuring, mathematising, working mathematically and interpreting/validating (perhaps several times round the loop)” (p.5).

En sciences expérimentales, Nonnon (1986, p.29) a détaillé les étapes de la démarche scientifique comme dans la figure 4:

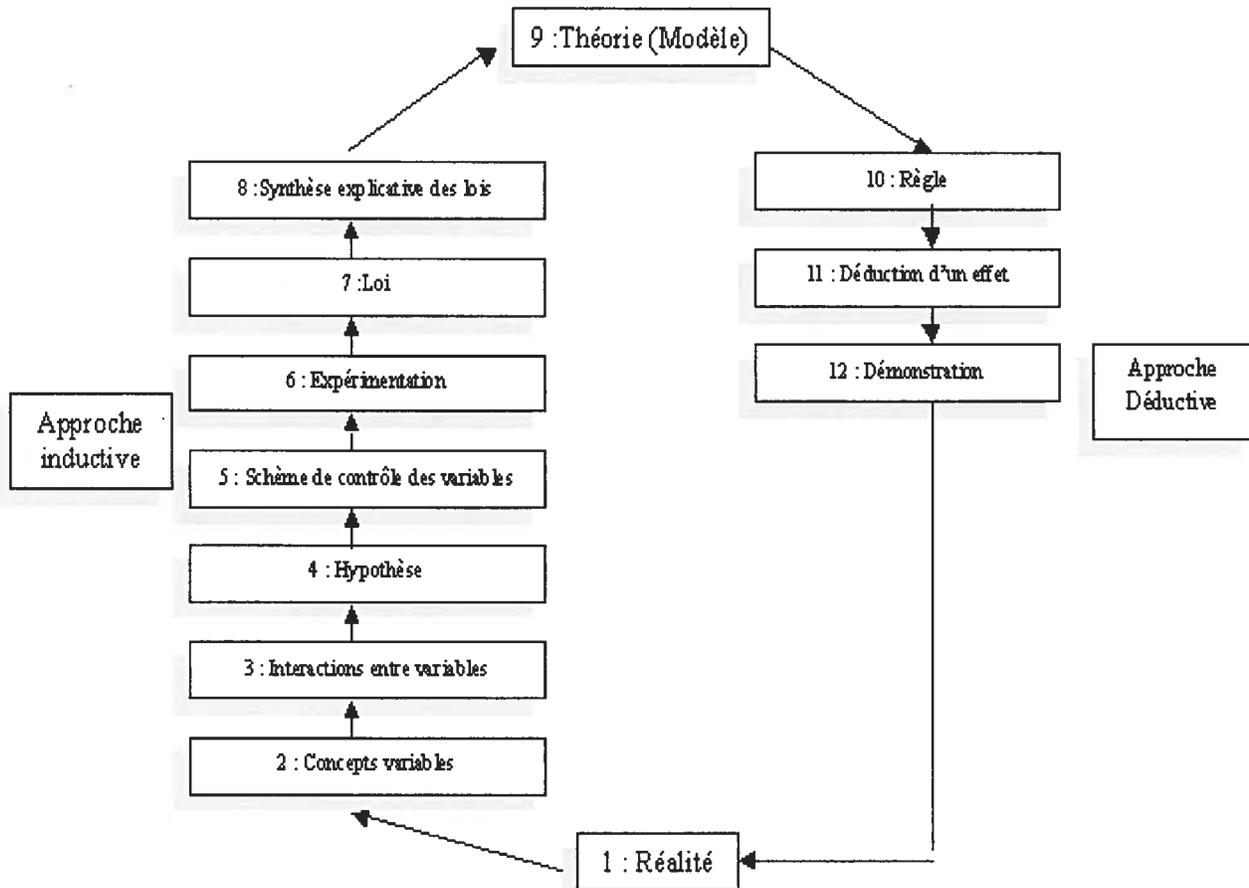


Figure 4: Démarche scientifique selon Nonnon (1986)

Nonnon (1986, p.27), et Johsua et Dupin (1999, p.49) semblent s'entendre bien sur les différentes étapes des phases inductive et déductive de la démarche scientifique. Selon Nonnon (1986, p.30), dans la phase inductive, en interaction avec la réalité, c'est-à-dire avec un phénomène réel en sciences, on identifie les variables en jeu et on prédit ensuite leur interaction sous forme d'une hypothèse qui sera à son tour formalisée dans un schème de contrôle de variables permettant ainsi de planifier l'expérimentation. A partir des résultats

recueillis, on pourra dégager alors une ou des lois. Ensuite, la synthèse explicative de ces lois nous permettra de construire un modèle ou une théorie. Dans la phase déductive, on tente, avec ce modèle, de répondre à une question donnée reliée au phénomène de départ. Ensuite, on formule des propositions ou des effets qui permettront non seulement d'expliquer et de répondre à la question mais aussi de déduire et prédire des résultats de l'expérience. Afin de valider le modèle construit dans la phase inductive, c'est-à-dire de l'infirmier ou de le confirmer, on compare les résultats prédits et déduits avec des données provenant de la réalité, des données nouvelles tirées par exemple d'une nouvelle expérience où l'on aurait modifié la variable indépendante. Ainsi, en se référant aux travaux de Nonnon (1986) sur la modélisation en sciences expérimentales et sur la définition de la modélisation mathématique de Blum et al. (2003), nous pourrions alors résumer l'activité mathématique dans la démarche scientifique par le schéma suivant :

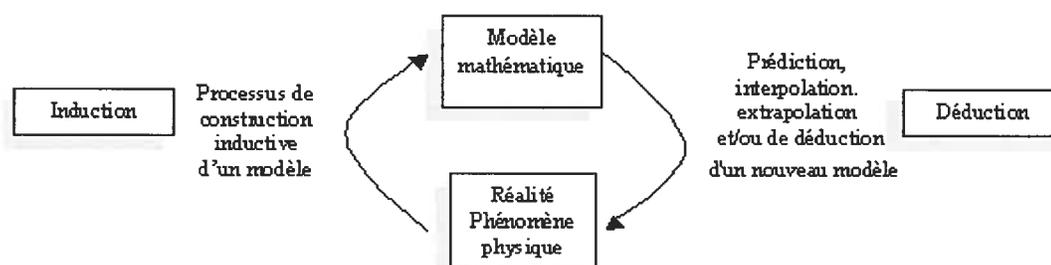


Figure 5: Les activités mathématiques dans la démarche scientifique

Nous considérons que les phases inductive et déductive ne sont pas parfaitement disjointes comme la figure 5 pourrait le laisser croire. Ainsi, à l'intérieur d'une phase inductive, lors de la formulation d'une hypothèse, on peut aussi avoir recours à la déduction : c'est le raisonnement hypothético-déductif, qui met à profit des lois supposées vraies ou des relations déjà étudiées pour élaborer de nouvelles suppositions, ou inductions.

2.5 Modélisation didactique

La modélisation en didactique fait référence à deux aspects différents qui méritent d'être distingués :

- 1) l'étude de l'appropriation ou la reconstruction à des fins pédagogiques, par l'élève, des modèles construits par les scientifiques ;
- 2) l'utilisation de modèles construits par les didacticiens afin de décrire la(es) situation(s) didactique(s) d'appropriation des modèles scientifiques par les élèves.

Dans le cadre de cette recherche, nous nous intéressons au premier cas, celui de la reconstruction par l'élève des modèles construits par les scientifiques. Rappelons que nous sommes intéressé à transcender les méthodes traditionnelles de l'enseignement de la physique parce qu'elles sont hors de portée de nos étudiants. Quel pourrait être le substitut à ces méthodes, qui leur permettrait malgré tout de décrire une relation de causalité sous forme d'une relation algébrique entre des variables dans l'étude d'un phénomène physique ?

Selon Astolfi, Peterfalvi et Vérin (1998), pour étudier l'activité de modélisation par l'élève, il faut distinguer deux registres : celui du référent empirique (les objets et phénomènes) et celui, plus abstrait, de l'élaboration modélisante. Selon ces auteurs, il est nécessaire de voir comment l'élève peut passer de l'un à l'autre et analyser les tâches intellectuelles ainsi que les activités cognitives favorisant ce passage. Ils notent, à cet égard, un malentendu coutumier entre professeur et élève. Ce malentendu s'explique par le fait que le modèle, chez le professeur, fonctionne souvent comme une seconde nature et lui semble relever du domaine du référent tandis que chez les élèves ce référent n'existe pas et peut même agir dans le sens contraire, c'est-à-dire augmenter la complexité de la situation et la rendre incompréhensible. Lemeignan et Weil-Barais (1993, p.7) notaient qu'au contact avec l'environnement, l'élève développe nécessairement des représentations (analogies, métaphores et modèles) dans le but d'anticiper, d'expliquer et de comprendre les événements de cet environnement. Ces représentations sont qualifiées de spontanées parce qu'elles se sont élaborées en dehors d'un enseignement formel. Selon Astolfi (1998), pour comprendre, agir et construire des modèles en sciences, l'élève fait appel d'abord à ses propres conceptions du phénomène à l'étude. Johsua et Dupin (1999) ajoutent que la compréhension et l'appropriation d'un modèle

scientifique par l'élève deviennent véritablement effectives si au moins une conception de l'élève entre en conflit avec un concept scientifique donné. Pour ce faire, ces auteurs proposent de mettre l'élève dans une situation de conflit cognitif, c'est-à-dire une situation d'expérience dont les résultats contredisent ses conceptions. De cette façon, on amène l'élève à rejeter, mais surtout à revoir ou à améliorer ses propres conceptions (en le plaçant en même temps en situation de méta-cognition). En d'autres termes, l'élève remplace ses conceptions par de nouvelles exprimant ainsi de nouvelles idées qu'il peut se faire du phénomène afin de les rendre plus conformes à la réalité, voire même de les rapprocher du modèle scientifique. Ainsi, le modèle de l'élève engendrant ces nouvelles conceptions devient un substitut de la réalité de cette situation. Par conséquent, Astolfi, Peterfalvi et Vérin (1998, p.98) notent «*un glissement sensible dans la nature de la tâche, puisque l'action sur le réel est remplacée par une activité mentale dans le cadre (ou à partir) du modèle, ou bien déplacée vers une action matérielle substitutive*». C'est sur cette activité de substitution que l'activité mentale de modélisation mathématique repose essentiellement.

L'activité cognitive de substitution, à partir du modèle explicatif primitif d'un phénomène en physique chez l'élève vers un autre modèle mathématique prédictif et calculable, mobilise certains registres sémiotiques, qui lui sont associés, et cela lors d'un changement de cadre de rationalité au sens de Lerouge (2000). Afin d'analyser et comprendre les difficultés, chez l'élève, du passage du registre de référent empirique au registre de l'élaboration modélisante lors d'une démarche expérimentale, il nous paraît important de détailler les activités mathématiques en sciences expérimentales et intuitionner comment on peut aider l'élève à parcourir ce cycle et effectuer le mieux possible cette activité mentale de substitution. Pour ce faire, nous allons profiter des capacités graphiques de l'ordinateur pour donner à l'étudiant une image animée de ces différentes représentations (ou registre, au sens de Duval) afin de lui permettre de mieux les appréhender et conceptualiser.

2.5.1 Activité de construction inductive d'un modèle mathématique

Étant donné que le modèle de Duval sur les registres sémiotiques s'applique essentiellement au domaine des mathématiques, ce modèle n'est pas suffisant pour expliciter la démarche de nos étudiants en sciences expérimentales. Nous devons prendre en considération le changement de cadre de rationalité défini par Lerouge (2000) pour effectuer le passage entre le cadre de la physique au cadre des mathématiques. Nous définirons alors, l'activité de construction inductive d'un modèle mathématique en sciences expérimentales par le processus cognitif avec lequel on construit un objet conceptuel mathématique (ou un modèle mathématique: fonction d'une variable, droite, parabole, etc.) d'une représentation sémiotique d'un ensemble de couples de points d'un phénomène physique (ex: loi d'Ohm). Ce processus de construction requiert alors un changement de cadre de rationalité. En effet, la représentation sémiotique d'un phénomène physique s'inscrit au départ dans le cadre de rationalité de la physique (Fig. 6). Dans ce cas, l'objet conceptuel mathématique de cette représentation sémiotique de départ n'existe pas a priori. Ceci est dû aux caractères probabiliste et discontinu des données expérimentales (Fig. 6). Il faut donc le transférer et le construire dans le cadre de rationalité mathématique (Fig. 6). Cette construction consiste à transformer et à interpréter sous forme mathématique cet ensemble de couples points informe et polymorphe du domaine de la physique.

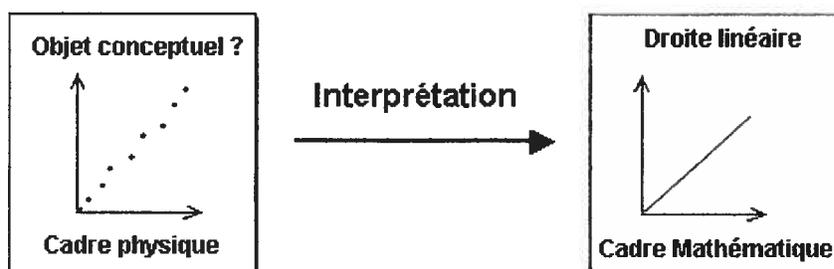


Figure 6: Activité d'interprétation

Cette activité de transformation n'est pas prise en compte par Duval (1995). Cette Activité n'est, selon nous, ni une activité de conversion ni une activité de traitement puisque, selon Duval (1995), un traitement ou une conversion requiert a priori un objet conceptuel pour pouvoir transformer sa représentation sémiotique soit dans le même registre sémiotique de départ (traitement), soit dans un autre (conversion) (voir figure 7).

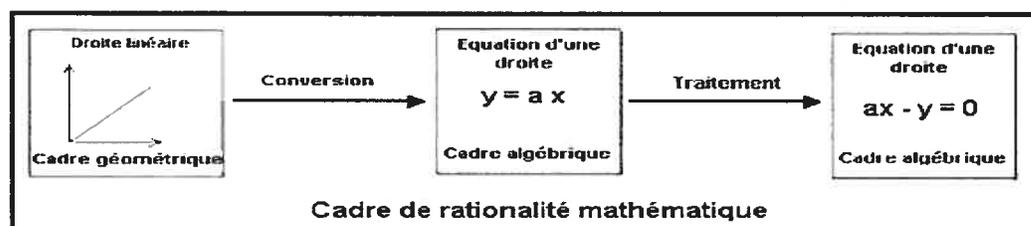


Figure 7: Conversion et Traitement

Notons aussi que ces deux activités cognitives (conversion et traitement) s'inscrivent dans le même cadre de rationalité mathématique. Or, dans notre cas (loi d'ohm), l'activité de transformation requiert un changement de cadre de rationalité disciplinaire. Dans ce cas, l'objet conceptuel sera construit durant le processus de modélisation algébrique. L'ensemble des points issus de l'expérimentation nécessite donc une interprétation qui permet d'identifier et de choisir le modèle mathématique⁴ pour permettre à l'apprenant de changer de cadre de rationalité avant d'exercer les activités de conversion et de traitement telles que définies par Duval. Pour distinguer cette activité de transformation des deux activités cognitives de traitement et de conversion au sens de Duval (1995), nous allons la désigner par interprétation inductive (figure 7 modifiée, 7a).

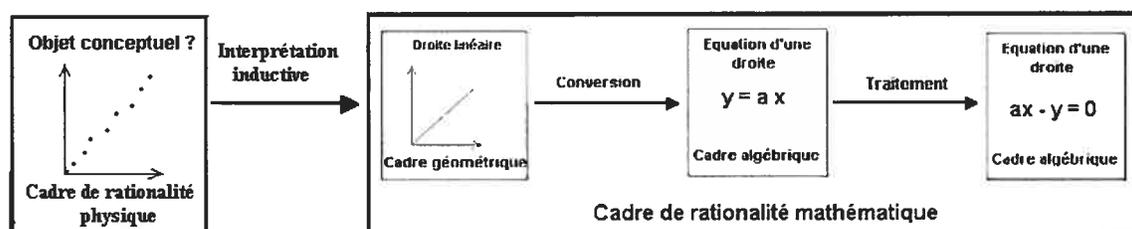


Figure 7a: Interprétation inductive, conversion et traitement.

⁴ Il faut noter que ce choix peut prendre la forme d'une hypothèse que nous pourrions valider ensuite en optimisant la courbe et en évaluant l'erreur.

2.5.2 Méthodes et outils en mathématiques appliquées pour l'activité inductive de construction d'un modèle

Nous commençons par décrire les méthodes en mathématiques appliquées qui sont essentielles à l'activité inductive de construction de modèle mathématique linéaire et non linéaire des phénomènes physiques. Nous allons ensuite discuter des limites et des difficultés de ces méthodes.

2.5.2.1 Modèle linéaire

Nous allons discuter trois façons de construire la droite qui s'ajuste le mieux à un ensemble de points expérimentaux en prenant comme exemple le mouvement d'un mobile sur un plan incliné: la détermination graphique et visuelle avec ordinateur, la détermination graphique et visuelle sans ordinateur et la méthode des moindres carrés. Il s'agit donc de trouver la meilleure droite qui passe par cet ensemble de points et de déterminer l'incertitude de mesure sur la position du mobile en fonction du temps.

2.5.2.2 Détermination graphique et visuelle avec ordinateur

La méthode de détermination graphique et visuelle avec ordinateur est utilisée par les logiciels ExAO, en particulier par ceux qui sont développés au Laboratoire de Robotique Pédagogique de l'Université de Montréal par Riopel (2005) et Fournier (2003). Dans les deux logiciels de Riopel et Fournier, l'étudiant choisit l'équation algébrique de la courbe correspondant le mieux à un ensemble de points expérimentaux. Ensuite, l'étudiant se contente d'ajuster visuellement les paramètres de cette équation afin de superposer graphiquement la courbe théorique sur les points expérimentaux. Cependant, ces deux chercheurs utilisent une méthode essentiellement visuelle qui ajuste la courbe sans aucun critère quantitatif externe et sans déterminer l'incertitude sur la prédiction.

2.5.2.3 Détermination graphique et visuelle de la meilleure courbe sans ordinateur

La deuxième méthode est une méthode essentiellement visuelle utilisée principalement par les professeurs de physique. Soit la figure 8 d'un ensemble de points de la position du mobile en fonction du temps.

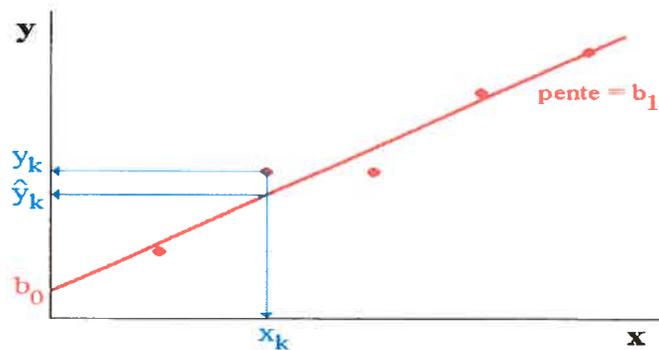


Figure 8: Position en fonction du temps d'un mobile

Pour trouver l'équation de la meilleure droite qui passe par l'ensemble de ces points, la deuxième méthode consiste à la tracer visuellement. Pour ce faire, cette droite doit :

- passer le plus possible par l'ensemble (centroïde) des points tracés sur le graphique en minimisant les écarts entre elle et les points.
- équilibrer le plus possible les points de part et d'autre de cette droite.

Pour déterminer les paramètres de cette équation, on choisit visuellement deux points de cette droite. Ensuite, on prend leurs coordonnées et on forme un système de deux équations à deux inconnues. La solution de ce système nous donne la pente (ou coefficient directeur) et l'ordonnée à l'origine de cette droite. Pour évaluer l'incertitude sur la mesure de la variable à l'étude, on doit d'abord calculer pour chaque point son écart vertical à la droite symbolique tracée antérieurement, ensuite calculer soit :

- L'écart absolu maximum, soit
- L'écart absolu moyen, soit
- L'écart-type de la série statistique des écarts, ou erreur-type.

2.5.2.4 Limites et problèmes

Le grand problème de ces deux méthodes est la détermination de la meilleure courbe qui est une détermination visuelle subjective sans base mathématique explicite. Notons aussi que, pour évaluer l'incertitude, nous devons passer d'une méthode essentiellement visuelle pour déterminer l'équation à une méthode purement arithmétique pour déterminer l'incertitude de mesures.

En ce qui concerne la deuxième méthode, dans un laboratoire traditionnel, elle s'effectue souvent sur un échantillon peu nombreux de mesures, qui risque fort de mal représenter le phénomène à l'étude. Sur un grand nombre d'échantillons, la deuxième méthode, à main levée, ne permet pas d'évaluer facilement l'écart moyen ou l'erreur-type, cela prendrait trop de temps. Pour ces raisons, beaucoup de professeurs n'ont jamais eu le temps de l'introduire dans leurs cours. En plus, elle ne s'applique que sur un modèle linéaire de premier degré. Donc, on ne peut pas la généraliser sur des fonctions paraboliques, hyperboliques, exponentielles, sinusoïdales, etc. Pour modéliser ces fonctions avec cette méthode de façon indirecte, on devrait effectuer des transformations de variables et appliquer ensuite des procédures de calculs qui débordent le niveau de l'enseignement secondaire et même le début du collégial (ex : passage à une échelle logarithmique).

2.5.2.5 Méthode des moindres carrés

Contrairement aux deux premières méthodes, la méthode des moindres carrés est rigoureuse et reconnue en même temps dans les deux domaines des mathématiques et des sciences expérimentales. Pour la décrire, nous allons l'appliquer sur une droite linéaire.

Pour trouver la meilleure droite, $\tilde{y} = b_0 + b_1 x$ passant par les données empiriques $(x_i, y_i, i=1, \dots, n)$, il faut trouver b_0 et b_1 tels que la somme des carrés des écarts entre valeurs y_i observées et les valeurs prédites correspondantes $\tilde{y}_i = b_0 + b_1 x_i$ soit minimale:

$$SC = \sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2$$

$$SC = \sum_{k=1}^n (y_k - b_0 - b_1 x_k)^2 = \Phi(b_0, b_1)$$

Ainsi, cette somme est minimale si et seulement si les dérivées partielles sur b_0 et b_1 sont nulles. Alors, pour trouver b_0 et b_1 , il faut résoudre le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial b_0}(b_0, b_1) = -2 \sum_{k=1}^n (y_k - b_0 - b_1 x_k) = 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial b_1}(b_0, b_1) = -2 \sum_{k=1}^n x_k (y_k - b_0 - b_1 x_k) = 0 \end{cases}$$

Ce système donne la solution suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{b}_0 = \frac{\sum_{k=1}^n x_k^2 \sum_{k=1}^n y_k - \sum_{k=1}^n x_k \sum_{k=1}^n x_k y_k}{n \sum_{k=1}^n x_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2} = \bar{y} - b_1 \bar{x} \\ \hat{b}_1 = \frac{n \sum_{k=1}^n x_k y_k - \sum_{k=1}^n x_k \sum_{k=1}^n y_k}{n \sum_{k=1}^n x_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2} = \sqrt{\hat{xy}} S_y / S_x \end{array} \right.$$

Cette méthode associe à chaque paramètre de l'équation un écart type (b_0, s_0) et (b_1, s_1)

$$\left\{ \begin{array}{l} s_0 = s_r \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n x_k^2}{n \sum_{k=1}^n x_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2}} \\ s_1 = s_r \sqrt{\frac{n}{n \sum_{k=1}^n x_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2}} \end{array} \right.$$

Où $s_r^2 = (\sum (y - \hat{y})^2) / (n-2)$ et s_r est l'erreur-type d'estimation

2.5.2.6 Limites et difficultés de la méthode des moindres carrés

On voit clairement ici que la solution utilisant la méthode des moindres carrés requiert des savoirs et des savoir-faire en mathématiques comme la notion de dérivée partielle, qui est au delà du niveau secondaire et qu'on ne pourra guère présenter à ces élèves tel que présentée et

discutée dans le paragraphe précédent. Notons que cette méthode est presque toujours utilisée dans les logiciels et les calculatrices programmables pour calculer automatiquement l'équation algébrique linéaire d'un phénomène en science. Toutefois, il nous semble pertinent, avant de l'intégrer dans le prototype, de créer un module d'analyse visuelle du processus de modélisation en incluant l'incertitude. En effet, le calcul automatique ne permet pas à l'élève d'accéder à une véritable compréhension de la modélisation algébrique, puisque les opérations mathématiques sous-jacentes sont occultées. De plus, cette méthode, même si elle détermine directement les incertitudes sur la qualité de l'ajustement de chaque paramètre de l'équation, ne détermine pas directement l'incertitude sur la variable à l'étude. Soulignons aussi que cette méthode ne s'applique pas directement sur des fonctions non linéaires comme les fonctions exponentielles, sinusoïdales, etc. Pour pouvoir la généraliser à d'autres fonctions, on devra :

- effectuer des transformations de variables (ex : ramener la fonction exponentielle à une droite en remplaçant chaque valeur par son logarithme)
- utiliser des algorithmes itératifs pour les modéliser (ex : algorithme de Newton-Raphson, Marquadt).

2.5.2.7 Conclusion

Nous avons parlé de l'activité de construction inductive du modèle mathématique et défini l'activité cognitive d'interprétation inductive d'une représentation sémiotique d'un phénomène en sciences expérimentales. Pour que l'élève parvienne au stade de l'interprétation inductive, il est nécessaire qu'il maîtrise des méthodes en mathématiques appliquées correspondant à cette activité cognitive. Cependant, ces méthodes, qui sont disponibles actuellement en mathématiques appliquées, requièrent des savoirs et savoir-faire mathématiques au-delà du niveau secondaire. Si, comme nous l'avons déjà décrit, les deux premières méthodes visuelles ne sont pas retenues parce qu'elles sont approximatives, sans fondement mathématique, et ne s'appliquent facilement que sur un échantillon très petit d'un modèle linéaire du premier degré, on se trouve alors obligé de court-circuiter le processus et de priver l'élève de cette activité de construction inductive si importante en sciences expérimentales. A cause des difficultés de ces méthodes, et pour ne pas priver l'élève de cette activité, il nous faut trouver une idée de solution qui permettrait à l'élève d'optimiser la fonction en même temps qu'il évaluerait l'incertitude sur la mesure de la variable à l'étude en

l'exemptant des difficultés inhérentes à toutes ces méthodes des mathématiques appliquées. Nous voulons trouver une méthode qui soit autant visuelle que la première méthode et aussi «scientifique» que la méthode des moindres carrés.

2.5.3 Activités déductives à partir du modèle mathématique

L'activité déductive à partir du modèle mathématique s'inscrit essentiellement dans la phase déductive de la démarche scientifique (voir les étapes 10,11 et 12 de Nonnon, 1986). En sciences expérimentales, très souvent, les quantités et les variables auxquelles on s'intéresse ne se prêtent pas directement à la mesure expérimentale. Ainsi, il faut les calculer ou les prédire à partir du modèle mathématique et de l'objet conceptuel construit dans la phase inductive. Pour ce faire, on doit d'abord avoir accès au contenu conceptuel ou au concept de cet objet mathématique. Cependant, il ne suffit plus de parvenir au stade de coordination au sens de Duval, c'est-à-dire de pouvoir mettre en correspondance les unités signifiantes des différentes représentations sémiotiques de cet objet. On doit aussi être capable de les mettre en correspondance avec les propriétés, les caractéristiques des objets phénoménaux et les conditions expérimentales parce que souvent ces derniers agissent sur la représentation sémiotique. Cette activité de mise en correspondance est nécessaire pour la validation des prédictions et la cohérence interne du modèle mathématique. Ainsi, nous désignerons cette activité cognitive de mise en correspondance par interprétation déductive.

Pour mieux nous faire comprendre, nous allons donner un exemple concret, celui de la loi d'Ohm. Soit un circuit électrique (Fig. 9) formé d'un générateur, d'un ampèremètre, d'une résistance et d'un voltmètre aux bornes de la résistance:

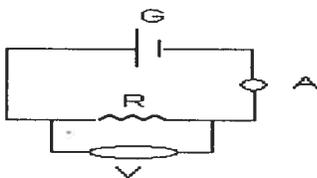


Figure 9: Circuit électrique de la loi d'Ohm

Pour étudier le voltage, aux bornes de la résistance, en fonction du courant, on prend d'abord plusieurs mesures du courant et du voltage. Avec ces mesures, on forme une ou plusieurs représentations sémiotiques : une table de valeurs ou un graphique (voir figure 10), etc.

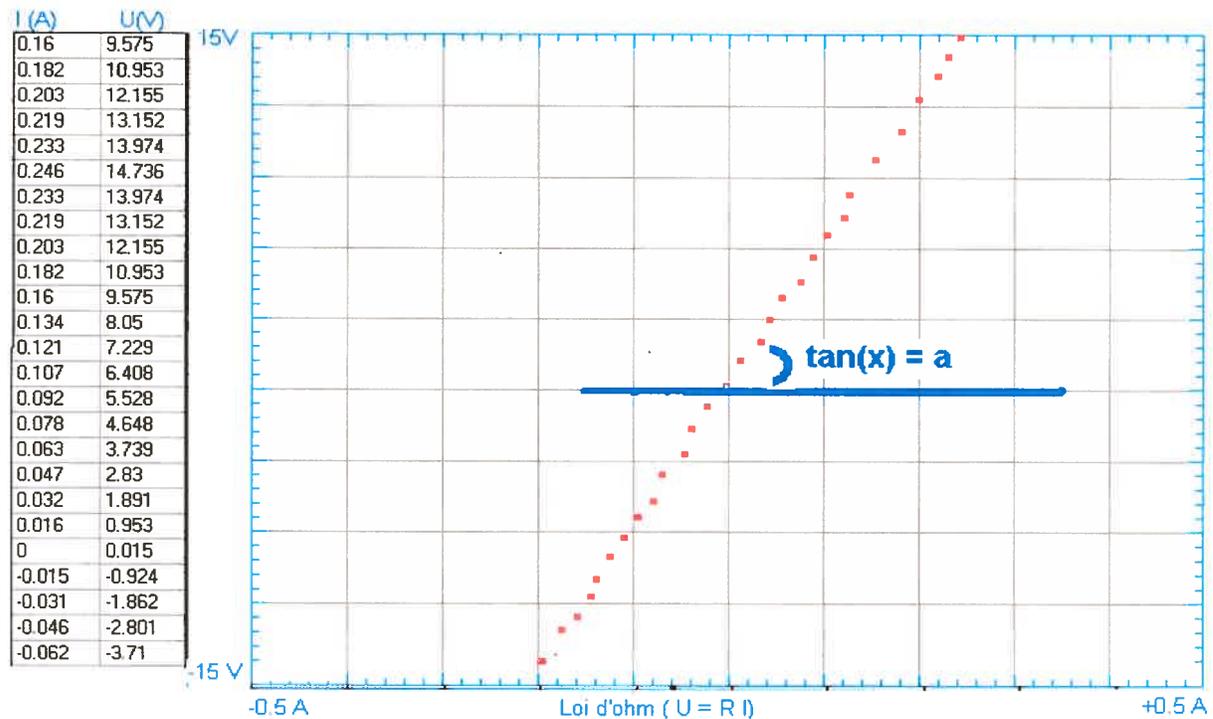


Figure 10: Représentation graphique de la loi d'Ohm

Dans la phase inductive, on élabore un modèle algébrique en trouvant l'équation de la meilleure droite passant par cet ensemble de couples mesures. Jusqu'à cette étape, la mise en correspondance des unités significatives, au sens de Duval, nous permettrait seulement de déduire que le voltage est directement proportionnel au courant, c'est-à-dire que leur rapport est constant. Par contre, dans cet exemple, elle ne nous donne pas accès aux contenus conceptuels de ce rapport, c'est-à-dire à son sens réel. Il faut alors mettre ce rapport en correspondance avec la résistance du circuit électrique du référent empirique. Pour ce faire, on devrait pouvoir prédire la valeur de ce rapport (ou la pente de la droite) comme étant la valeur de la résistance du circuit électrique (telle que donnée par le manufacturier). Or, ce rapport ou pente n'est jamais parfaitement égal à la valeur de la résistance. On devrait pouvoir l'approximer à la résistance en évaluant en même temps son incertitude de mesure. Ainsi, et grâce à cette incertitude de mesure, on pourrait déduire que ce rapport correspond, à une incertitude près, à la valeur de la résistance, malgré que ces deux paramètres ne soient pas exactement égaux numériquement. Enfin, le calcul d'incertitude s'avère très important pour permettre à l'élève d'effectuer et de réussir cette activité d'interprétation déductive ainsi que l'activité déductive de modélisation mathématique.

Dans le paragraphe suivant, nous allons examiner différentes méthodes de calcul d'incertitude. Nous allons ensuite soulever leurs limites et difficultés.

2.5.3.1 Détermination des incertitudes par la méthode des extrêmes dans la phase déductive

La méthode des extrêmes s'appuie sur la notion d'incertitude absolue. Elle consiste à déterminer les incertitudes absolues maximales et minimales d'une quantité A calculée à partir de grandeurs ayant des incertitudes. Pour trouver la quantité A, on doit calculer la moyenne de ces deux incertitudes, ensuite la moitié de leur différence.

$$\bar{A} = (A_{\max} + A_{\min}) / 2 \quad \text{et} \quad \Delta A = (A_{\max} - A_{\min}) / 2 ;$$

$$\text{La quantité A sera : } A = \bar{A} \pm \Delta A$$

Dans le paragraphe suivant, nous allons donner des exemples de méthodes de calcul d'incertitudes extrêmes A_{\max} et A_{\min} tirés du livre de Boisclair et Pagé (2004, p.50-60) intitulé «Guide des sciences expérimentales».

2.5.3.2 Quelques exemples impliquant des opérations et des fonctions très simples

Cas d'une quantité A calculée à partir d'une somme : $A = B + C$;

$$A_{\max} = B_{\max} + C_{\max} ; \quad A_{\min} = B_{\min} + C_{\min}$$

$$\bar{A} = (A_{\max} + A_{\min}) / 2 \quad \text{et} \quad \Delta A = (A_{\max} - A_{\min}) / 2 ;$$

$$\text{La quantité A sera : } \bar{A} = A \pm \Delta A$$

Cas d'une quantité A calculée à partir d'un rapport : $A = B / C$;

$$A_{\max} = B_{\max} / C_{\min} ; \quad A_{\min} = B_{\min} / C_{\max} ;$$

$$\bar{A} = (A_{\max} + A_{\min}) / 2 \quad \text{et} \quad \Delta A = (A_{\max} - A_{\min}) / 2 ;$$

$$\text{La quantité A sera : } \bar{A} = A \pm \Delta A$$

Cas d'une quantité A calculée à partir d'une fonction à une variable :

$$A = \sin \theta \quad \text{avec} \quad \theta = (90 \pm 2)^{\circ} ; \quad \theta_{\max} = 92^{\circ} ; \quad \theta_{\min} = 88^{\circ} ;$$

$$A_{\max} = \sin (90^{\circ}) = 1,000 ;$$

$$A_{\min} = \sin (\theta_{\max}) = \sin (\theta_{\min}) = \sin (92^{\circ}) = \sin (88^{\circ}) = 0.9994 ;$$

$$\Delta A = (A_{\max} - A_{\min}) / 2 = 0.0003 ;$$

$$\bar{A} = (A_{\max} + A_{\min}) / 2 = 0.9997 ;$$

$$A = 0.9997 \pm 0.0003 ;$$

Pour d'autres exemples, on peut voir Laurencelle (1998).

2.5.3.3 Limites et difficultés de la méthode des extrêmes

Même si cette méthode peut théoriquement s'appliquer sur toutes les fonctions, on doit, pour chaque type de fonctions ou de relations algébriques et pour rendre compte de chaque intervalle de mesure considéré (ex : cas de la fonction sinus dans le paragraphe précédent), enseigner des savoirs et savoir-faire mathématiques différents pour calculer les incertitudes extrêmes. Or, là aussi, dans cette phase déductive, ces savoirs et savoir-faire mathématiques ne sont pas de niveau secondaire (dérivée, continuité et sens de variation des fonctions, etc.). Précisons que cette méthode ne nous donne que le milieu des incertitudes des valeurs extrêmes, qui n'est pas forcément très précis. Avec cette méthode, l'obtention de la distribution des incertitudes sur la quantité calculée requiert un calcul fastidieux et qui demande trop de temps pour une activité de laboratoire en sciences expérimentales. Or, en sciences expérimentales, cette distribution devrait permettre à l'élève de mieux prédire le phénomène à l'étude. Ainsi, lors d'un cours de laboratoire, on se trouve obligé pour des raisons pratiques de court-circuiter cette activité de calcul d'incertitude et de priver ainsi l'élève de l'activité cognitive d'interprétation déductive.

2.5.3.4 Détermination des incertitudes par le calcul différentiel dans la phase déductive

En sciences expérimentales, on utilise souvent le calcul différentiel pour évaluer l'incertitude sur une quantité A calculée à partir de mesures expérimentales (\bar{x} , \bar{y} , \bar{z} , ...) ayant respectivement des incertitudes de mesures (Δx , Δy , Δz ,...). D'une façon générale,

$$\text{Si } A = f(x, y, z, \dots) \quad / \quad x = \bar{x} + \Delta x ; y = \bar{y} + \Delta y ; z = \bar{z} + \Delta z ; \text{ etc.}$$

$$\text{Alors: } \bar{A} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) ; \Delta A = |\Phi A / \Phi X| * \Delta x + |\Phi A / \Phi y| * \Delta y + |\Phi A / \Phi z| * \Delta z + \dots$$

$$A = \bar{A} \pm \Delta A.$$

2.5.3.5 Limites et difficultés du calcul différentiel

Pour pouvoir utiliser la méthode de calcul différentiel sur une fonction donnée, il faut que plusieurs conditions soient vérifiées:

- la fonction ne doit pas passer par un extrême dans l'intervalle considéré ;
- elle doit être soit croissante soit décroissante dans cet intervalle;

- pour obtenir une bonne estimation, les incertitudes relatives sur les mesures expérimentales ne doivent pas dépasser 10 à 15% (ceci est valable aussi pour d'autres méthodes).

Ainsi, avec cette méthode, on ne peut pas estimer l'incertitude sur les extremums d'une fonction puisque leurs dérivées sont nulles⁵.

En utilisant le calcul différentiel, l'obtention de la distribution des incertitudes sur la quantité calculée requiert aussi des calculs longs et fastidieux. Il faut noter aussi, comme nous l'avons déjà mentionné pour la méthode des moindres carrés, qu'il est impensable d'introduire cette méthode utilisant le calcul différentiel au secondaire.

⁵ Cas de la fonction sinus du paragraphe 2.5.3.2.

2.5.3.6 Conclusion

Dans cette section, nous avons abordé les activités déductives à partir d'un modèle mathématique des phénomènes physiques et défini l'activité cognitive d'interprétation déductive d'un modèle mathématique. Pour parvenir au stade de l'interprétation, il est nécessaire que l'élève puisse prédire des quantités, des valeurs avec son modèle, en y associant une incertitude de mesure. Cependant, les méthodes de calcul d'incertitudes disponibles actuellement en mathématiques requièrent des savoirs et savoir-faire mathématiques qui ne sont pas de niveau secondaire. On se trouve donc, comme dans l'activité inductive, obligé de court-circuiter aussi cette activité d'interprétation déductive de l'élève. Ainsi, vu les difficultés de ces méthodes, et afin de donner à l'élève l'occasion d'évaluer les incertitudes, nous voulons trouver une idée de solution qui permettrait de prédire et de calculer des quantités issues des fonctions et des relations algébriques en évaluant en même temps les incertitudes ainsi que leurs distributions sur ses quantités calculées.

2.5.4 Conclusion sur les activités cognitives d'interprétation inductive et déductive appliquées en sciences expérimentales

Étant donné que les phases cognitives d'induction et de déduction s'inscrivent dans le cycle itératif de la démarche scientifique, nous considérons que ces deux activités s'effectuent aussi dans un cycle itératif. Ainsi, par interprétation, nous désignons l'ensemble de ces deux activités cognitives d'interprétation.

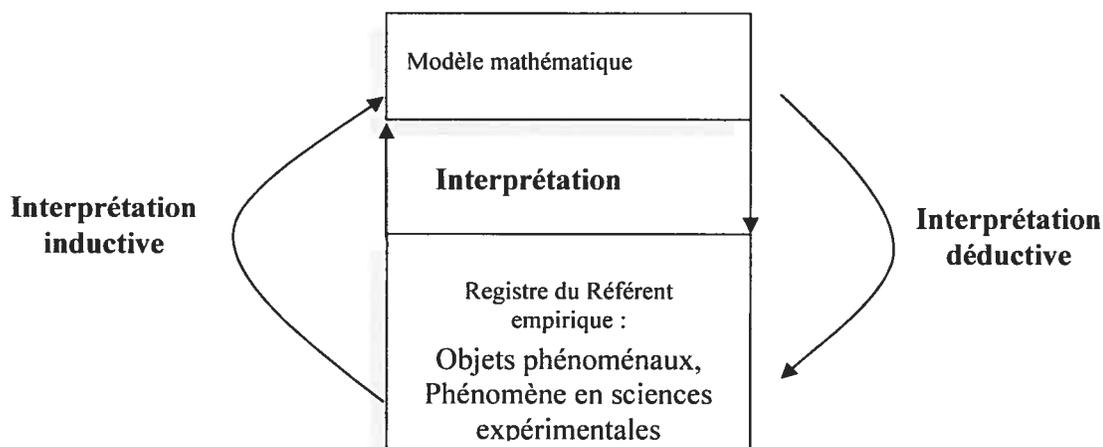


Figure 11: Activités cognitives d'interprétation

Nous postulons que, pour qu'il puisse substituer à un modèle explicatif primitif un modèle calculable et prédictif, l'élève devrait parvenir au stade de l'interprétation. C'est-à-dire qu'il devrait parvenir aux deux stades de l'interprétation inductive et de l'interprétation déductive tel que discuté précédemment. Pour ce faire, l'élève devrait nécessairement avoir à sa portée des outils conceptuels en mathématique lui permettant d'y parvenir. Or, nous avons vu dans les paragraphes précédents que les outils conceptuels connus requièrent des savoirs et savoir-faire mathématiques qui ne sont ni de niveau secondaire ni même de niveau collégial. Nous souhaitons, en nous aidant d'un ordinateur, pouvoir trouver de nouvelles méthodes qui soient à la fois scientifiques et plus simples, c'est-à-dire plus accessibles aux élèves du secondaire et du collège. Nous espérons aussi qu'avec ces nouvelles méthodes, un élève pourra s'engager dans les deux activités d'interprétation mathématique des phénomènes en sciences expérimentales. Nous allons donc, dans le paragraphe suivant, présenter les différents types d'applications pédagogiques assistées par ordinateur et voir comment l'ordinateur pourrait aider l'élève à parvenir le plus possible au stade de l'interprétation sans négliger l'évaluation nécessaire de l'incertitude des mesures expérimentales.

2.6 Applications pédagogiques assistées par ordinateur

Riopel (2005, p.87) résume dans sa thèse quatre catégories d'utilisation de l'ordinateur, qui sont les suivantes :

- 1) **les didacticiels**, qui correspondent généralement à des exercices, à des documents multimédia pouvant contenir des hyperliens et à des présentations sur support informatique destinés à être consultés par l'élève ;
- 2) **les évaluateurs de performance**, qui correspondent à des évaluations de l'élève administrées et compilées localement par un ordinateur ou à distance par le biais d'internet, susceptibles de mettre en évidence certains besoins de l'élève dans le but de le diriger vers les ressources correspondant à ces besoins ;
- 3) **les simulations assistées par ordinateur**, qui utilisent les possibilités de calcul et d'affichage de l'ordinateur pour simuler un phénomène et le représenter à l'écran avec différents niveaux de complexité, d'interactivité et de réalisme ;

- 4) **les expérimentations assistées par ordinateur**, qui interagissent avec une expérimentation réelle par le biais d'une interface munie de capteurs et d'effecteurs et reliée à un ordinateur permettant de contrôler le dispositif expérimental, de recueillir les données, de les représenter et de les analyser à différents niveaux

Étant donné que cette recherche s'intéresse à la modélisation mathématique des phénomènes réels, nous nous intéressons alors aux applications d'Expérimentations Assistées par Ordinateurs (ExAO). Ainsi, nous voulons dans ce paragraphe déterminer comment l'ExAO est susceptible d'aider l'élève à s'engager dans une démarche de modélisation mathématique.

Selon Nonnon et Laurencelle (1984), l'avantage didactique des systèmes d'ExAO consiste à libérer l'élève des contraintes expérimentales, ce qui lui donne, « *accès aux dimensions critiques et créatrices de sa recherche, et à la possibilité de reproduire rapidement son expérience* » (p.35). Nachimas (1989, cité par Larzarowitz et Tamir, 1994, p. 101-102), ajoute à ces arguments une liste de sept avantages principaux de l'ExAO que nous traduisons ainsi dans cette thèse:

- « *Elle permet à l'élève de penser, d'analyser et de synthétiser un phénomène complet, sans le séparer et le subdiviser en plusieurs segments discontinus que l'on synthétise plus tard.*
- *Elle permet à l'élève de voir une représentation graphique d'un phénomène dans un délai très court.*
- *Elle permet à l'élève d'avoir et d'observer facilement plusieurs représentations d'un phénomène, par exemple : la position, la vitesse, l'accélération, »* et nous ajoutons aux exemples de Nachimas les énergies cinétique, potentielle et mécanique d'un mobile en fonction du temps.
- « *Elle permet l'affichage de plusieurs mesures de sonde différentes simultanément plutôt que séquentiellement.*
- *Elle permet à l'élève de consacrer plus de temps pour réfléchir durant l'expérience.*

- Elle permet à l'élève de mettre en œuvre et en évidence certaines de ses conceptions.
- L'utilisation de l'ordinateur est un facteur motivant pour certains élèves. »

Leonard (1990, p.210) reconnaît que l'utilisation de l'ExAO réduit les coûts, augmente l'efficacité de l'enseignement et permet de gagner du temps au laboratoire de sciences. Berger, Lu, Belzer et Voss (1994, p.71) notent que Wise (1988), dans sa recherche menée auprès de 26 étudiants sur l'utilisation de l'ordinateur dans l'enseignement des sciences, a pu constater que les gains et les bénéfices didactiques observés sont statistiquement plus élevés avec l'ExAO qu'avec d'autres types d'applications de l'ordinateur. Ces gains et bénéfices didactiques de l'ExAO sont associés à la représentation graphique en temps réel des phénomènes physiques dont la philosophie sous-jacente est celle de la métaphore de la lunette cognitive (Nonnon, 1986).

La lunette cognitive est une illustration métaphorique qui permet « *de représenter en simultanéité l'action expérimentale réelle et sa représentation graphique* » (Nonnon, 1986, p.38).

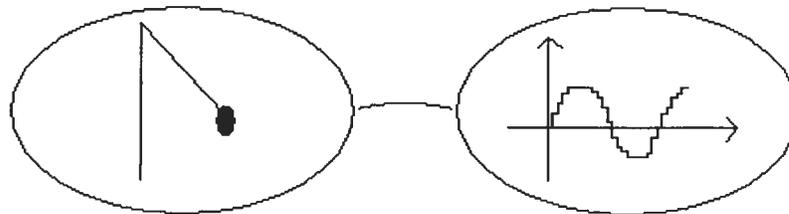


Figure 12: Métaphore de la lunette cognitive de Nonnon (1986).

Selon cet auteur, la lunette cognitive permet à l'élève d'appréhender une représentation graphique abstraite au contact d'un phénomène physique concret. Elle lui permet aussi de mieux comprendre l'utilité de cette représentation. Pour intégrer la métaphore de la lunette cognitive dans le processus de modélisation scientifique, ce chercheur propose un modèle de modélisation illustré dans la figure 13.

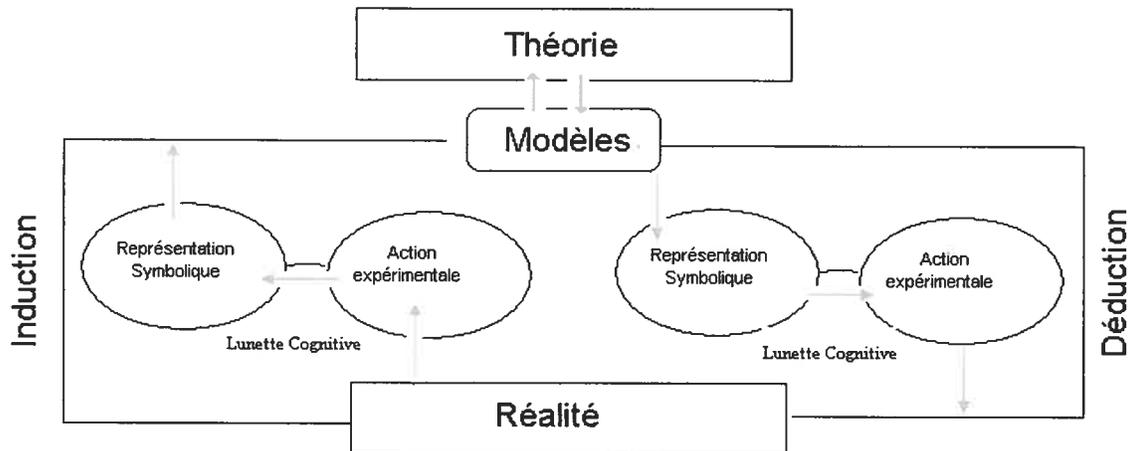


Figure 13: Modélisation et lunette cognitive de Nonnon (1999, p.337)

Dans la phase inductive du modèle ci-dessus, l'élève appréhende et assimile une représentation graphique en agissant directement sur la réalité. Dans la phase déductive du modèle ci-dessus, l'élève, par le biais du graphique, prédit, comprend et anticipe les résultats des ses actions expérimentales sur la réalité. Pour mieux comprendre, donnons l'exemple du train électrique de Nonnon (1986). Dans la phase inductive, l'élève, en jouant avec son train électrique, visualisera les déplacements de son mouvement en même temps que la représentation graphique de la distance parcourue en fonction du temps. En augmentant la vitesse du train, l'élève appréhendera la notion de pente, constatant l'effet de cette augmentation de vitesse sur la courbe. Dans la phase déductive, cette représentation graphique lui permettra de prédire la distance parcourue du train après un certain temps. Aux États-Unis, Brassell (1987, p.385) a mis en évidence que la représentation en temps réel augmente de façon significative la capacité de l'élève à analyser le graphique de la position en fonction du temps. Elle a observé que cette capacité diminue de façon significative lorsqu'un délai de 20 minutes est introduit entre le mouvement et sa représentation graphique. Dans sa thèse à l'université de Montréal, Girouard (1999) a montré que l'apprentissage basé sur le principe de la lunette cognitive permet à l'élève d'utiliser le graphique comme un modèle analogue pour comprendre des phénomènes abstraits en sciences. Par exemple, en électricité, l'élève ne peut agir sur les électrons puisqu'il ne les voit pas (Akpa, 1994). Il ne peut donc visualiser en même temps l'effet de ses actions concrètes sur la représentation graphique correspondante comme dans le cas du train électrique de Nonnon (1986). Par contre, la représentation graphique agit ici comme un analogue pour lui permettre de mieux se rendre compte de l'interaction des variables courant et voltage.

2.6.1 Conclusion

La lunette cognitive de Nonnon (1986) est un outil cognitif qui théoriquement devrait permettre à l'élève de s'adresser simultanément à plusieurs registres sémiotiques et de mettre en correspondance leurs unités signifiantes avec les caractéristiques et les propriétés des objets phénoménaux du référent empirique. En effet, dans le cas de l'exemple de la loi d'Ohm soulevé précédemment, l'élève pourrait être amené aussi à répéter l'expérience à plusieurs reprises en changeant à chaque fois la résistance du circuit électrique. Ainsi, et grâce à la métaphore de la lunette cognitive, les applications ExAO permettront à l'élève de visualiser l'effet de chaque résistance sur la pente de la représentation graphique du voltage en fonction du courant.

En automatisant et en facilitant l'acquisition de données ainsi que leur représentation graphique simultanée, l'ExAO permet à l'élève de consacrer plus de temps aux activités d'interprétation inductive et déductive à condition qu'on lui offre de nouveaux outils mathématiques accessibles au niveau secondaire. De plus, pour un même phénomène, l'élève pourra être amené à valider son modèle mathématique en répétant la même expérience dans des conditions différentes.

Pour faciliter l'activité de modélisation mathématique, nous devons, en profitant des avantages pratiques et didactiques de l'ExAO, concevoir un prototype qui:

- 1) accélère l'acquisition des mesures,
- 2) élabore en temps réel les représentations graphiques,
- 3) permet de traverser les douze étapes de la démarche expérimentale (fig.4),
- 4) facilite les deux activités cognitives d'interprétation inductive et déductive de phénomènes en sciences,
- 5) permet la modélisation algébrique de ces phénomènes,
- 6) permet l'optimisation du modèle algébrique recherché
- 7) permet l'évaluation de l'incertitude de la prédiction à partir de ce modèle.

On peut se poser la question suivante: est-ce que l'élève est capable de parcourir seul et sans aucune aide le cycle itératif de la démarche scientifique afin de construire lui-même des modèles scientifiques, en particulier des modèles mathématiques que l'on situe entre l'expérimentation et l'élaboration de loi mathématique (voir figure 4, étapes 6 et 7)? La

réponse est tout simplement non. Si la réponse était oui, l'élève serait déjà un scientifique et n'aurait aucun besoin d'une formation scolaire. Donc, on peut dire que l'élève a besoin d'une aide pour apprendre à construire des modèles mathématiques. Cette aide ne pourra s'effectuer sans une mise en situation de problèmes choisis par un professeur ciblant un savoir particulier. Donc, le professeur doit choisir une situation de problème qui permet à l'élève de parcourir, le plus possible, le cycle d'interprétation visé et ainsi construire et valider le modèle mathématique correspondant au savoir ciblé par cette situation. Pour ce faire, la situation doit permettre à l'élève de mettre en œuvre et d'exercer ses propres conceptions, c'est-à-dire de formuler une hypothèse, d'expérimenter, de modéliser algébriquement de manière à formuler une loi et de valider celle-ci. Or ces activités de mise en œuvre des conceptions, de formulation, et de validation sont respectivement au cœur des activités des situations d'action, de formulation et de validation de la théorie des situations didactiques de Brousseau (1998). Ainsi, et étant donné que l'on peut concevoir des situations didactiques dont les phases des situations d'action, de formulation et de validation seraient analogues à des situations construites en sciences expérimentales telles que d'écrites dans les étapes de la démarche scientifique de la figure 4, nous pensons alors en faire une lecture en regard de la théorie des situations afin de voir comment cette théorie peut enrichir le sujet de cette recherche.

2.7 Théorie des Situations Didactiques (TSD)

Une situation désigne, selon Chevalier et Briand (1995, p.26), « *l'ensemble des circonstances dans lesquelles se trouve un individu, les relations qui l'unissent à son milieu, et l'ensemble des données qui caractérisent une action ou une évolution* ». On peut ainsi distinguer trois types de situations différentes: non didactique, didactique, et adidactique. Une situation est non didactique lorsqu'elle est organisée sans aucune intention d'enseignement, qu'elle ne vise aucun savoir à enseigner. Une situation est didactique « *lorsqu'un individu (en général le professeur) a l'intention d'enseigner à un autre individu (en général l'élève) un savoir donné* » (Chevalier, Briand, 1995, p.72). Une situation est adidactique lorsque l'élève accepte un problème et s'engage à lui trouver une solution en dehors de toute intervention et indication de l'enseignant. « *L'état a-didactique constitue un état intermédiaire où le maître est présent, mais dans lequel l'élève agit de son propre mouvement* » (Margolinas, 1993, p.229). Ainsi, dans le cadre des activités réalisées en classe avec l'environnement de type ExAO, l'élève devrait principalement vivre des situations didactiques qui favorisent l'activité d'interprétation mathématique des phénomènes en physique.

Brousseau (1998, p.60) propose que, dans la didactique moderne, l'enseignement soit la dévolution à l'élève d'une situation adidactique, et que l'apprentissage soit une adaptation à cette situation. Ainsi, l'enseignant « *doit donc effectuer, non la communication d'une connaissance, mais la dévolution du bon problème. Si cette dévolution s'opère, l'élève entre dans le jeu et, s'il finit par gagner, l'apprentissage s'opère* » (Brousseau 1998, p.61). Notons que la dévolution est « *l'acte par lequel l'enseignant fait accepter à l'élève la responsabilité d'une situation d'apprentissage (adidactique) ou d'un problème et accepte les conséquences de ce transfert* » (Brousseau, 1998, p.303).

La théorie de Brousseau s'articule essentiellement sur l'étude des interactions entre l'élève et un milieu spécifique permettant l'apprentissage d'une connaissance spécifique. On entend par milieu « *tout ce qui agit sur l'élève ou sur quoi l'élève agit* ». Pour Brousseau aussi (1998, page 93) « *le milieu est le système antagoniste du système enseigné* ». Fregona (1995, p.45) insiste sur le qualificatif antagoniste: « *Pour agir, pour apprendre, l'élève doit trouver insuffisants ses moyens de contrôle, donc le sous-système avec lequel il négocie ne doit pas pour lui être un allié mais un concurrent.* ».

Selon cette théorie, l'élève apprend et s'adapte à un milieu adidactique en se battant contre ses propres connaissances (ce que nous avons déjà désigné par conceptions) et ce milieu antagoniste dans lequel il se trouve pour construire lui-même le savoir visé par la situation et pour donner lui-même un sens à ce savoir (et non pas par le professeur). Ici, le milieu sera constitué de l'environnement prototype d'ExAO, de l'expérience elle-même, de l'élève et du professeur.

Dans sa théorie des situations didactiques, Brousseau (1998) décrit quatre situations:

- l'action : « où le problème appelle une action, une production de l'élève fondées sur un modèle implicite » (Johsua et Dupin, 1999, p.263). La dialectique de l'action constitue le processus par lequel l'élève va développer des stratégies de résolution de problème, mettre en œuvre son modèle implicite, s'approprier des savoirs et savoir-faire. Ici, les six premières étapes de la démarche expérimentale seraient grosso modo analogues à la situation de l'action. Dans ces étapes, l'élève est amené à s'approprier notre environnement, c'est-à-dire savoir expérimenter pour obtenir des mesures, choisir des variables et les représenter sous forme de graphique ou dans un tableur.
- la formulation : « qui permette la mise en œuvre de modèles explicites, de langages, et où le savoir a une fonction de justification des actions et de contrôle » (Johsua et Dupin, 1999, p.263). Dans cette phase, la dialectique de la formulation consiste à aider l'élève à développer au fur et à mesure un langage scientifique qui sera jugé par autrui sur les conditions d'intelligibilité qualitative (répertoire et syntaxes) et quantitative (débit, bruit, ambiguïté, redondance). Ici, les 6ième et 7ième étapes de la phase inductive ainsi que toutes les étapes de la phase déductive de la démarche scientifique de Nonnon (1986) (voir fig.4) seraient grosso modo analogues à la situation de formulation. Dans ces étapes, l'élève est amené à communiquer avec un langage scientifique le résultat de la modélisation mathématique d'un phénomène physique en tenant compte des incertitudes de mesures sur les données expérimentales.
- la validation: « où sont mis en œuvre des mécanismes de preuve, et où le savoir a pour fonction d'établir ces preuves, de les contester ou de les rejeter. »(Johsua et Dupin, 1999, p.263). Les étapes de la phase déductive de la démarche scientifique de

Nonnon (1986) (voir fig.4) seraient grosso modo analogues aussi à la situation de validation. Dans ces étapes, l'élève est amené, en reproduisant un phénomène, à valider son interprétation mathématique dans la même situation ou dans une situation différente. Cette activité de validation intègre des activités de prédiction puisque à partir du modèle mathématique on pourra prédire :

- des quantités et des variables calculées à partir des mesures expérimentales en y associant une marge d'incertitude de mesure.
 - des phénomènes qui n'ont pas encore été expérimentés ainsi que leur modèle mathématique.
- l'institutionnalisation : «*où le savoir a une fonction de référence culturelle* » (Johsua et Dupin, 1999). Ici, le professeur lors de la discussion post-laboratoire pourra amener l'élève à comparer son modèle aux modèles théoriques utilisés régulièrement en sciences expérimentales.

Nous avons parlé ici de situation adidactique puisque les élèves évolueront seuls en situation de laboratoire, c'est-à-dire dans une situation où ils sont quasi-isolés du maître. Ainsi, le rôle du maître ne sera pas pris en compte parce que nous avons choisi d'insérer la mise à l'essai empirique dans la séquence d'un laboratoire déjà existant. C'est pour cette raison, nous limiterons les résultats de cette recherche sur l'utilisation de la méthode RGS à la seule performance des étudiants. Nous vérifierons alors comment ceux-ci se sont approprié la méthode pour analyser leurs données expérimentales. Nous nous servirons alors de leur production, de leur commentaire ainsi que des commentaires de leurs enseignants pour analyser et interpréter les résultats de la mise à l'essai empirique de la méthode RGS. Nous pensons, qu'une recherche subséquente plus contrôlé devrait prendre en compte le rôle de l'enseignant comme acteur de cette relation didactique.

Dans ce chapitre, nous avons exploré différents considérations théoriques susceptibles de nous aider à développer à justifier notre idée de recherche qui consiste, rappelons-le, à concevoir un outil informatisé qui faciliterait la modélisation algébrique de phénomène physique. Le lecteur ici ne doit pas s'attendre à une validation exhaustive de toutes ses considérations théoriques. Cette validation devrait faire l'objet de recherches subséquentes. Nous allons nous limiter cette recherche de développement au défi de

concevoir techniquement et didactiquement une nouvelle méthode de modélisation algébrique qui devrait être accessible à nos élèves et étudiants. Nous allons maintenant expliciter la méthodologie de cette recherche de développement technologique en éducation.

Chaptire 3: Méthodologie

Dans le but de préciser la méthodologie de cette recherche, nous avons choisi le type de recherche qui nous permettra de concevoir, développer et valider, au plan didactique, un environnement adidactique assisté par ordinateur. C'est ce type de recherche de développement que nous allons maintenant détailler en incluant toutes les étapes nécessaires au développement de cet environnement.

3.1 Recherche de développement technologique en éducation

Dans le cadre de cette recherche, nous utiliserons le modèle de recherche de développement technologique de Nonnon (1993) qui vise le développement et la conception d'un environnement d'apprentissage. L'élaboration et l'évaluation de cet environnement sont appuyées par des considérations théoriques qui à la fois le justifient et sont génératrices d'hypothèses pour la recherche en didactique. Le modèle de Nonnon (1993, p.150) se distingue par les deux points de départ de ce modèle. Sur ce sujet, cet auteur notait :

« Une recherche-développement en éducation pourrait par exemple s'amorcer sur une simple idée, ou sur un problème à résoudre, et elle se garderait alors libre de toutes considérations théoriques à l'étape de la conception, tout comme en recherche industrielle. »

Selon cet auteur, ce type de recherche ne serait pas acceptable dans le cadre d'une recherche doctorale en éducation; elle devra être appuyée sur des travaux théoriques existants en sciences de l'éducation. Par contre, ces travaux et conceptions recensés ne doivent pas freiner la créativité du chercheur. Ainsi, il notait :

« Il faut imaginer des modèles de recherche-développement qui empruntent à l'approche expérimentale les fondements théoriques et les modalités de contrôle applicables à son objet, sans s'asservir pour autant au modèle expérimental et risquer ainsi de perdre la créativité et l'innovation qui lui sont propres. Il faut envisager ces modèles dans une perspective plus globale, plus systémique.

[...] Le modèle de recherche-développement que nous proposons doit permettre au chercheur de procéder du général au spécifique, de privilégier, d'intuitionner l'aspect fonctionnel du système en incluant

son insertion dans une situation active d'apprentissage. » Nonnon (1993, p.150)

Nous allons par la suite décrire les différentes étapes du modèle de recherche de développement technologique de Nonnon (1993, p.151).

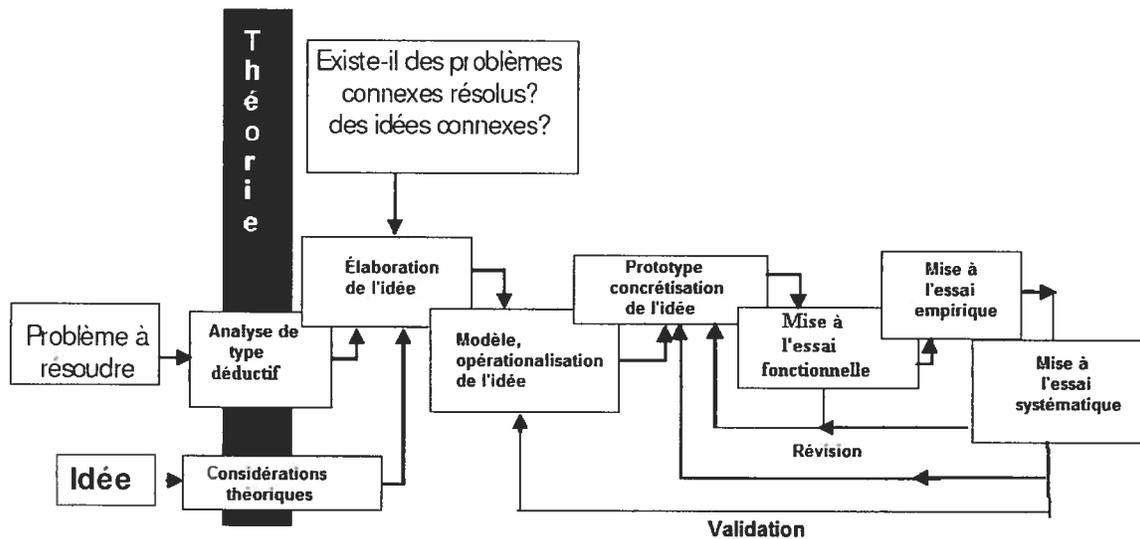


Figure 14: Méthodologie de Recherche et de Développement en éducation

Soulignons une nuance concernant le point de départ de cette recherche de développement. Selon Nonnon, s'il part d'un problème à résoudre identifié à partir des résultats d'une recherche expérimentale ou appliquée, dans ce cas le chercheur doit procéder à une analyse de type déductif du problème afin d'élaborer son idée. Par contre, si son point de départ est une idée qu'il lui semble intéressant d'explorer, dans ce cas il doit confronter cette idée aux théories existantes à travers des considérations théoriques afin de l'appuyer, l'améliorer ou la rejeter. Notons toutefois la nuance suivante: dans le modèle de recherche de développement technologique de Nonnon(1993), la justification théorique vient après l'idée de développement alors que dans une recherche expérimentale, la recension des écrits procède la question et l'hypothèse de recherche.

Ce modèle prévoit ensuite les étapes suivantes: l'élaboration de l'idée, la conception d'un modèle d'action pour préciser et opérationnaliser l'idée, la conception et le développement d'un prototype, la mise à l'essai fonctionnelle, la mise à l'essai empirique et la mise à l'essai systématique. Notons que le but principal de la mise à l'essai fonctionnelle et de la mise à l'essai empirique est l'amélioration du prototype et du modèle d'action tandis que le but

principal de la mise à l'essai systématique est sa validation. Pour préciser le point le plus important du modèle de recherche, Nonnon notait :

« La démarche la plus importante de ce type de recherche est la conception et la construction du système technologique lui-même. Elle se reflétera par la description de cette démarche de conception, explicitant les caractéristiques et les fonctionnalités du modèle d'action en parallèle avec celles du prototype. » Nonnon (1993, p.153)

Étant donné que ce modèle reconnu nous permettra de valider le résultat de la production finale (développement d'un environnement d'apprentissage assisté par ordinateur) par les mises à l'essai fonctionnelle, empirique et systématique, nous l'adopterons pour cette recherche. Notons que ce modèle a été adopté, avec un grand succès, par plusieurs chercheurs en didactique. Parmi ces chercheurs, trois doctorant ont obtenu des prix d'excellence (voir Crevier, 1996 ; Cervera, 1998 et Riopel 2005). Avant de terminer, nous allons situer la mise à l'essai fonctionnelle, empirique et systématique par rapport à l'environnement de recherche.

3.1.1 Mise à l'essai fonctionnelle

Traditionnellement, selon Nonnon (1986), le but principal de la mise à l'essai fonctionnelle est de tester la fonctionnalité du prototype, c'est-à-dire l'environnement d'apprentissage développé, et de vérifier l'adéquation formelle entre le modèle d'action et ce dernier. Ici, elle doit nous permettre de mettre en évidence les modifications nécessaires pour établir cette adéquation.

Dans le cadre de cette recherche, la fonctionnalité du prototype sera testée par sept experts en expérimentation assistée par ordinateur. Il s'agira de deux professeurs universitaires en didactique des sciences, d'une experte en technologie éducationnelle, d'un ingénieur en informatique, de deux professeurs de collèges en sciences physiques, d'un enseignant au secondaire et d'un expert reconnu dans le domaine de la mesure de l'incertitude. Le protocole qui sera fourni à ces experts se trouve en annexe 1.

Les analyses et commentaires de ces experts nous permettront de raffiner progressivement le prototype puisqu'après chaque expertise nous corrigerons celui-ci. De cette manière, l'expert suivant ne reproduise pas le même rapport que le précédent. Cette façon de procéder devrait rendre le prototype de plus en plus performant.

Cependant, dans cette recherche, nous ajouterons une étape de validation de contenu. Cette validation consistera à étudier différents phénomènes physiques afin de générer des données qui correspondent aux différents modèles algébriques de relation suivants: polynomial, sinusoidal, exponentiel, etc. Nous allons ensuite modéliser algébriquement ces données avec le prototype et avec des logiciels connus comme Excel et Régressi de manière à comparer les résultats obtenus vis-à-vis de ces deux références crédibles, reconnues et largement utilisées par la communauté scientifique.

3.1.2 Mise à l'essai empirique

Selon Nonnon (1993, p.152), « *la mise à l'essai empirique s'apparente à la recherche-action; le chercheur n'impose pas d'emblée les objectifs ni les variables à considérer, les données réelles et leur modélisation devant apparaître au fur et à mesure de la mise à l'essai* ».

Cette phase est incontournable pour la recherche de développement en éducation. Elle vient après la création du prototype et la mise à l'essai fonctionnelle. Selon Nonnon (1993, p.152), « *il s'agit ici de provoquer des interactions entre l'élève et le professeur-chercheur, de manière à induire des activités structurantes.* »

Cette provocation est engendrée, dans l'environnement d'ExAO, d'une part, par l'interaction entre l'environnement d'apprentissage et l'élève, et d'autre part, par une dialectique entre l'élève et le professeur-chercheur. Cette dialectique doit permettre à l'élève d'expliquer le phénomène expérimenté en « *anticipant ce qui va se passer, le vérifier ensuite, et comparer son anticipation à la vérification subséquente.* » (Nonnon, 1993, p.152). Elle doit de plus nous permettre « *d'évaluer, chez les professeurs, les attitudes et les suggestions utiles à guider l'élève dans sa démarche.* » (Nonnon, 1993, p.152).

Dans cette phase, nous allons donc pour chaque groupe de sujets, pour chaque niveau académique des élèves et étudiants et avec chaque enseignant, concevoir des situations d'apprentissage spécifiques non seulement en fonction du niveau mais aussi en fonction du contenu spécifique déterminé ou souhaité par l'enseignant. Notons ici que cette façon de faire, bien que très exigeante, respecte le cheminement des élèves puisqu'on les évalue sur le contenu présentement à l'étude.

Dans cette expérience, le groupe cible est constitué de 12 groupes de deux étudiants du collège Marie de France à Montréal. Ces étudiants dans leur programme devraient être

parvenus à l'étude de la charge et de la décharge d'un condensateur. Ils en auront alors maîtrisé le contenu théorique en physique. La mise à l'essai empirique consistera alors à concevoir avec le professeur un protocole de laboratoire sur la charge d'un condensateur en incluant la modélisation algébrique de ce phénomène avec cet environnement d'apprentissage. C'est avec ce protocole que nous expérimenterons avec ces étudiants (voir annexe 1).

Les données seront recueillies par différents moyens qui sont les suivants:

- a) le fichier de sauvegarde d'extension .xao, qui contiendra les données brutes de l'expérience (voir annexe 6) ainsi que la production finale de la modélisation algébrique effectuée par ces étudiants(es) (voir annexe 6).

À partir de la production finale on pourra vérifier:

- le choix de la courbe,
- l'utilisation du graphique, de la fenêtre des écarts, et de la fenêtre de la distribution des incertitudes relatives.
- l'équation algébrique, résultat final de la modélisation.

À partir des données brutes, l'expérimentateur reproduira la modélisation complète afin de la comparer avec les résultats des étudiants.

- b) des commentaires écrits, adressés aux étudiants, à partir des deux questions qui sont les suivantes et qui portent sur:
- la compréhension et le degré de difficulté de la modélisation algébrique en utilisant le logiciel MicrolabExAO
 - la comparaison de cette méthode avec le tableur grapheur normalement utilisé dans leur cours (Excel ou Régressi).

- c) un questionnaire a été préparé pour les deux professeurs du collège afin de bien évaluer l'utilisation de ce didacticiel avec leurs élèves (voir annexe 2).

Cette évaluation, effectuée groupe par groupe, nous permettra d'identifier les difficultés d'utilisation, d'appropriation de l'environnement par les élèves. L'élève devra aussi faire une hypothèse et réaliser un schème de contrôle des variables, en planifiant et en construisant une véritable expérience. A la suite de cette étape préalable, nous évaluerons plus spécifiquement comment l'élève procédera pour interpréter les résultats graphiques et modéliser ceux-ci par une équation algébrique.

Le résultat complet de cette démarche sera mémorisé dans un fichier de manière à faire ressortir les difficultés rencontrées par les élèves pour modéliser leur expérience.

La collecte des informations sur l'interaction de l'élève avec l'environnement nous donnera des informations sur la qualité du processus, informations qui nous serviront principalement à améliorer le modèle d'action et le prototype de façon à minimiser les interventions du professeur et permettre à l'élève de développer de façon autonome ses savoirs et savoir-faire dans l'élaboration d'un modèle algébrique.

3.1.3 Mise à l'essai systématique

Selon Nonnon (1993, p.152), « *la mise à l'essai systématique est requise si l'on envisage la production à grande échelle ou l'implantation du produit développé dans le milieu économique (ou éducationnel): cette étape s'apparente cette fois à la recherche évaluative, voire à la recherche expérimentale, et elle peut donner lieu à l'invalidation du modèle lui-même* ». Notons que pour des raisons de temps, cette étape ne sera pas retenue ici car elle impliquerait l'élaboration d'une seconde recherche.

Nous allons maintenant définir notre modèle d'action en incluant les actions possibles des étudiants dans cet environnement de mathématique et de science avant de le construire.

Chaptire 4: Modèle d'action et prototype

Dans ce chapitre, nous allons décrire l'environnement d'apprentissage d'ExAO en nous limitant à une activité d'interprétation inductive. Nous nous attarderons plus particulièrement sur l'équilibre entre la capacité des élèves à l'utiliser pour entreprendre une activité d'interprétation mathématique des phénomènes physiques qui, rappelons-le, inclurait une optimisation du modèle et une évaluation de l'incertitude de mesures. Notons que, selon la méthodologie de recherche et de développement de Nonnon (1993), le modèle d'action présenté dans ce chapitre n'est pas définitif puisqu'il pourrait être modifié lors de la conception du prototype, de chaque mise à l'essai (fonctionnelle ou empirique) afin de l'améliorer. Dans les prochains paragraphes, nous allons décrire les actions possibles d'un élève dans cet environnement d'ExAO permettant à celui-ci d'effectuer l'activité cognitive d'interprétation inductive de phénomènes physiques. Mais avant, nous allons présenter les fondements théoriques et pratiques de l'idée de cette recherche en décrivant les idées et concepts qui ont conduit à son élaboration.

4.1 Fondements théoriques de l'idée de cette recherche

L'idée de base est de fournir à l'étudiant un outil mathématique à forte composante visuelle, avec lequel il pourra:

- construire et optimiser un modèle algébrique correspondant à un ensemble de points expérimentaux sur graphique;
- déterminer l'incertitude sur son modèle.

4.1.1 Construire et optimiser un modèle algébrique correspondant à un ensemble de points expérimentaux

Avant de décrire cet outil mathématique, nous allons le justifier théoriquement en prenant un cas particulier, celui de la modélisation d'une fonction polynomiale du second degré.

Soit l'ensemble de n points expérimentaux de coordonnées (x_i, y_i) correspondant au phénomène physique de la chute libre d'un corps:

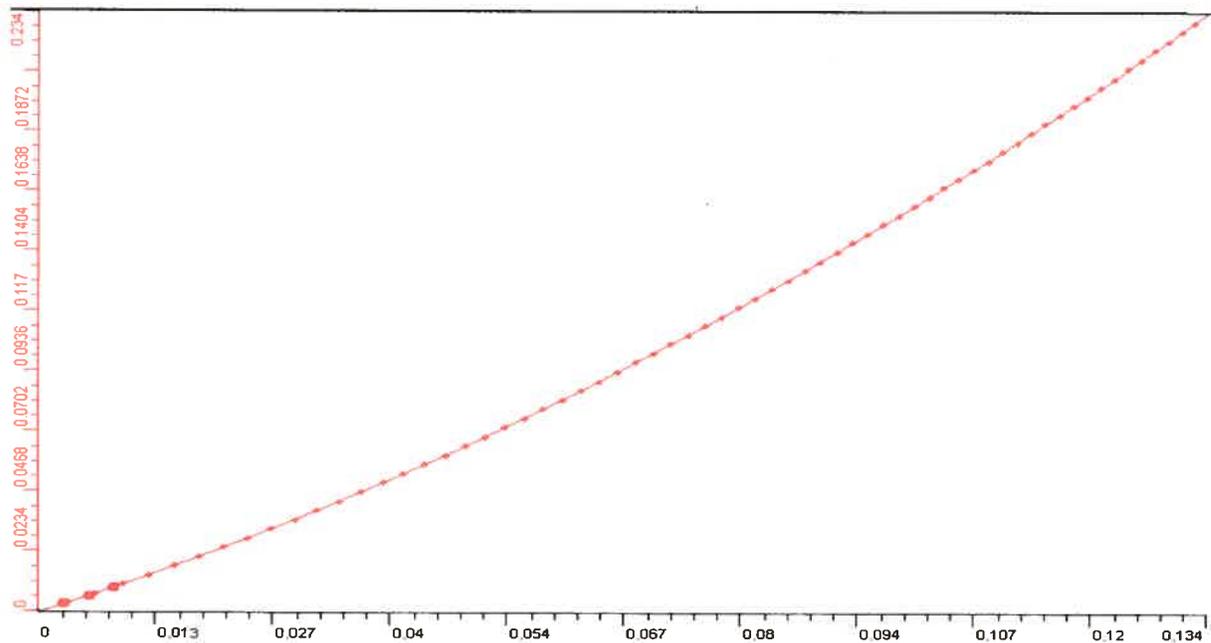


Figure 15: Représentation graphique des données expérimentales de la Chute libre

Notons aussi:

- $f(x) = a x^2 + b x + c$, l'équation théorique de la fonction de la meilleure parabole qui passe par cet ensemble de points expérimentaux.
- $f'(x) = a' x^2 + b' x + c'$ l'équation de la fonction parabolique à ajuster et à optimiser graphiquement et progressivement sur les données expérimentales pour se rapprocher des coefficients de $f(x)$.
- $E(x) = f(x) - f'(x) = (a - a') x^2 + (b - b') x + c - c'$, la fonction des écarts entre $f(x)$ et $f'(x)$.

À partir de la fonction des écarts, on peut constater que lorsque a' tend vers a , le coefficient $(a - a')$ tendra vers zéro et l'équation $E(x)$ se réduira à une équation linéaire du premier degré : $E(x) = f(x) - f'(x) \approx (b - b') x + c - c'$. De la même manière, lorsque b' tendra vers b , le coefficient $(b - b')$ tendra vers zéro; l'équation $E(x)$ se réduira à une constante : $E(x) = c - c'$ et la translation horizontale sera donc éliminée. Enfin, lorsque c' tendra vers c , la fonction des écarts $E(x)$ tendra vers zéro et la translation verticale sera éliminée. Ainsi, c'est par ce processus itératif que nous allons progressivement réduire les écarts de la courbe théorique aux points expérimentaux et estimer les coefficients a , b et c de la fonction $f(x)$, en agissant respectivement sur les paramètres a' , b' et c' de la fonction $f'(x)$.

4.1.2 Déterminer visuellement l'incertitude sur son modèle

Pour optimiser la fonction symbolique et pour déterminer visuellement l'incertitude sur la prédiction à partir du modèle algébrique recherché, nous allons distribuer les écarts dans un histogramme à bandes en les groupant en classes. Ensuite, en ajustant l'intervalle de classes, nous voulons trouver l'intervalle le plus petit qui nous amène à répartir l'ensemble des écarts comme une distribution centrée le plus possible à zéro. Ensuite, en agissant sur les paramètres de la fonction symbolique, nous essaierons de la rendre la plus «normale» ou symétrique possible. C'est-à-dire que ces ajustements successifs devraient nous amener à obtenir visuellement une distribution telle que, autour de la valeur zéro, 68 % des écarts s'inscrivent dans une zone large de deux intervalles (un à droite et l'autre à gauche de zéro), 95% des écarts dans quatre intervalles, et 100 % des écarts dans six intervalles. C'est par ces actions effectuées de manière itérative que nous allons progressivement optimiser la fonction symbolique. Notons que, le cas échéant, l'intervalle de classe ainsi trouvé sera une estimation valable de l'erreur-type, soit l'incertitude sur la valeur prédictive de la fonction symbolique que l'on vient de déterminer.

En justification de cette démarche, notons que l'obtention d'une distribution normale des écarts par ce procédé itératif et visuel garantit l'optimisation de la solution du modèle mathématique qui correspond à la solution des moindres carrés de Gauss-Legendre. De plus, nous obtenons ici directement une évaluation de la valeur de l'erreur-type.

4.2 Actions possibles dans l'environnement d'apprentissage d'ExAO

Les bénéfices didactiques de cette recherche seront donc tributaires des capacités technologiques de cet environnement qui devra permettre à des élèves du secondaire et du collégial de s'engager dans un processus complexe d'interprétation mathématique des phénomènes physiques. Cet environnement devra alors leur fournir de manière implicite et explicite une base visuelle et graphique suffisante pour faciliter l'activité de substitution d'un modèle phénoménologique ou empirique, c'est-à-dire un modèle initialement limité à une explication qualitative, par un autre modèle mathématique, quantitatif, calculable et prédictif des phénomènes physiques.

Pour ce faire, nous allons construire un environnement d'ExAO qui devra permettre:

- 1) une acquisition de données réelles (interface, capteurs, logiciel);
- 2) de présenter ces données empiriques sous forme graphique en temps réel;
- 3) de modéliser algébriquement en ajustant une équation $y = f(x)$ sur le tracé des données empiriques (outil graphique convivial permettant de construire une représentation graphique d'un objet);
- 4) de réduire les écarts entre les données mesurées et la fonction symbolique en ajustant chaque paramètre;
- 5) d'optimiser la fonction symbolique et évaluer l'incertitude sur la valeur prédictive de cette fonction.

Nous préparerons ainsi des activités d'apprentissage sur des phénomènes impliquant des relations entre deux variables (indépendante et dépendante) de manière à pouvoir effectuer une activité de modélisation algébrique d'un phénomène en sciences expérimentales, en particulier en physique. Ainsi, l'environnement logiciel de modélisation algébrique reposera essentiellement sur l'utilisation de trois fenêtres :

- a) le grapheur,
- b) la visualisation des écarts,
- c) l'histogramme des écarts.

4.2.1 Actions possibles dans l'environnement d'apprentissage d'ExAO pour l'activité d'interprétation inductive

Nous allons décrire toutes les actions disponibles dans cet environnement susceptibles d'aider l'élève à parvenir aux stades de l'interprétation inductive.

a) **Ajuster** : la fenêtre graphique consiste à aider l'élève à représenter graphiquement l'interaction des variables d'un phénomène physique à l'étude. Dans cette fenêtre, l'élève devrait être capable de superposer visuellement un modèle fonctionnel symbolique sur les données empiriques, remplaçant ainsi le modèle empirique constitué des points associés aux données empiriques par un autre modèle mathématique sous forme d'une relation algébrique (figure 16).

b) **Réduire** : la fenêtre des écarts nous permet de réduire ces écarts, c'est-à-dire de mieux ajuster la fonction symbolique sur les données empiriques en minimisant ces écarts (figure 16).

c) **Optimiser** : la fenêtre de distribution des écarts nous permet d'optimiser ces deux ajustements en tenant compte de leur distribution statistique (figure 16) ce qui nous permet, au contraire des fenêtres précédentes, de prendre en compte l'occurrence des points expérimentaux pour réduire encore ou optimiser le modèle mathématique.

4.3 Prototype

Rappelons que cette recherche veut principalement permettre à des étudiants de réaliser et comprendre le processus de modélisation mathématique des phénomènes physiques. C'est-à-dire ajuster un modèle algébrique graphiquement sur un ensemble de points formé par des données expérimentales. De plus, comme dans la méthode de Gauss-Legendre utilisée dans la plupart des logiciels scientifiques, nous voulons leur permettre de réduire et d'optimiser les écarts, mais d'une manière plus pédagogique, en utilisant les ressources visuelles et graphiques de l'ordinateur. Cette méthode que nous avons nommée Régression Graphico-Statistique (RGS) complétera les travaux et les recherches en ExAO effectués au Laboratoire de Robotique Pédagogique de l'Université de Montréal, en particulier les travaux de Fournier (2003) et de Riopel (2005). Ainsi, le prototype comprend d'abord tous les éléments du logiciel ACQ (ACQuisition) développé au laboratoire de robotique pédagogique à savoir une

fenêtre d'initialisation , un mode «vu-mètre » dans lequel nous pouvons voir les données de chaque variable sous forme numérique, un mode oscilloscope et un tableur. Afin de pouvoir implanter notre idée de solution qui a été détaillée dans le chapitre problématique, nous étions obligé d'ajouter au mode oscilloscope du logiciel ACQ un module de Régression Graphico-Statistique (RGS) pour la modélisation algébrique des données expérimentales. Dans ce chapitre, et pour ne pas répéter la description de Fournier (2003, p.144, p.145 et p.146, et 148) des fenêtres du logiciel ACQ, nous allons nous limiter seulement à la description du module RGS qui est développé et conçu par l'auteur de cette recherche.

4.3.1 Régression Graphico-Statistique (RGS)

Le module de Régression Graphico- Statistique comporte essentiellement trois fenêtres (Voir figure 16):

- la fenêtre graphique;
- la fenêtre des écarts;
- la fenêtre du diagramme à bandes.

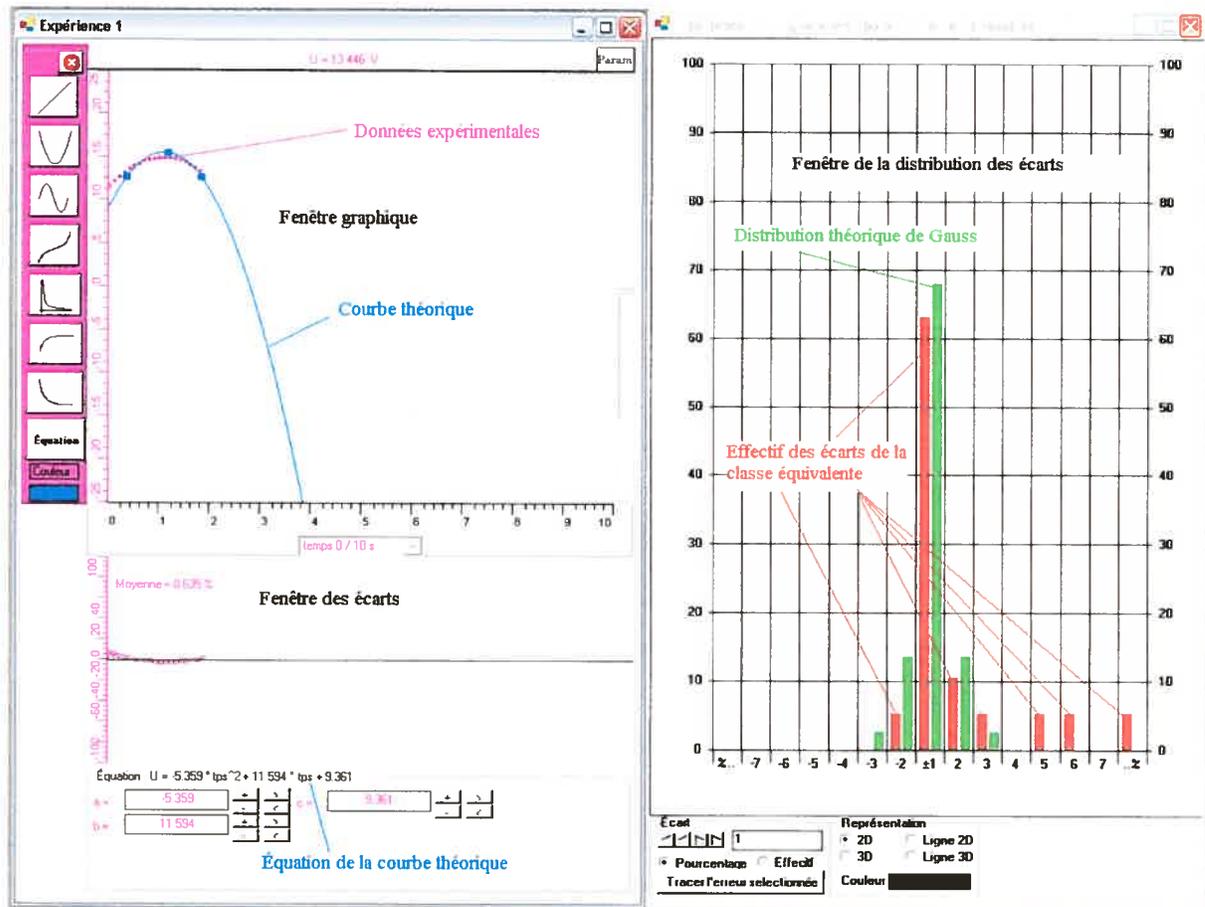


Figure 16 Les fenêtres du module RGS

4.3.2 Fenêtre Graphique

Dans la fenêtre graphique, l'élève aura initialement:

- paramétré l'expérience, c'est-à-dire, choisi les variables physiques, le nombre des données expérimentales et la fréquence d'échantillonnage;
- visualisé sous forme graphique l'interaction entre les différentes variables;
- visualisé sous forme d'un tableau les données expérimentales.

Afin de choisir le type d'équation avec lequel l'élève modélise algébriquement cette interaction de variables, nous avons créé une barre d'outils dans laquelle on retrouve des fonctions prédéfinies telles que: les fonctions linéaires du premier degré, du second degré, du troisième degré, les fonctions rationnelles, sinusoïdales et exponentielles. Nous lui avons aussi donné la possibilité de définir n'importe quelle fonction algébrique en cliquant sur le bouton équation (Voir Figure 17).

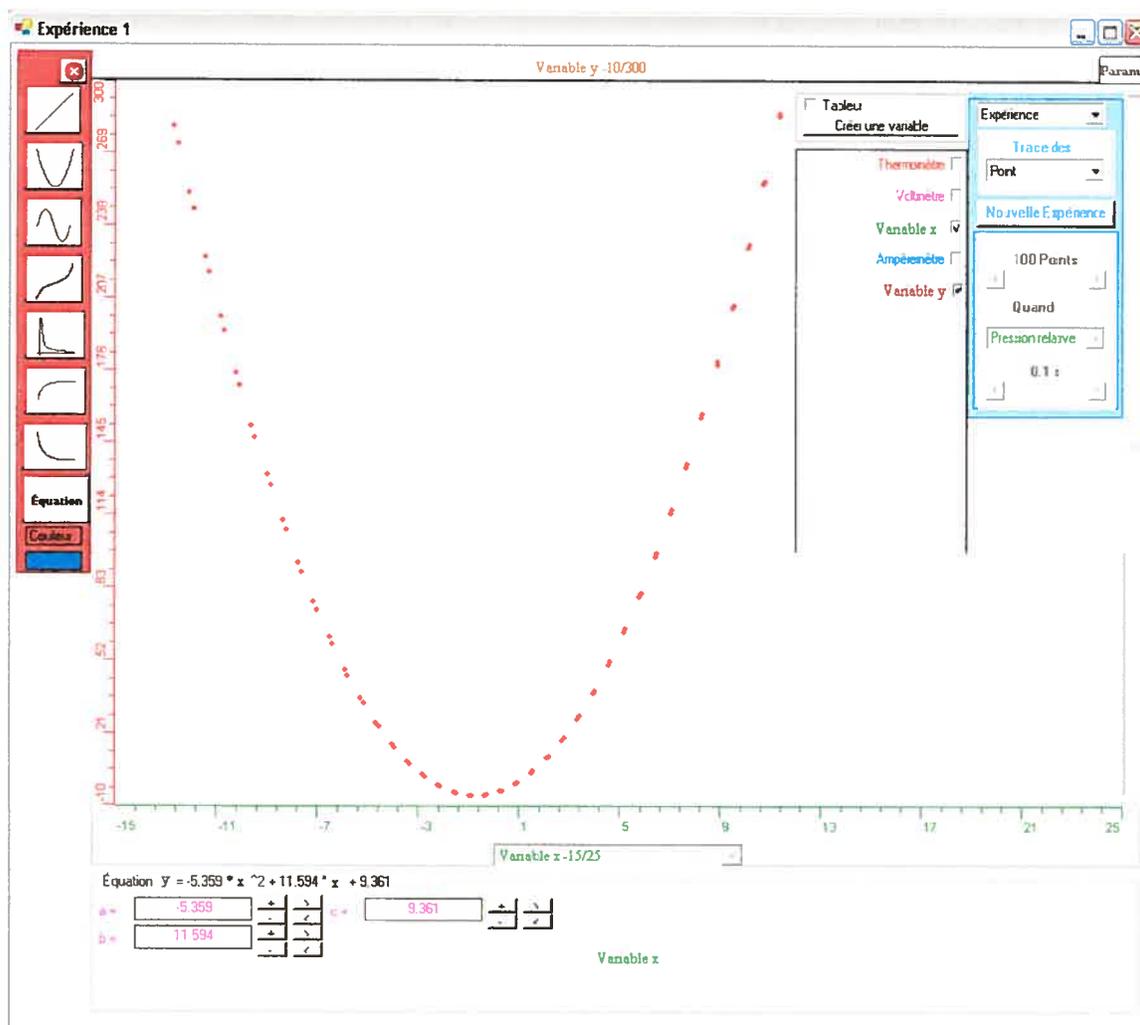


Figure 17: fenêtre graphique

4.3.3 Fenêtre des écarts

La fenêtre des écarts consistera à visualiser les écarts entre la courbe théorique et les données expérimentales afin de les réduire et les minimiser le plus possible en appliquant la méthode itérative abordée dans le chapitre modèle d'action, dans le paragraphe 4.1.1. Notons que les écarts seront calculés en pourcentage de l'échelle de mesure de la variable à l'étude. Les points expérimentaux qui se trouvent en dessous de la courbe théorique auront un écart négatif tandis que ceux qui se trouvent en dessus de la courbe théorique auront un écart positif. L'échelle par défaut de la fenêtre des écarts est de -100% à 100% . Pour mieux visualiser les écarts, nous allons donner la possibilité de les dilater, c'est-à-dire de réduire l'échelle des écarts (Voir figure 16).

4.4 Fenêtre d'histogramme

Pour des raisons de commodité, nous avons centré la distribution des écarts à zéro. Attendu qu'en général les incertitudes de mesures en sciences expérimentales se situent en de ça de 10% de leur valeur, nous avons limité initialement l'échelle des intervalles de classe à 14 % de l'échelle totale avec des intervalles de classe fixés à 1 %. Puisque que la distribution est centrée à zéro, les valeurs des intervalles de classes négatives correspondront, en valeur absolue, aux écarts des points expérimentaux situés en dessous de la courbe. De même, les valeurs des intervalles de classes positives correspondront aux écarts des points situés en dessus de la courbe. Afin de conserver les écarts de toutes les données expérimentales, tous les écarts qui sont inférieurs à -7 % se rempliront dans la classe à gauche «% <». De même, tous les écarts supérieurs à 7% se rempliront dans la classe à droite « % > ». Toutefois, ces paramètres seront tous changés de manière dynamique lorsque l'étudiant changera la valeur de l'intervalle. La fréquence des écarts est aussi par défaut en pourcentage du nombre de points expérimentaux. Nous avons aussi affiché cinq colonnes vertes représentant la distribution théorique de Gauss. La colonne centrale indique le 68% des effectifs, deux colonnes symétriques qui indiquent le 13.5% et le -13.5 % des effectifs et les deux autres qui sont aussi symétrique indiquent les 2.5% et -2.5% des effectifs. Ainsi, en même temps qu'on ajuste la courbe théorique sur les points expérimentaux, les écarts entre la courbe théorique et les données expérimentales se répartissent dynamiquement dans les classes correspondantes (de couleur rouge). Il s'agira alors de trouver d'abord l'intervalle le plus petit de la classe centrale qui contiendra les 100% des effectifs des écarts. Ensuite, il suffira de diminuer, au fur et à mesure, cet intervalle et ajuster ensuite les paramètres de la courbe pour optimiser son équation algébrique. Il s'agira alors de trouver les paramètres de l'équation qui minimisent le plus possible cet intervalle et qui distribuent le plus normalement possible les effectifs des ces écarts. Notons aussi que, par cette méthode, les points singuliers (ou aberrants) de cette expérience seront ceux qui correspondent aux classes des effectifs se trouvant à l'extérieur des colonnes vertes. On a donnée aussi la possibilité de sélectionner une classe en affichant en même temps sur le graphique les points correspondants. Cette possibilité, qui nous permet de visualiser graphiquement la distribution des écarts, nous permettra aussi de repérer les points singuliers (ou aberrants) et de les rejeter avec un critère statistique (se situant par exemple à 3, 4 ... fois l'erreur-type). Avec le logiciel, nous donnerons alors à l'étudiant la possibilité de les éliminer.

Chaptire 5: Mise à l'essai fonctionnelle

Comme nous l'avons précisé dans le chapitre méthodologie, le but principal de la mise à l'essai fonctionnelle est de tester la fonctionnalité du prototype, c'est-à-dire l'environnement d'apprentissage développé, et de vérifier l'adéquation formelle entre le modèle d'action et ce dernier. Ici, elle doit nous permettre de mettre en évidence les modifications nécessaires pour établir cette adéquation.

Pour évaluer le prototype, nous avons divisé la mise à l'essai fonctionnelle en quatre étapes :

- évaluation de la conception de la méthode de RGS et son implantation informatique :

Dans cette étape, voir au paragraphe 5.1, on a demandé à un expert en didactique d'évaluer la conception et l'implantation informatique de la méthode de RGS.

- déverminage du prototype :

Dans cette étape, voir au paragraphe 5.2, on a demandé à deux experts, un est en technologie éducationnelle, et l'autre en génie logiciel, de « déboguer » le prototype pour faire ressortir toutes les erreurs de programmation et les corriger ensuite.

- validation de contenu de la méthode de modélisation algébrique :

Cette étape, voir au paragraphe 5.3, consiste à étudier différents phénomènes physiques afin de générer différents modèles algébriques (polynomial, sinusoïdal, exponentiel, etc.). Nous allons ensuite modéliser algébriquement les données de ces phénomènes avec le prototype et avec des logiciels connus comme Excel et Régressi de manière à valider les résultats obtenus vis-à-vis des références crédibles, reconnues et largement utilisées par la communauté scientifique.

- évaluation avec des experts en enseignement des sciences au secondaire et au collège.

5.1 Évaluation de la conception de la méthode de RGS et son implantation informatique

Tel que mentionné dans le paragraphe précédent, cette étape consiste essentiellement à évaluer la conception informatique de cette nouvelle méthode de modélisation algébrique RGS. Pour ce faire, nous avons choisi le directeur du laboratoire de robotique pédagogique de l'Université de Montréal. On a demandé à cet expert d'utiliser le logiciel et de souligner les difficultés d'utilisation de cette méthode de modélisation algébrique avec le prototype. L'expert a choisi de modéliser un mouvement pendulaire. L'évaluation a ainsi eu lieu dans ce laboratoire et a duré tout le mois de septembre 2005. Nous allons donc résumer les remarques faites par l'expert ainsi que les corrections adoptées par le concepteur du prototype.

Première remarque de l'expert:

- « Dans ce logiciel les données sont organisées pour optimiser leur visualisation sur l'écran. Or ceci est difficile pour interpréter la position de la distribution sur l'axe des x par rapport à zéro. Ce qui nous intéresse ici c'est d'obtenir une distribution qui serait la mieux centrée par rapport à zéro »

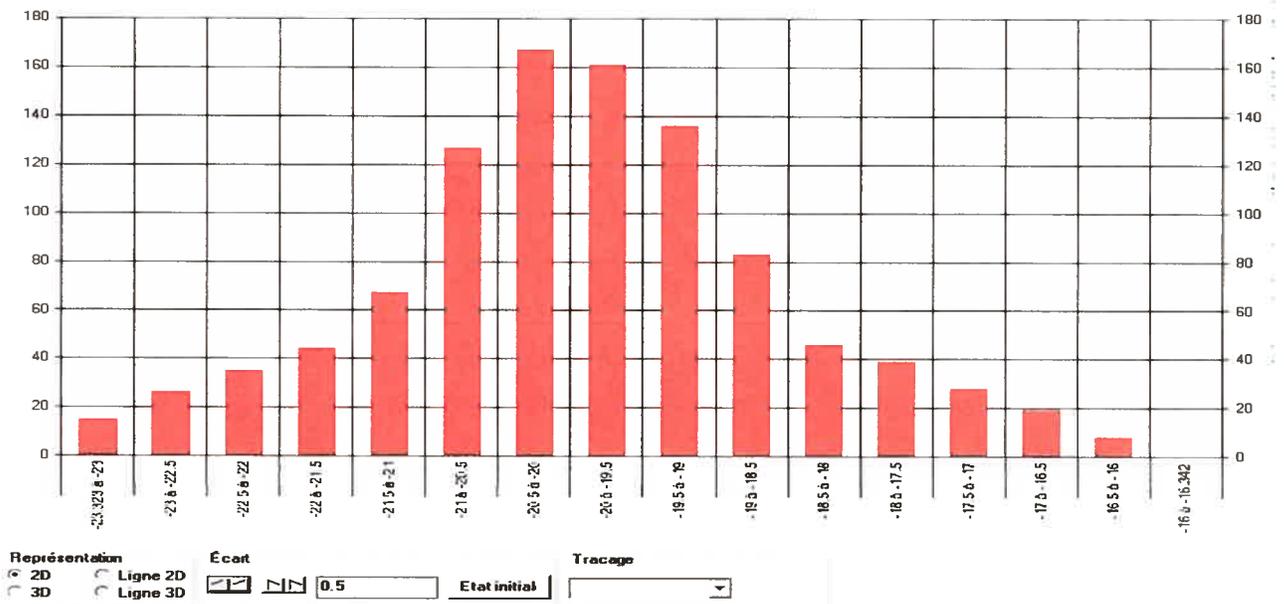


Figure 18: Histogramme

Correction du concepteur:

Notons que l'expert a eu de la difficulté à centrer la distribution des incertitudes au moment où il changeait les paramètres de l'équation. Étant donné que, théoriquement, les incertitudes de mesures évoluent autour de zéro lorsque la courbe théorique se rapproche des points

expérimentaux, nous avons corrigé l’affichage du diagramme à bandes en le centrant à zéro. De cette façon, l’élève devrait mieux comprendre que, lorsque la courbe:

- est au-dessus des points expérimentaux, les bandes seront à droite de zéro (côté positif),
- est en-dessous des points expérimentaux, les bandes seront à gauche de zéro (côté négatif),
- passe par l’ensemble des points expérimentaux, les bandes seront distribuées de part et d’autre de zéro.

Deuxième remarque de l’expert :

« Mouvement Pendulaire, c’est superbe, on peut en agissant sur les paramètres de l’équation, réduire l’incertitude. Serait-il possible d’agir sur les paramètres de l’équation et voir en même temps le diagramme à bandes qui correspond à la distribution des incertitudes (principe de la lunette cognitive)? »

Correction du concepteur:

Nous avons accepté de faire les changements suggérés par l’expert parce qu’en agissant sur les paramètres de la courbe avec la souris, l’élève pourra ainsi observer l’effet de ses actions en temps réel non seulement sur l’ajustement de la fonction symbolique sur les données expérimentales et sur les écarts mais aussi sur la distribution de ces écarts.

Troisième remarque:

« Jusqu’à présent nous sommes toujours passé de la représentation graphique des données, de leur représentation symbolique vers la distribution des écarts. Serait-il possible de passer du diagramme à bandes représentant la distribution des erreurs, aux points correspondants à ces écarts sur la représentation graphique? Y aurait- t- il une utilité? »

Correction du concepteur :

Ici, nous avons adopté l'idée de l'expert pour permettre à l'élève de déterminer, à partir de la distribution des incertitudes, des propriétés et des caractéristiques concernant le capteur, la représentation graphique ainsi que le modèle algébrique correspondant. Donnons l'exemple de l'étalonnage d'un capteur. Après avoir assigné l'équation d'étalonnage au capteur, on pourra ensuite étudier la relation de ce dernier avec un étalon précis. Dans ce cas, on devra pouvoir étudier les données expérimentales du capteur étalonné en fonction de l'étalon et modéliser algébriquement la relation entre ces deux derniers. Cette relation nous révélera si les deux capteurs mesurent bien la même chose en nous donnant une relation algébrique théorique $y=x$. En cliquant sur les bandes de la distribution des incertitudes, on pourra alors identifier les points correspondant à chaque bande sur le graphique. Ainsi, on pourra déterminer l'intervalle de mesure dans lequel le capteur est le plus précis en cliquant sur la bande centrée sur zéro. On pourra aussi identifier les points singuliers avec un critère objectif basé sur la distribution des erreurs, sur son écart à la moyenne.

Quatrième remarque:

« Vous avez juxtaposé le module de la représentation des erreurs absolues et le module graphique. Attendu qu'ils ont la même unité d'abscisse, il serait peut être plus judicieux de les superposer. »

Correction du concepteur :

Nous avons superposé les deux modules, ce qui permet à l'élève et à l'étudiant de mettre facilement en correspondance chaque erreur absolue avec la mesure correspondante dans le graphique et vice versa.

Cinquième remarque:

« Pour l'étudiant, ce serait peut-être plus commode d'avoir le pourcentage des effectifs plutôt que les effectifs bruts. »

Correction du concepteur :

Ici, nous avons adopté la remarque de l'expert. La représentation du diagramme à bandes avec le pourcentage des effectifs permettra à l'étudiant de comparer deux expériences avec des effectifs différents. Par contre, nous aimerions conserver l'autre option afin de donner ces deux options à l'utilisateur. Ainsi, un bouton d'option sera ajouté pour permettre le passage d'un mode à l'autre.

Sixième remarque:

« Ici, il est difficile de suivre en même temps la modélisation graphique et la distribution des incertitudes sur le diagramme à bandes. La lecture de l'écart des classes n'est pas très significative. On doit, pour pouvoir l'interpréter, se rapporter à l'échelle de mesure. »



Figure 19: Modélisation graphique et diagramme à bandes

Correction du concepteur:

En effet, nous avons programmé le diagramme de manière dynamique en ordonnée et en abscisse. C'est-à-dire que, chaque fois que l'on changeait les paramètres de l'équation, la valeur de l'étendue des erreurs absolues changeait aussi. Ainsi, la valeur assignée à chaque classe (étendue/10) change aussi en même temps ainsi que leur effectif. Nous allons maintenant fixer les intervalles de chaque classe en pourcentage de l'échelle de la variable en ordonnée. Par défaut, les intervalles seront de -7% à 7% . On va bien sûr donner l'option à

l'utilisateur de changer ces pourcentages. Nous allons aussi fixer l'échelle de l'ordonnée en pourcentage des effectifs pour rendre là encore la forme de la distribution indépendante du nombre de données. L'étendue de l'échelle sera donc de 0% à 100 %. Avant cette correction, les valeurs de l'échelle allaient de zéro à l'effectif de la classe qui contient le plus grand nombre de points, ce qui rendait l'échelle dynamique, c'est-à-dire qu'elle variait à chaque changement de paramètre de l'équation algébrique.

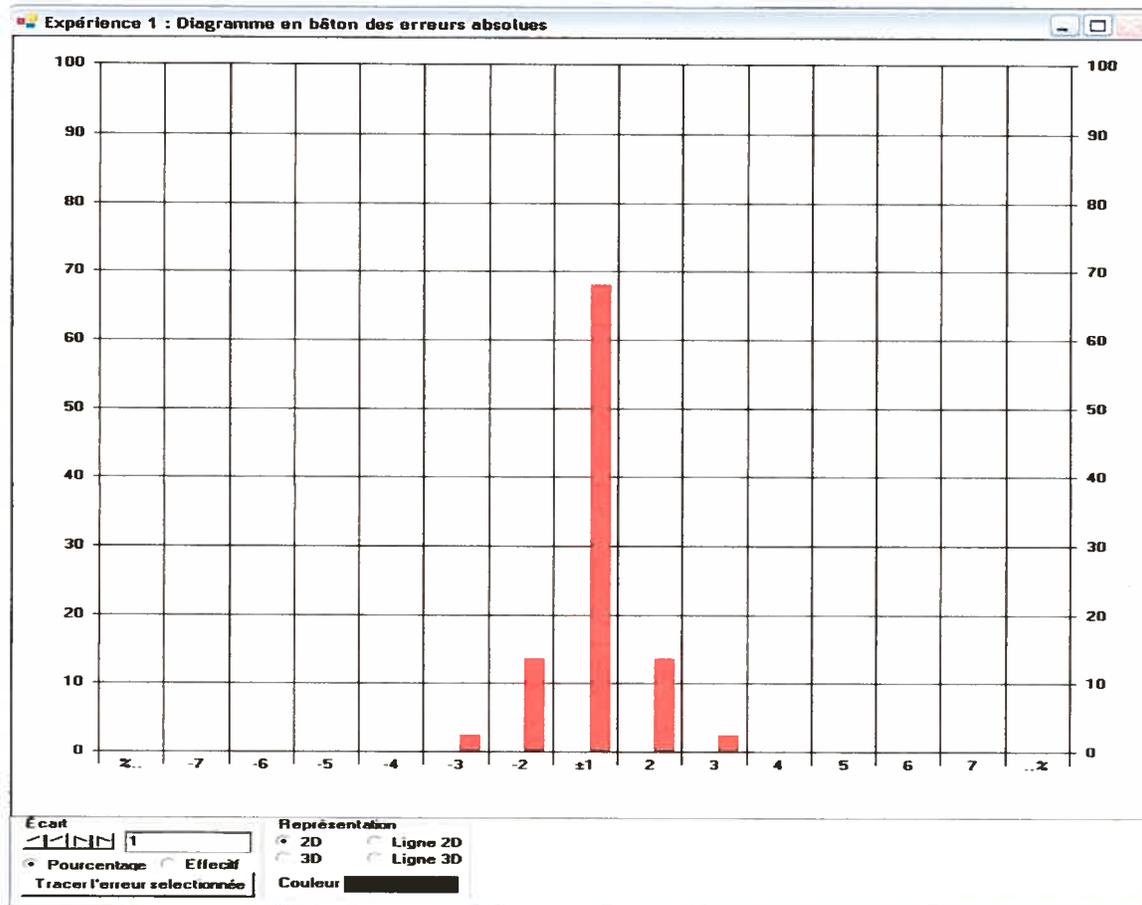


Figure 20: Histogramme corrigé

Septième remarque:

« L'échelle du capteur virtuel, telle que calculée automatiquement, en parcourant l'ensemble de données de la courbe, ne nous permet pas de visualiser la courbe dans certains cas. »

Correction du concepteur :

En effet, nous avons voulu rendre le calcul de l'échelle automatique. Cela pose un problème dans le cas d'un rapport. Par exemple, dans le cas de la variable calculée Résistance (Rapport entre le voltage et le courant), le maximum théorique est «plus infini» et le minimum théorique, «moins l'infini ». Or, dans ce cas, pour des raisons évidentes d'affichage sur l'écran de l'ordinateur, on ne peut assigner ces valeurs à l'échelle du capteur virtuel (Résistance). Pour résoudre ce problème, on assigne par défaut l'échelle de ce capteur à ± 100 fois l'étendue de l'échelle du capteur courant (puisque'il est au dénominateur). Or, ce choix n'est pas toujours valable pour les autres types d'expérience. Pour cette raison, on va donner aux utilisateurs la possibilité de choisir eux-mêmes l'échelle de mesure la plus appropriée à leur expérience.

Huitième remarque :

« Traditionnellement, l'erreur sur une fonction s'obtient par l'erreur-type. Cependant, ici, dans le logiciel vous affichez l'écart maximum et l'écart minimum de l'incertitude et non pas l'erreur-type. Comment peut-on évaluer graphiquement l'erreur-type? »

Correction du concepteur:

Nous avons prévu d'évaluer et de déterminer l'erreur-type en ajustant et en regroupant les classes d'erreur pour arriver un pourcentage d'environ de 68%. Il aurait été plus facile pour le concepteur de calculer directement l'erreur-type. Cependant, la solution par approximations successives que nous avons utilisée devrait permettre à l'élève de mieux comprendre les notions d'erreur type et de distribution en sachant que, dans l'intervalle de plus ou moins une erreur-type, on doit retrouver approximativement 68% des valeurs (lorsque ces valeurs se distribuent normalement).

5.2 Déverminage du prototype (logiciel MicrolabExAO)

Le déverminage du prototype consiste à tester la fonctionnalité de ce dernier pour corriger les erreurs de programmation dans le logiciel MicrolabExAO. Pour ce faire, nous avons effectué ce test avec deux experts en expérimentation assistée par ordinateur afin qu'ils proposent des suggestions de corrections. Le premier est un ingénieur en informatique, le deuxième est un expert en technologie éducative. Chacune de leurs suggestions sera analysée, vérifiée, et mise en œuvre au besoin. Nous avons demandé aux premiers experts d'effectuer ce test en remplissant un formulaire dans lequel ils ont noté toutes les erreurs de programmation qu'ils ont rencontrées.

Nous allons maintenant présenter les rapports de chacun de ces experts ainsi que le traitement que nous avons effectué.

Les premier et deuxième déverminages ont été effectués au Laboratoire de Robotique Pédagogique de l'Université de Montréal pendant les mois d'août et septembre de l'année 2005 par l'expert en technologie éducative, plus spécifiquement en ExAO, et par un étudiant de deuxième année en génie logiciel.

Pour le premier déverminage, l'experte nous a suggéré 35 corrections. Parmi ces corrections, on en trouve 18 d'ordre ergonomique, 4 d'ordre sémiotique, 10 erreurs de programmation, 1 faute d'orthographe et finalement 2 suggestions dont on n'a pas tenu compte. On entend par corrections d'ordre sémiotique les corrections qui, selon l'auteur de cette recherche, pourraient aider les élèves et étudiants à accroître leurs activités de traitement et de conversion telles que définies par Duval (1995).

Pour le second déverminage, l'expert nous a suggéré 94 corrections. Parmi ces corrections, on en trouve 23 d'ordre ergonomique, 41 erreurs de programmation, 3 fautes d'orthographe et finalement 22 qui ont été abandonnées. Elles ont été abandonnées pour des raisons d'esthétique, de redondance ou d'incompatibilité avec l'idée même de cette recherche. Les corrections et suggestions, et leurs traitements, sont détaillés à l'annexe 8.

5.3 Validation de contenu de la méthode de Régression Graphico-Statistique (RGS)

La validation de contenu consiste à étudier différents phénomènes physiques pour générer différents modèles algébriques (polynomial, sinusoïdal, exponentiel, etc.) et les modéliser ensuite algébriquement avec le prototype. Pour valider les résultats, nous allons les comparer avec les résultats obtenus par une référence reconnue dans la communauté scientifique, comme Excel et Régressi.

La méthode RGS assistée par ordinateur, comme la méthode des moindres carrés utilisée dans Excel, Régressi et la plupart des calculatrices scientifiques, veut résoudre le même problème mathématique, c'est-à-dire trouver la meilleure courbe qui passe par un ensemble de points expérimentaux. Pour résoudre ce problème algébriquement, Gauss et Legendre ont pensé de minimiser la somme des carrés des écarts verticaux, d'autre part la méthode RGS minimise directement les écarts verticaux eux-mêmes en tenant compte de leur répartition de part et d'autre de la courbe recherchée et ce, le plus normalement possible. En fait, la méthode RGS fait la même chose que la méthode Gauss-Legendre, elle minimise les écarts verticaux avec une approche différente. Dans RGS, l'attention est portée surtout sur les écarts individuels et sur leur distribution en visant une distribution centrée sur zéro, qui soit la plus normale possible, alors que le critère de Gauss-Legendre est aveugle et consiste essentiellement à minimiser la somme des carrés des écarts verticaux. Nous allons donc vérifier maintenant que les résultats obtenus par la méthode RGS sont équivalents aux résultats obtenus avec Excel et Régressi. Pour ce faire, nous allons, de cinq manières différentes, valider la méthode RGS en étudiant:

- la pression de l'eau pour générer un modèle algébrique linéaire du premier degré,
- la chute libre d'un corps pour générer un modèle algébrique parabolique,
- la loi des gaz parfaits pour générer un modèle algébrique rationnel,
- la décharge d'un condensateur pour générer un modèle algébrique exponentiel,
- le mouvement pendulaire pour générer un modèle algébrique sinusoïdal amorti.

5.3.1 Validation avec l'étude de la Pression de l'eau

Pour effectuer l'expérience de la pression de l'eau, nous allons utiliser un capteur de pression de $\pm 20\text{hPa}$, le microcontrôleur MicrolabExAO, le logiciel MicrolabExAO, et un cylindre

gradué de 0   100 mm. On remplit ce dernier de 100 mm d'eau. Notons que chaque graduation de 5 ml sur le cylindre utilisé correspond ici à une profondeur de 9mm.

5.3.1.1 Branchement du matériel à l'ordinateur

On branche une alimentation de 9V au microcontrôleur. Ensuite, on branche ce dernier à travers le port série ou le port USB   l'ordinateur. Enfin, on branche le capteur de pression au microcontrôleur.

5.3.1.2 Préparation du logiciel

On lance le logiciel MicrolabExAO. Ce dernier doit détecter automatiquement le microcontrôleur et le capteur de pression relative qui sont branchés. Dans la fenêtre d'accueil du logiciel, on clique sur le capteur de pression détecté. Un menu déroulant s'affiche. Sur ce menu, on clique sur « tudier ce capteur en fonction d'une entrée manuelle». Une boîte de dialogue s'affichera alors pour inscrire les propriétés de la variable de profondeur (nom: Profondeur, variable : Prof, unité : mm, minimum=0, maximum = 200mm). Ensuite, on clique sur ok pour afficher la fenêtre graphique.

5.3.1.3 Expérimentation et acquisition de données

Le matériel et le logiciel étant prêts, on commence l'acquisition des données expérimentales. Pour ce faire, chaque fois qu'on plonge le capteur de pression dans l'eau, on inscrit manuellement sa profondeur⁶ dans le champ texte intitulé « Entrée manuelle» et on tape ensuite la touche entrée du clavier pour que le logiciel lise la pression de l'eau correspondante et affiche le point graphique de coordonnées (Pression, profondeur). Notons que durant cette expérience, nous avons augmenté la profondeur de 9mm entre chaque mesure.

Voici le résultat graphique de cette expérience avec le prototype:

⁶ Attention : Il faut lire la profondeur correspondant au ménisque dans le tuyau du capteur de pression.

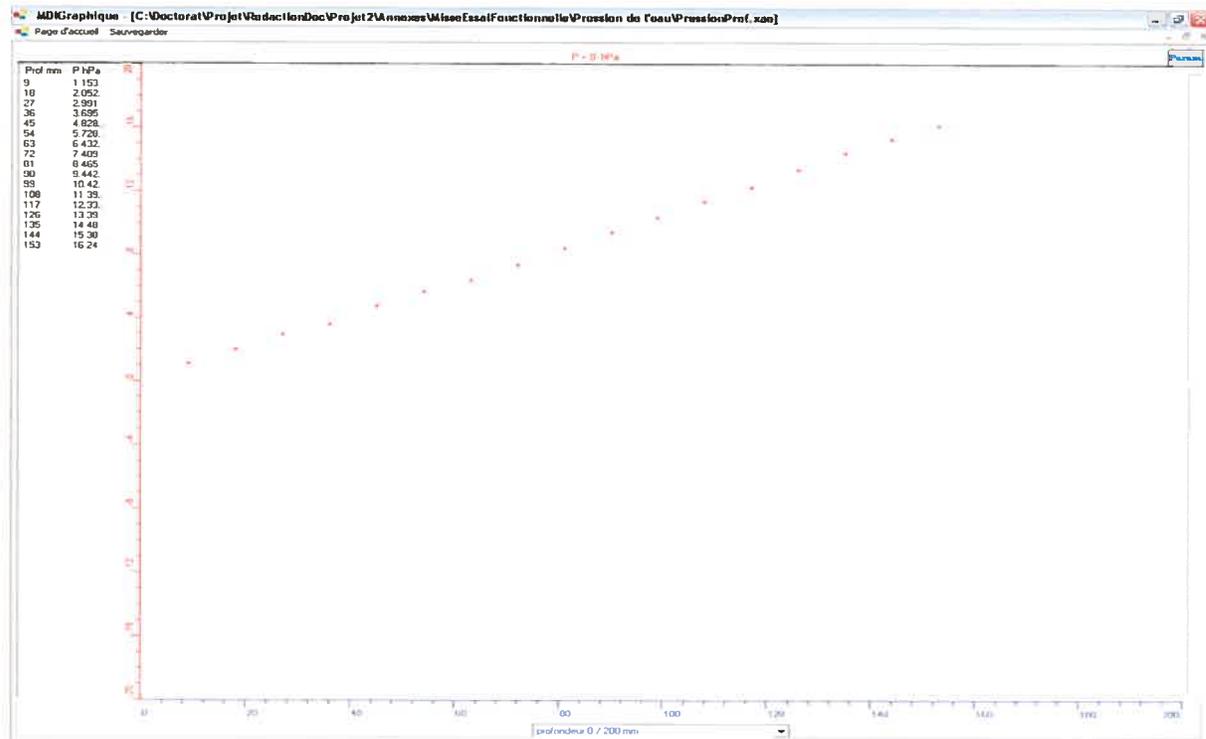


Figure 21 : Représentation graphique de la pression de l'eau en fonction de la profondeur

5.3.1.4 Modélisation algébrique de la pression de l'eau en fonction de la profondeur avec la méthode RGS

Il s'agit de trouver la droite qui minimise les écarts entre elle et les points expérimentaux et qui les distribue le plus normalement possible de part et d'autre de zéro.

Voici le résultat de la modélisation algébrique

(Voir annexe\MiseEssaiFonctionnelle\Pression de l'eau\ModélisationPressionProf.xao):

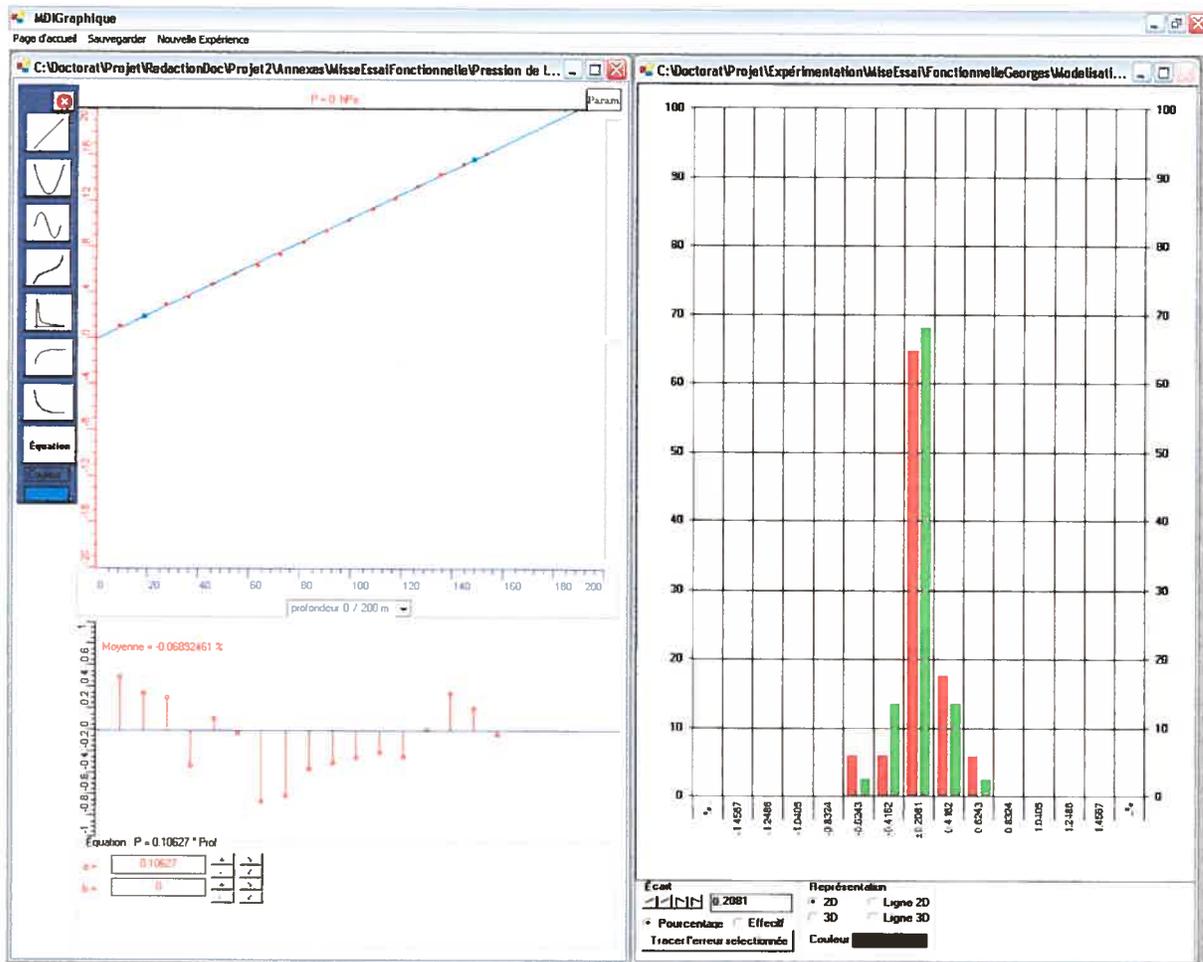


Figure 22: Modélisation algébrique de la pression de l'eau en fonction de la profondeur avec la méthode RGS

On obtient ainsi l'équation $P = 0.10627 \cdot \text{Prof}$ avec un écart à la droite de $\pm 0.2081\%$ de l'étendue de l'échelle de mesure du capteur de pression ($20 - (-20) = 40$ hPa). En observant le diagramme à bandes rouges, on obtient:

- que 67% des points expérimentaux se trouvent à un écart maximal de $\pm 0.208\% = \pm 0.083$ hPa.
- que 95% des points expérimentaux se trouvent à un écart maximal de $\pm 2 \cdot 0.208\% = 0.4162\% = 0.166$ hPa.
- que 100% des points expérimentaux se trouvent à un écart maximal de $\pm 3 \cdot 0.208\% = 0.624\% = 0.249$ hPa.

En arrondissant à trois chiffres après la virgule, la relation de la profondeur s'écrit :

$$P = 0.106 \cdot \text{Prof} \pm 0.624\% = 0.106 \cdot \text{Prof} \pm (0.624 \cdot 40) / 100 \text{ hPa}$$

$$\text{Soit } P_{\text{hPa}} = 0.106 \cdot \text{Prof}_{\text{mm}} \pm 0.249_{\text{hPa}}.$$

Ainsi, pour une profondeur de 100mm, la pression sera égale à $0.106 \cdot 100$, soit $10.6 \text{hPa} \pm 0.249 \text{hPa}$.

5.3.1.5 Modélisation algébrique de la pression de l'eau en fonction de la profondeur avec la méthode des moindres carrés

Pour trouver la meilleure droite, d'équation $y = b_1x + b_0$, qui passe par l'ensemble de points, nous allons appliquer la méthode des moindres carrés décrite dans le paragraphe 2.5.2.4.

$$b_0 = \frac{\sum_{k=1}^n x_k^2 \sum_{k=1}^n y_k - \sum_{k=1}^n x_k \sum_{k=1}^n x_k y_k}{n \sum_{k=1}^n x_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2} ; b_1 = \frac{n \sum_{k=1}^n x_k y_k - \sum_{k=1}^n x_k \sum_{k=1}^n y_k}{n \sum_{k=1}^n x_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2}$$

n étant le nombre de points expérimentaux, x_k (profondeur) et y_k (Pression) sont les coordonnées des points expérimentaux. On obtient ainsi : $b_0 = 0.106$ et $b_1 = 0.009$, donc la relation de la pression (P) en fonction de la profondeur (Prof) s'écrit: $P = 0.106 \text{ Prof} + 0.009$. Pour vérifier l'équation qu'on a obtenue, nous avons transféré les données expérimentales vers Excel et nous y avons effectué une régression linéaire. Voici le résultat de la modélisation algébrique dans Excel, identique au résultat calculé ci-dessus.

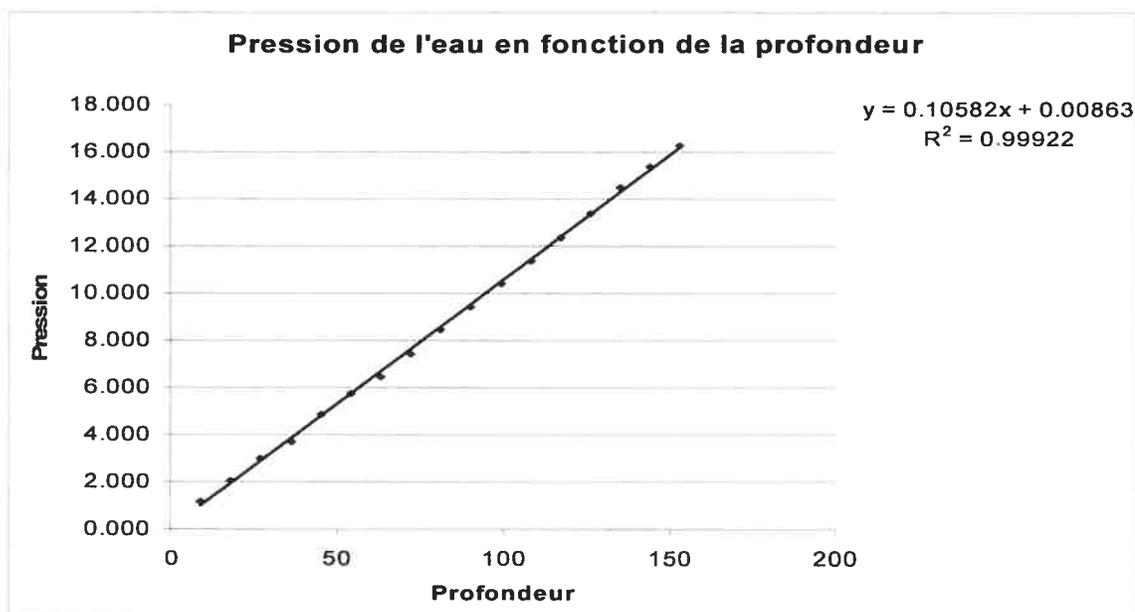


Figure 23: Modélisation algébrique de la pression de l'eau en fonction de la profondeur dans Excel

5.3.1.6 Comparaison des résultats des deux méthodes (RGS et moindres carrés avec Excel)

On remarque qu'avec les deux méthodes on a obtenu le même coefficient directeur ou pente, 0.106. Par contre, on a obtenu deux constantes (origines) différentes. Cependant, la différence entre ces deux constantes, 0hPa et 0.009hPa, n'est pas significatif puisqu'elles sont inférieures à la marge d'erreur du système de mesure qui est de 1 millième de l'échelle de mesure de capteur donc de $40/1000 = 0.04\text{hPa}$. Notons qu'on aurait pu imposer le zéro à Excel en appliquant l'option : d'origine à zéro. Ainsi, nous pouvons ici dire que les résultats obtenus avec Excel et la méthode RGS sont équivalents. Par contre, si on inscrit le résultat de la régression linéaire obtenu par Excel dans le prototype, on remarque que les écarts ne se distribuent pas de manière aussi symétrique et normale qu'avec la méthode RGS.

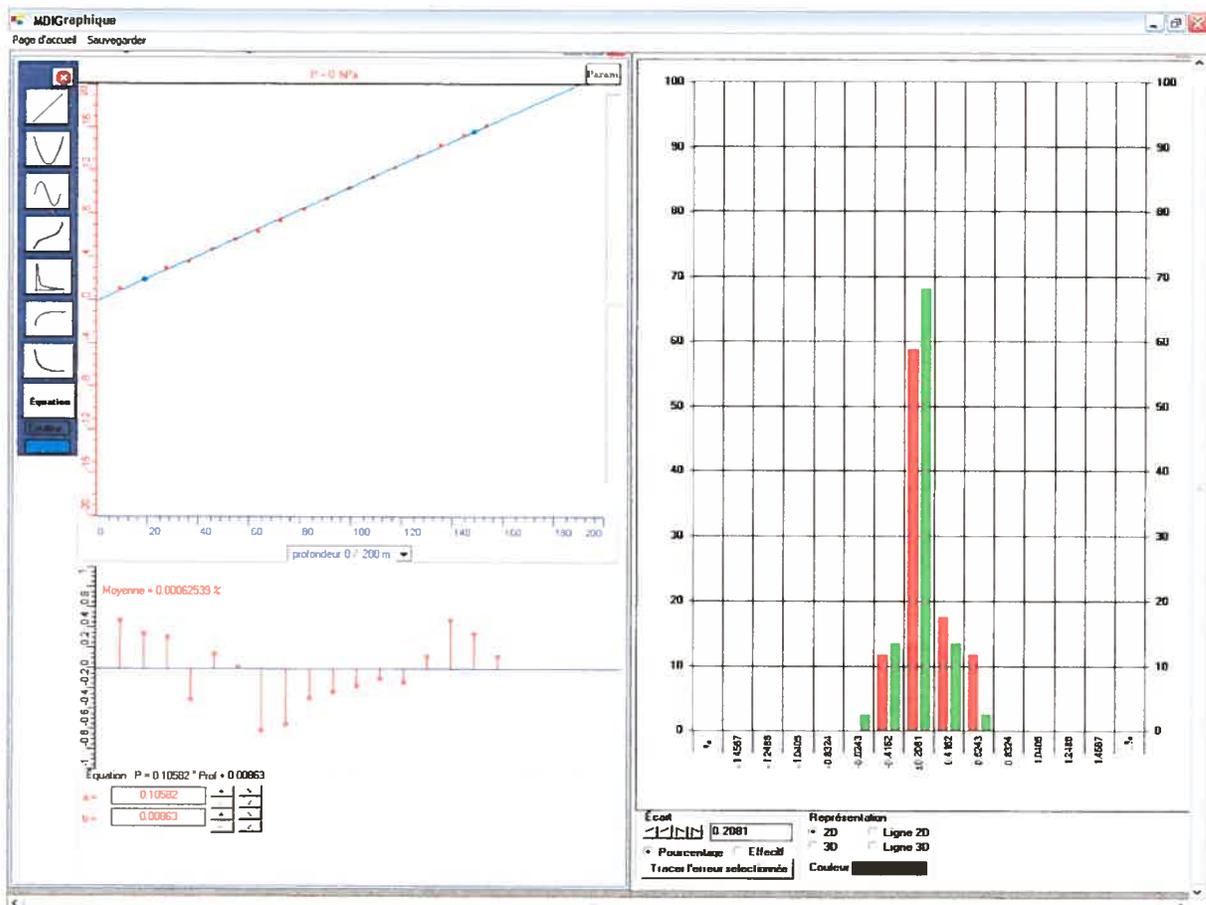


Figure 24: Distribution des écarts selon l'équation de la pression de l'eau en fonction de la profondeur calculée par Excel

Précisions aussi qu'avec la méthode RGS, on a non seulement déterminé directement l'équation algébrique des variables à l'étude mais aussi l'incertitude de mesure (erreur-type) sur la prédiction de la pression de l'eau avec le modèle algébrique trouvé. Alors que, la méthode des moindres carrés ne calcule pas directement cette incertitude sur la prédiction de la pression ($Pression = f(Profondeur)$). Avec Excel, Il faut alors effectuer un deuxième calcul à l'aveugle sans que les élèves puissent comprendre le calcul mathématique sous-jacent.

5.3.2 Validation avec l'étude de la Chute libre

Pour effectuer l'expérience de la chute libre, nous allons utiliser une fourchette optique, une règle sur laquelle on a tracé des barres noires parallèles séparées de 3.6mm, le microcontrôleur MicrolabExAO et le logiciel MicrolabExAO.

5.3.2.1 Branchement du matériel à l'ordinateur

On reprend la procédure décrite dans le paragraphe 5.2.1.1 en branchant cette fois-ci la fourchette optique au microcontrôleur au lieu du capteur de pression.

5.3.2.2 Préparation du logiciel

On lance le logiciel MicrolabExAO. Ce dernier doit détecter le microcontrôleur et la fourchette optique branchés. Une fois que la fourchette optique est détectée, le logiciel passe automatiquement dans le mode graphique. On clique ensuite sur le bouton acquisition et on fait tomber la règle à travers la fourchette optique. Le microcontrôleur renvoie automatiquement au logiciel le temps de passage entre chaque barre noire pour que ce dernier trace la courbe de la position (Pos en mètre) en fonction du temps (tps en secondes).

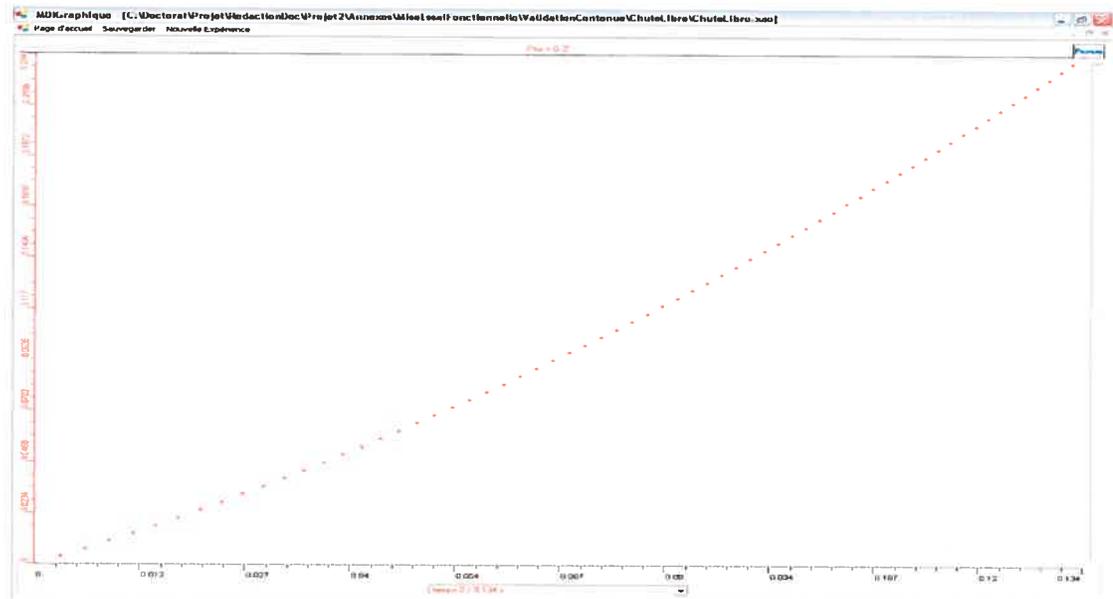


Figure 25: Représentation graphique du mouvement d'un corps en chute libre

5.3.2.3 Modélisation algébrique de la chute libre avec la méthode RGS

Il s'agit de trouver la parabole qui minimise le plus possible les écarts entre elle et les points expérimentaux et qui les distribue le plus normalement possible. Pour ce faire, nous allons, dans un premier temps ajuster la fonction symbolique sur les données empiriques. Dans un deuxième temps, nous allons réduire les écarts avec la fenêtre des écarts, puis dans un troisième temps, nous allons utiliser la fenêtre de distribution des écarts afin de mieux optimiser la parabole recherchée et d'évaluer l'incertitude de mesures.

Nous allons décrire étape par étape ce processus de modélisation algébrique.

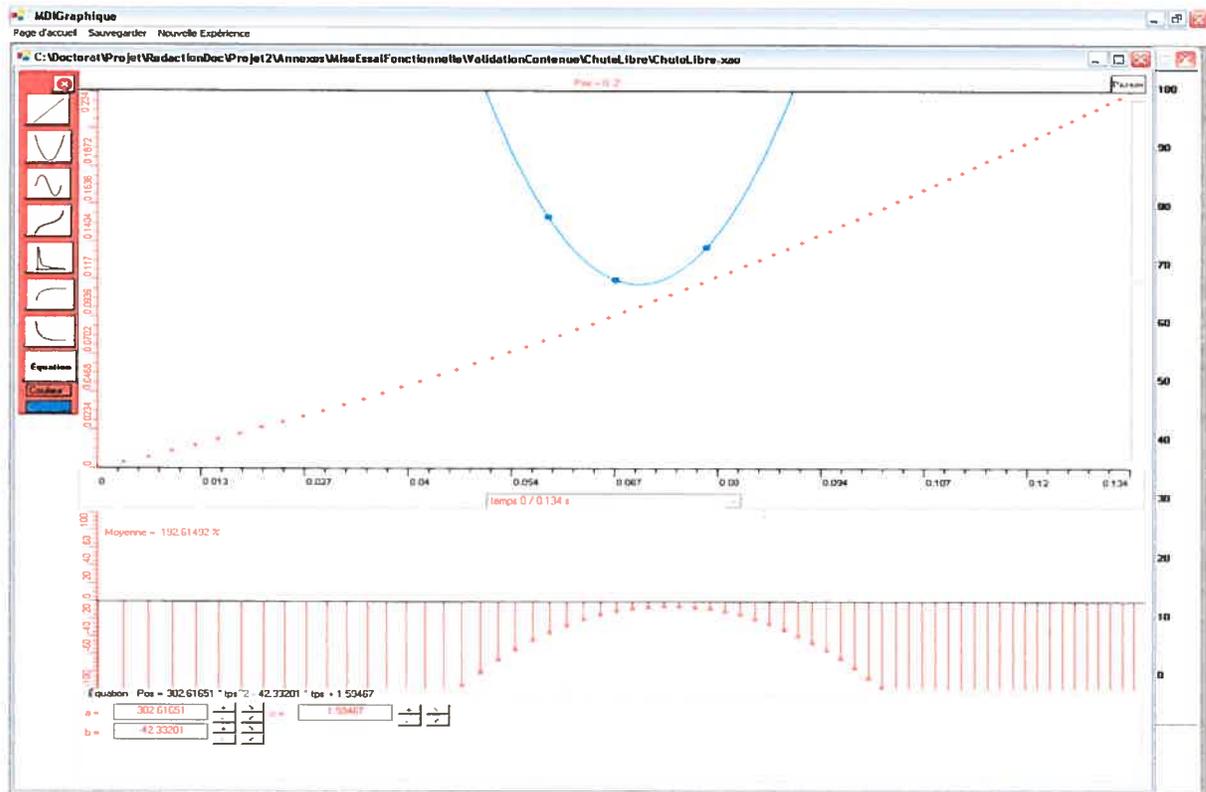


Figure 26: Choix de la parabole pour modéliser algébriquement les données du phénomène de la chute libre

Avec la souris, on superpose la parabole bleue sur la série expérimentale qui représente les données mesurées (Voir figure 27).

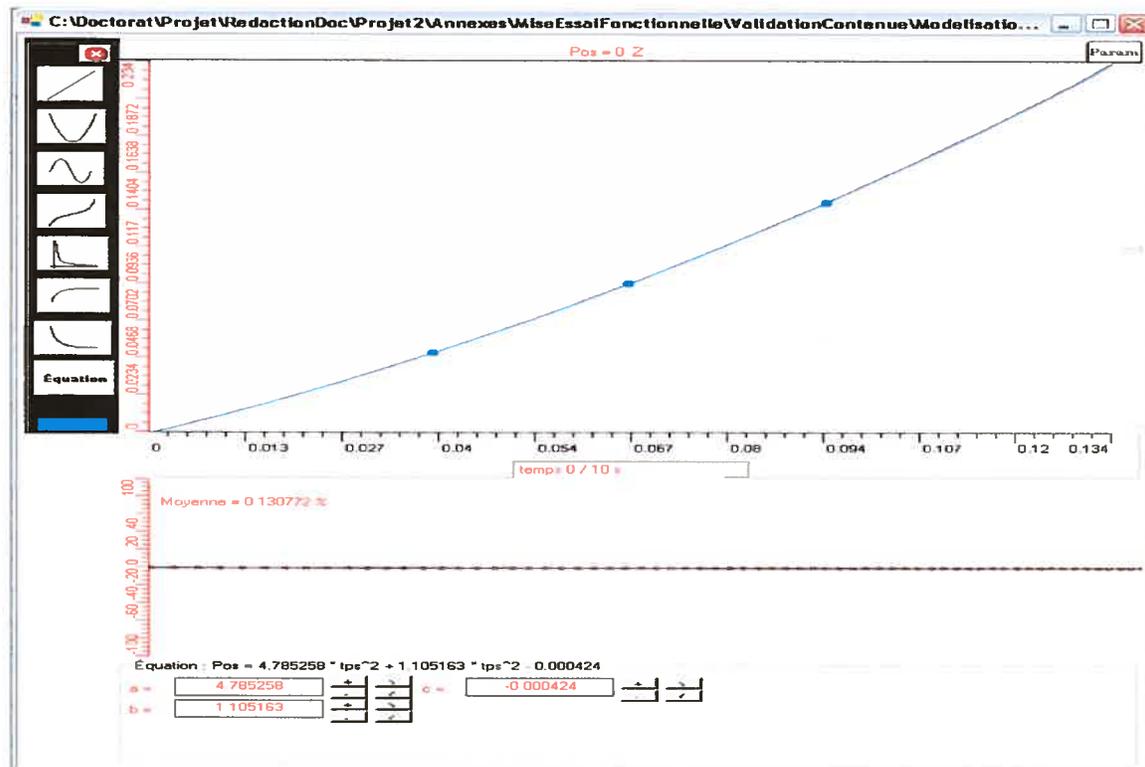


Figure 27: Ajustement visuel de la parabole sur les données expérimentales du phénomène de la chute libre

Nous allons ensuite montrer au lecteur comment la fenêtre des écarts va aider l'élève à mieux comprendre le processus de modélisation algébrique et comment réduire ces écarts entre la courbe théorique et les données expérimentales de la fenêtre des écarts.

Première étape

Pour mieux visualiser les écarts des points expérimentaux avec la fonction symbolique (parabole bleue), dans la fenêtre des écarts, on va dilater les écarts en sélectionnant avec la souris l'échelle des écarts pour mettre par exemple le maximum à 0.5 et le minimum à -0.5 (voir figure 28)

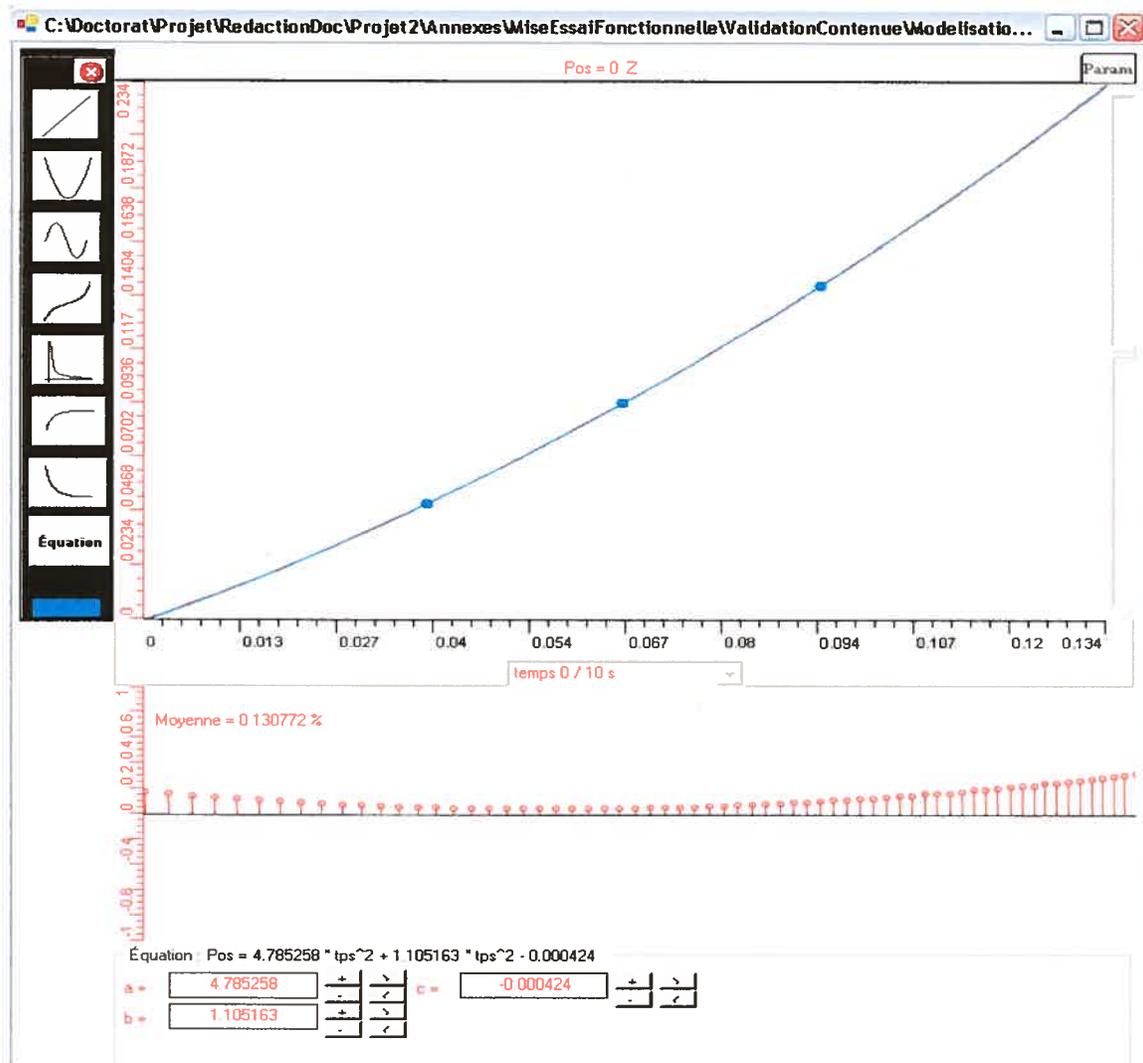
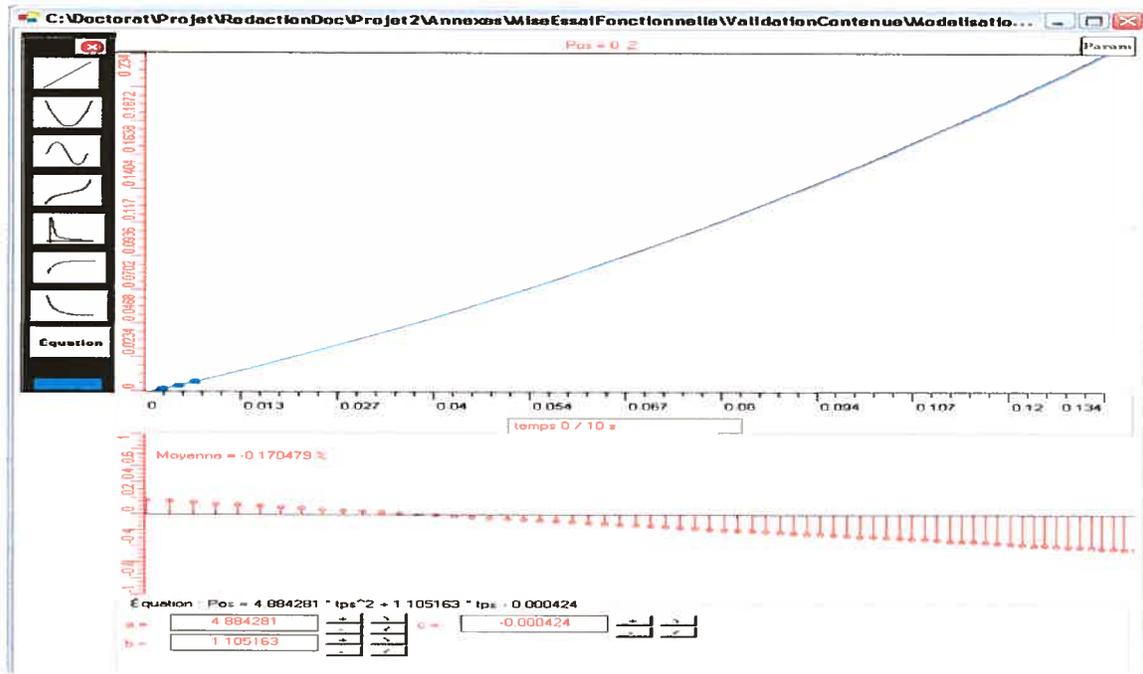


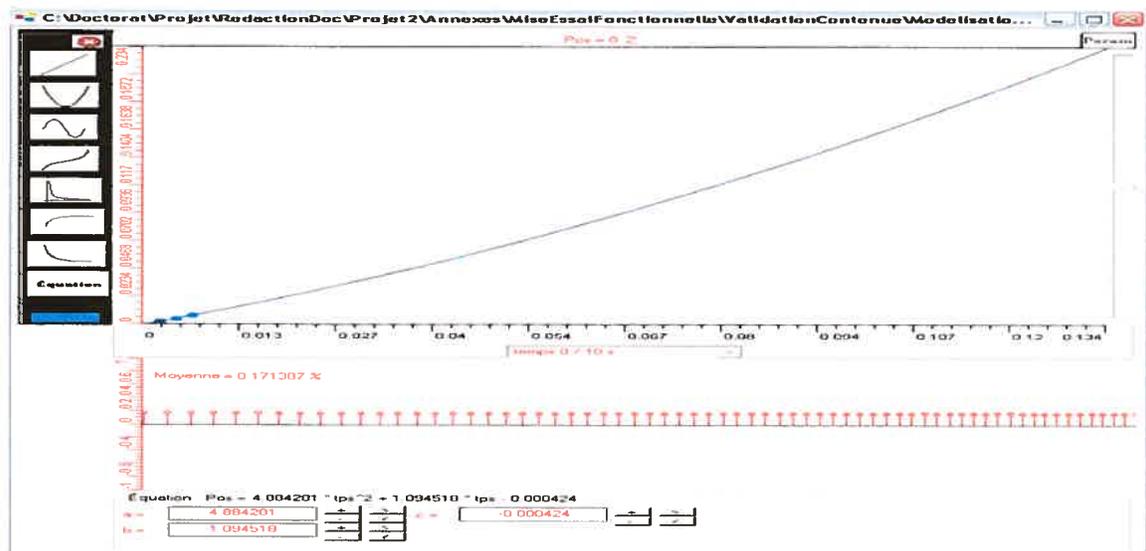
Figure 28: Visualisation des écarts entre la parabole symbolique et les données expérimentales de la chute libre

On remarque que, dans la fenêtre des écarts, les écarts forment une courbe plus au moins parabolique. Il suffit de changer le paramètre 'a' afin que les écarts se réduisent à une droite linéaire, ce qui, dans la fenêtre graphique, ajuste la courbure de la courbe bleue à la courbure des données expérimentales à l'aide de la fenêtre des écarts.



Étape 2 :

Pour éliminer la translation horizontale, on doit éliminer la pente de la droite formée par les écarts. Pour ce faire, on doit ajuster le coefficient b jusqu'à ce que les écarts forment une droite horizontale comme dans la figure 30.



Étape 3

Pour éliminer la translation verticale entre la courbe symbolique et les données expérimentales, il faut maintenant ajuster le coefficient c afin de translater les écarts vers zéro.

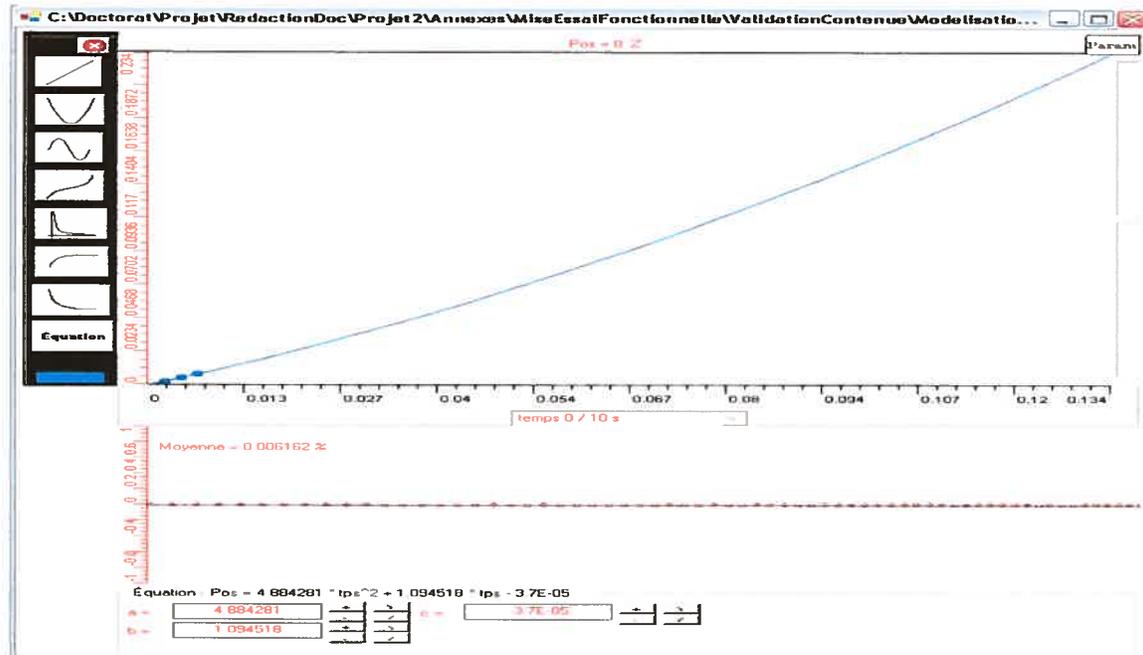


Figure 31: Réduction des écarts qui contribuent à la translation verticale des écarts ce qui revient à éliminer la translation verticale de la fonction théorique aux données expérimentales dans la fenêtre graphique

Jusqu'à cette étape, on obtient l'équation suivante :

$$y = 4.8842x^2 + 1.0945x - 0.0000375$$

Pour mieux visualiser les écarts, nous allons encore dilater ces écarts en réduisant l'échelle des écarts de $\pm 0.5\%$ à $\pm 0.2\%$ (Voir figure 32).

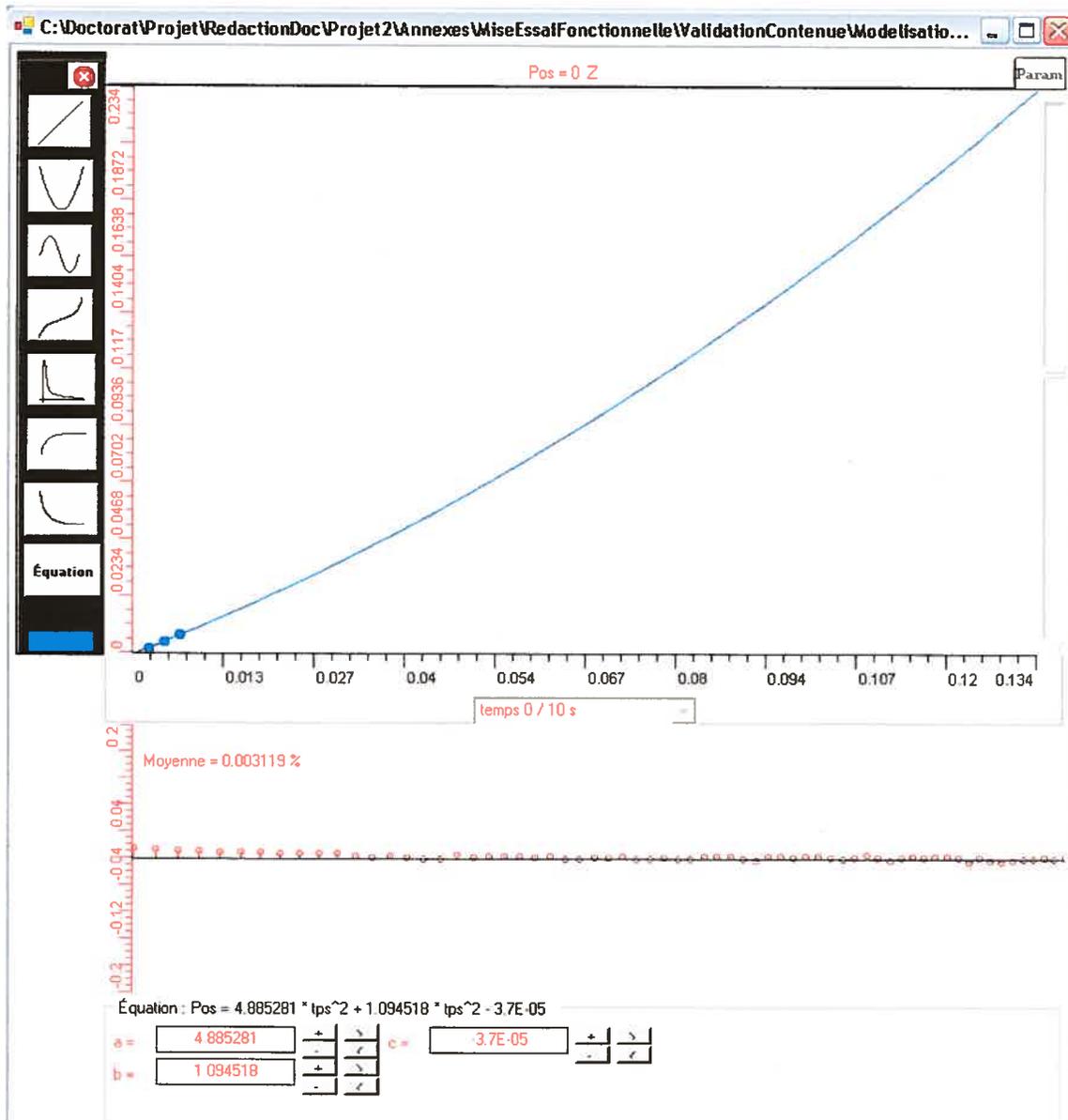


Figure 32 : Réduction de l'échelle des écarts entre la courbe symbolique et les données expérimentales de la chute libre (- 0.2% à 0.2%)

En observant les écarts, on s'aperçoit qu'une courbure dans les écarts existe encore. Ceci nous indique qu'on peut encore ajuster le coefficient a dans l'équation de la parabole. Pour ce faire, nous allons répéter les trois étapes précédentes

Étape 1 (Répétée une deuxième fois)

Pour éliminer la courbure dans la fenêtre des écarts, nous allons ajuster le coefficient a, afin que les écarts forment une droite linéaire.

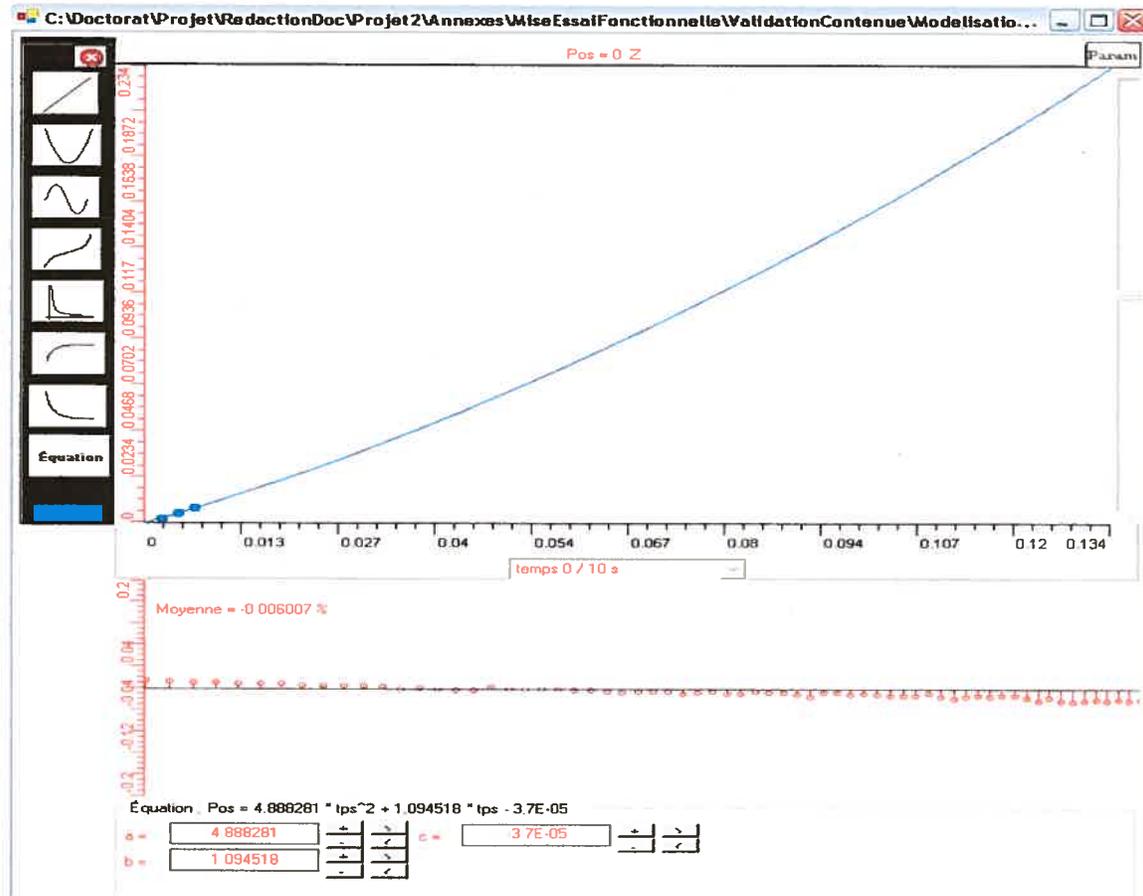


Figure 33: Deuxième réduction des écarts qui contribuent à la courbure dans la fenêtre des écarts ce qui revient à ajuster la courbure de la fonction théorique dans la fenêtre graphique.

Étape 2 (Répétée une deuxième fois):

Encore une fois, pour éliminer la translation horizontale, on doit aussi éliminer la pente de la droite formée par les écarts. Nous allons donc ajuster le coefficient b jusqu'à ce que les écarts forment une droite horizontale comme dans la figure 34.

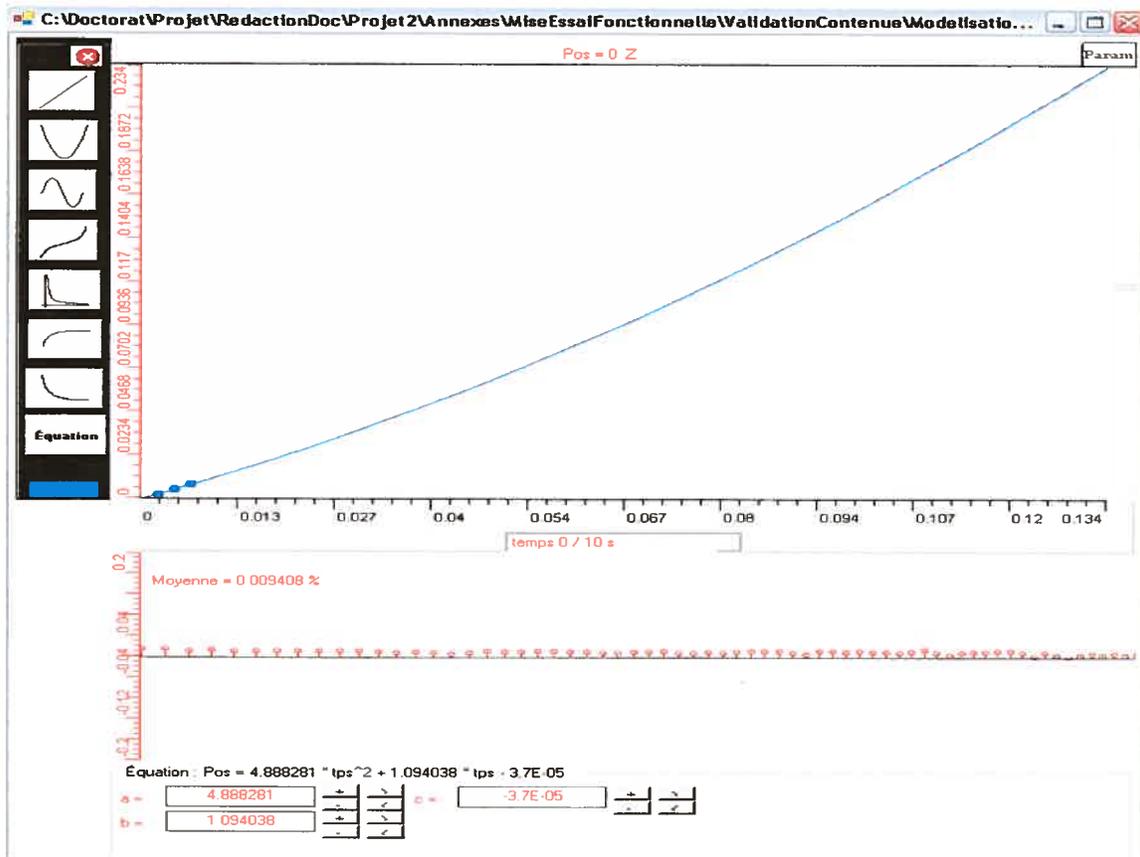


Figure 34: Deuxième réduction des écarts qui contribuent à la pente dans la fenêtre des écarts ce qui revient à éliminer la translation horizontale de la fonction théorique aux données expérimentales dans la fenêtre graphique

Étape 3 (Répétée une deuxième fois)

Encore une fois, pour éliminer la translation verticale de la courbe symbolique aux données expérimentales, il faut maintenant ajuster le coefficient c afin de translater les écarts vers zéro (Figure 35).

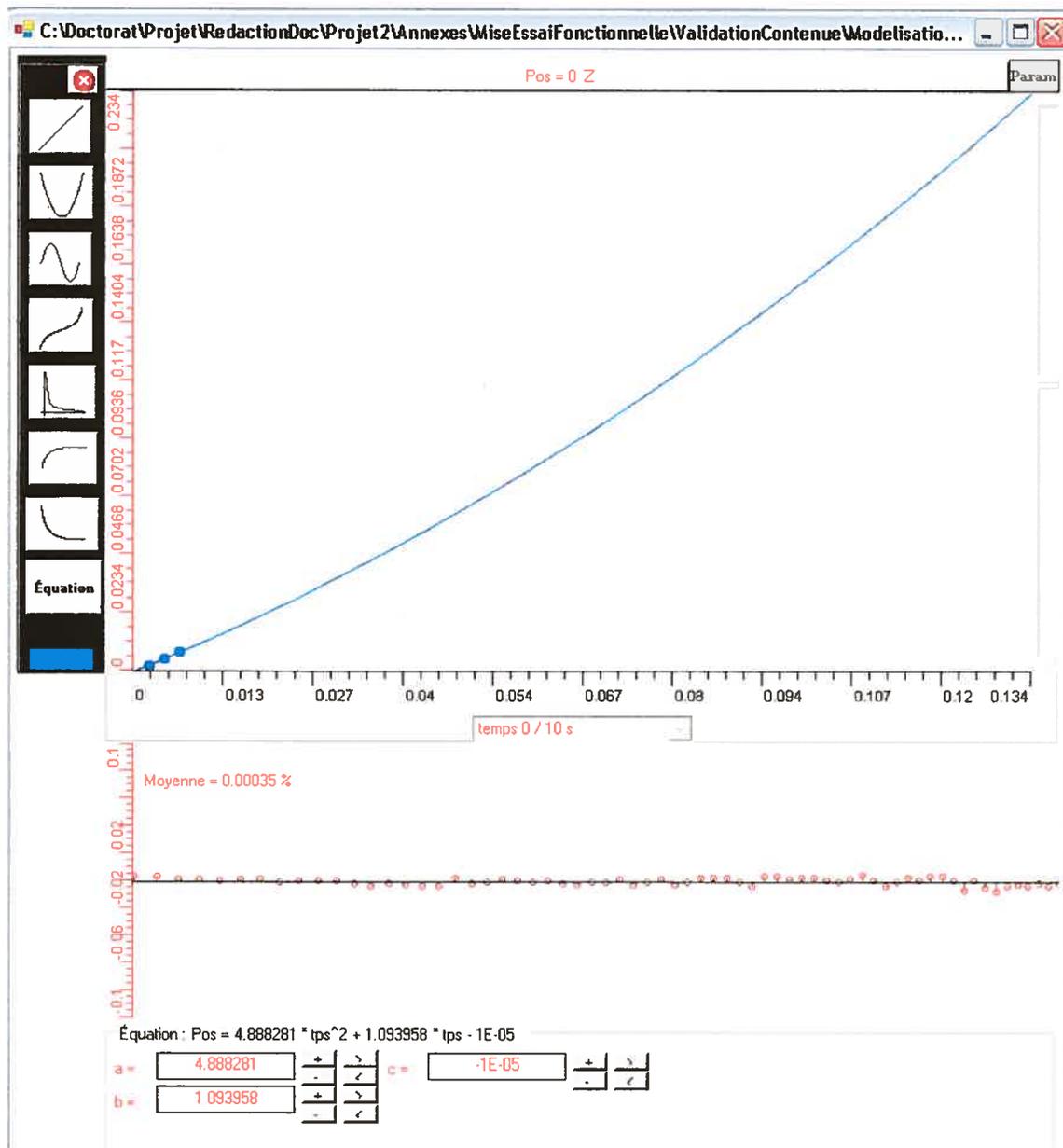


Figure 35 : Visualisation des écarts entre la fonction symbolique et les données expérimentales de la chute libre (de -0.1% à 0.1%)

En observant les écarts, et parce qu'on ne voit ni courbure dans les écarts ni pente, on peut arrêter le processus itératif de ces trois étapes.

On doit alors se demander comment ces écarts se distribuent de part et d'autre de zéro pour voir si on peut encore optimiser la courbe. Dans la fenêtre de l'histogramme, l'intervalle de la classe centrale est par défaut égal à 1% (Figure 36).

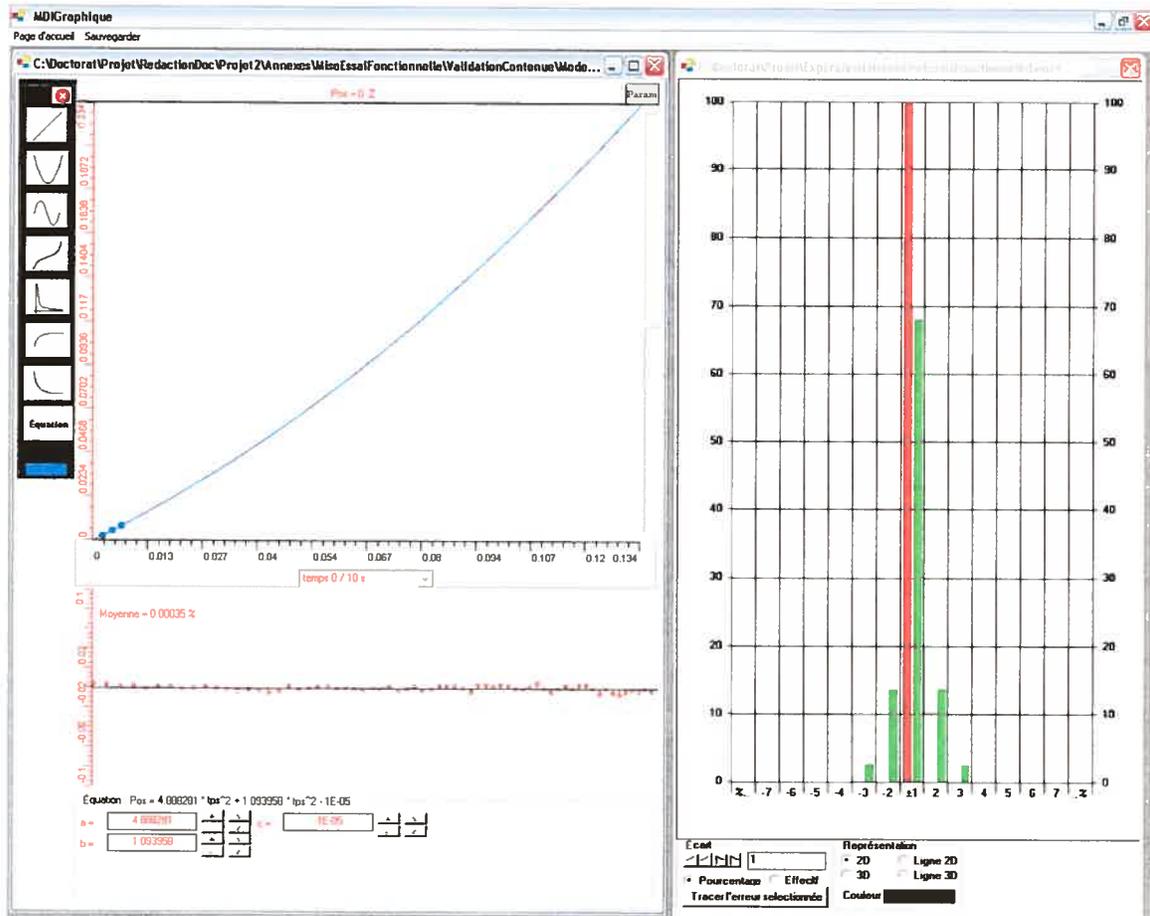


Figure 36: Représentation de la distribution des écarts entre la fonction parabolique et les données expérimentales de la chute libre dont l'intervalle de la classe centrale est de 1% de l'échelle comme intervalle

On voit clairement ici que cet écart contient les 100% des points expérimentaux. On peut donc le minimiser manuellement en écrivant dans le champ texte⁷ blanc pour déterminer l'écart le plus petit qui distribue le plus normalement possible les points expérimentaux de part et d'autre de la parabole (voir la figure 37). Par essais et erreurs, on obtient un écart de 0.00195%.

⁷ Il faut écrire dans le champ texte puis taper sur entrée.

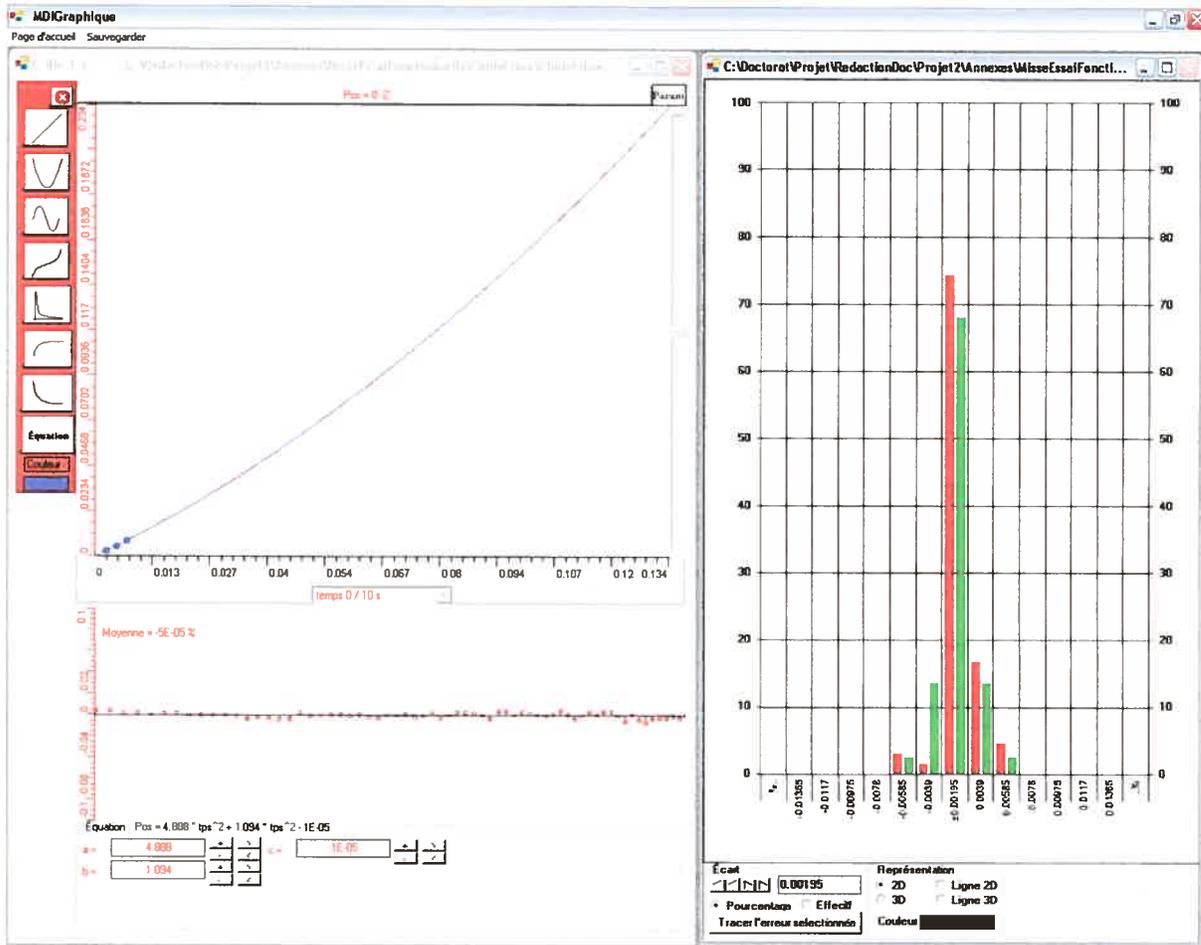


Figure 37: Représentation de la distribution des écarts entre la fonction parabolique et les données expérimentales de la chute libre dont l'intervalle de la classe centrale à 0.00195% de l'échelle comme intervalle

On observe que les points se distribuent plus à droite qu'à gauche. On pourrait donc essayer de décaler vers zéro la droite des écarts donc les minimiser afin d'obtenir la distribution la plus normale possible. Ainsi, on obtient $pos = 4.8883 \cdot tps^2 + 1.093958 \cdot tps + -7E-06$ avec une erreur-type de 0.00195% de l'échelle de l'ordonnée (Voir figure 38), soit $9 \cdot 10^{-6}$ m.

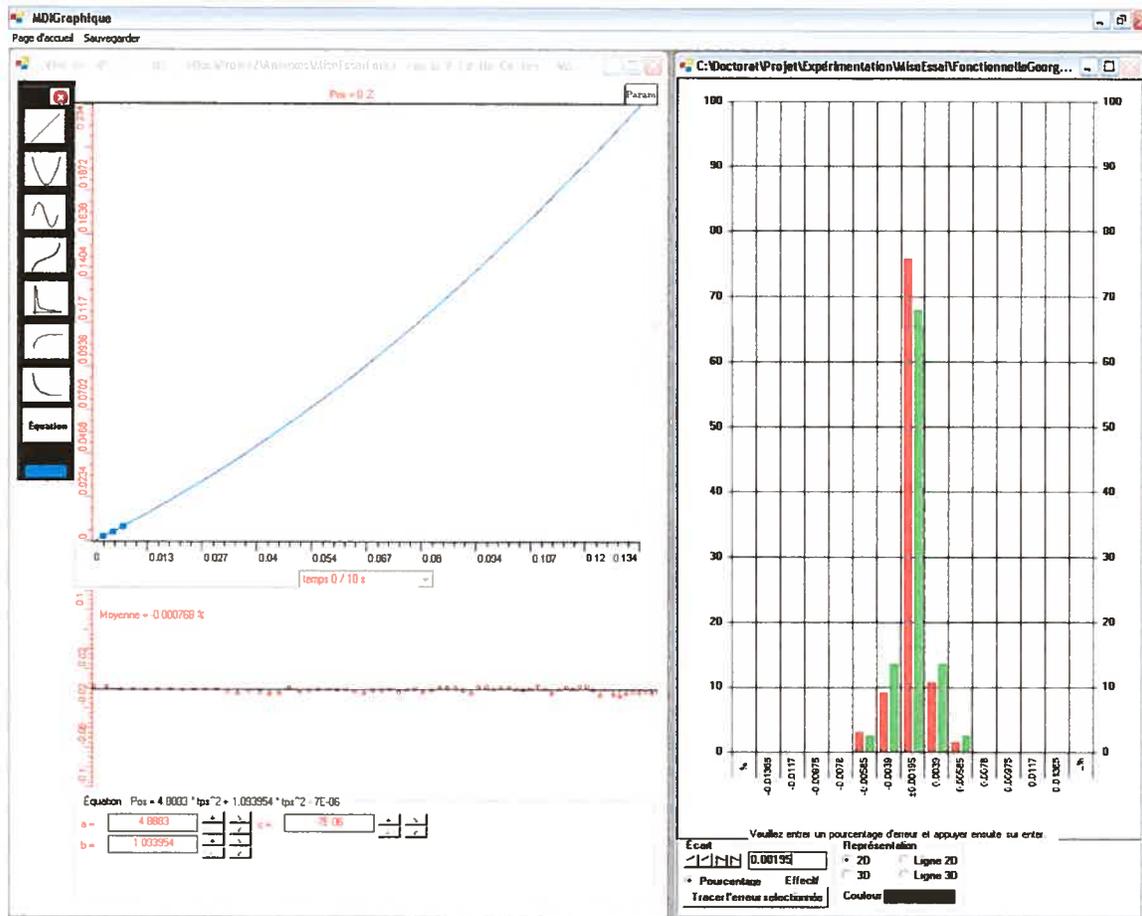


Figure 38: Résultat final de la Modélisation algébrique de la chute libre en déterminant l'incertitude sur la prédiction avec le modèle trouvé (erreur-type)

Notons que nous pouvons généraliser le processus itératif en trois étapes utilisé dans cet exemple sur toutes les fonctions polynomiales. Cependant, dans le cas des fonctions polynomiales du troisième degré et plus, on doit commencer par éliminer d'abord les points d'inflexion de la fonction des écarts en agissant sur les paramètres de la fonction théorique. Prenons l'exemple de la fonction du troisième degré de type : $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$. Pour déterminer les coefficients a , b , c et d , on doit ajouter une étape aux trois étapes décrites précédemment. Cette étape est nécessaire pour déterminer a . Dans le cas de cette fonction, la fonction des écarts est aussi du troisième degré. Donc, la représentation graphique de cette dernière doit nécessairement contenir un point d'inflexion (point où la dérivée seconde est nulle). Ainsi, pour déterminer a , il suffit d'ajuster au fur et à mesure a pour éliminer ce point d'inflexion et obtenir une représentation des écarts de type parabolique. Pour déterminer ensuite les autres coefficients : b , c , et d , il suffit d'appliquer les trois étapes décrites

précédemment. Pour la fonction de quatrième degré, on doit éliminer en général deux points d'inflexion, ainsi de suite.

5.3.2.4 Modélisation algébrique de la chute libre avec la méthode des moindres carrés

Pour trouver la meilleure parabole, d'équation $y = ax^2 + bx + c$, qui passe par l'ensemble de points de n points, nous allons appliquer la méthode des moindres carrés sur une parabole dans Excel. On obtient : $a = 4.888$; $b = 1.094$; $c = -0.000007$.

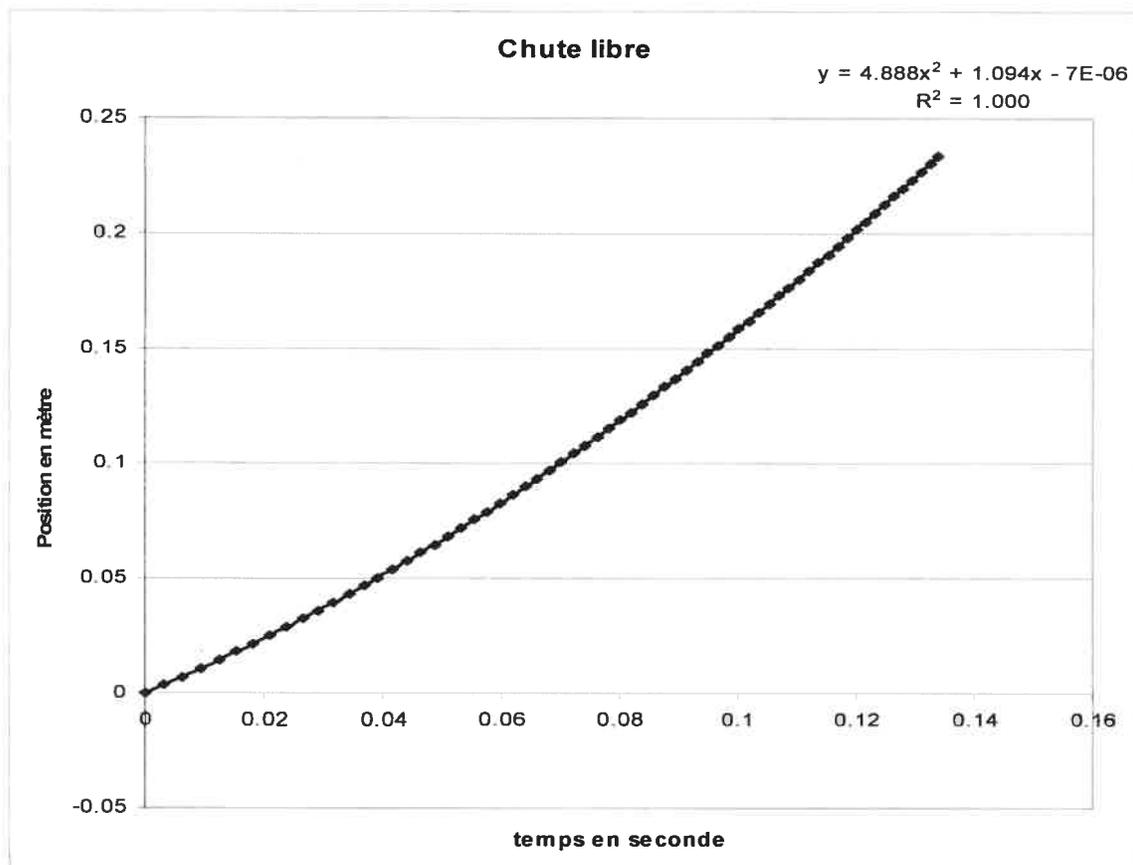


Figure 39: Modélisation algébrique dans Excel

5.3.2.5 Comparaison des deux méthodes (RGS et moindres carrés dans Excel)

On peut voir ici qu'avec la méthode RGS, on a obtenu des résultats identiques à ceux obtenus avec Excel pour évaluer les coefficients de l'équation. Par contre, nous n'avons pu ici évaluer l'erreur type (S_e) avec Excel comme nous l'avons fait avec la méthode RGS puisque le calcul de l'erreur type dans Excel ne s'applique que sur un modèle linéaire du premier degré.

$$S_e = S_y \sqrt{(1 - R^2) (n-1/n-3)}$$

5.3.3 Validation avec l'étude de la loi des gaz parfaits

On a choisi l'expérience de la loi des gaz parfaits pour pouvoir étudier le cas des fonctions rationnelles (rapport de deux fonctions polynomiales).

Pour effectuer l'expérience de la loi des gaz parfaits, nous allons utiliser une seringue graduée de 0 à 10 ml, un capteur de pression absolue de 0 à 150kPa, le microcontrôleur MicrolabExAO, et le logiciel MicrolabExAO. Notons que, dans cette expérience, selon le concepteur de MicrolabExAO, la précision des mesures telle que donnée par convertisseur analogique à numérique de 10 bits est de 1/1024, soit environ un millième de l'échelle de mesure du capteur.

5.3.3.1 Branchement du matériel à l'ordinateur

On reprend la procédure décrite dans le paragraphe 5.2.1.1 en branchant cette fois-ci le capteur de pression absolue au lieu du capteur de pression relative.

5.3.3.2 Préparation du logiciel

On commence par lancer le logiciel MicrolabExAO. Ce dernier doit détecter automatiquement le branchement du microcontrôleur et du capteur de pression absolue. Dans la fenêtre d'accueil du logiciel, on clique sur l'icône du capteur de pression absolue. Un menu déroulant s'affiche. Sur ce dernier, on clique sur «Étudier ce capteur en fonction d'une entrée manuelle». Une boîte de dialogue s'affichera pour inscrire les propriétés de la variable du volume de la seringue (nom: Volume, variable : V, unité : ml, minimum=0, maximum = 10ml). Ensuite, on clique sur ok pour afficher la fenêtre graphique.

5.3.3.3 Expérimentation et acquisition de données

Le matériel et le logiciel étant prêts, on peut commencer l'acquisition des données expérimentales. Pour ce faire, à chaque fois qu'on pousse le piston de la seringue de 2ml, on inscrit manuellement le volume correspondant dans le champ texte intitulé « Entrée manuelle » et on tape sur la touche entrée du clavier pour que le logiciel lise la pression de l'air correspondante et affiche le point graphique de coordonnées (Pression, Volume). Notons que, durant cette expérience, après chaque mesure, on a augmenté le volume de 2 ml. La température de l'air à l'intérieur de la seringue était égale à celle de pièce, soit 22°C.

Voici le résultat graphique de cette expérience avec le prototype dans la figure suivante :

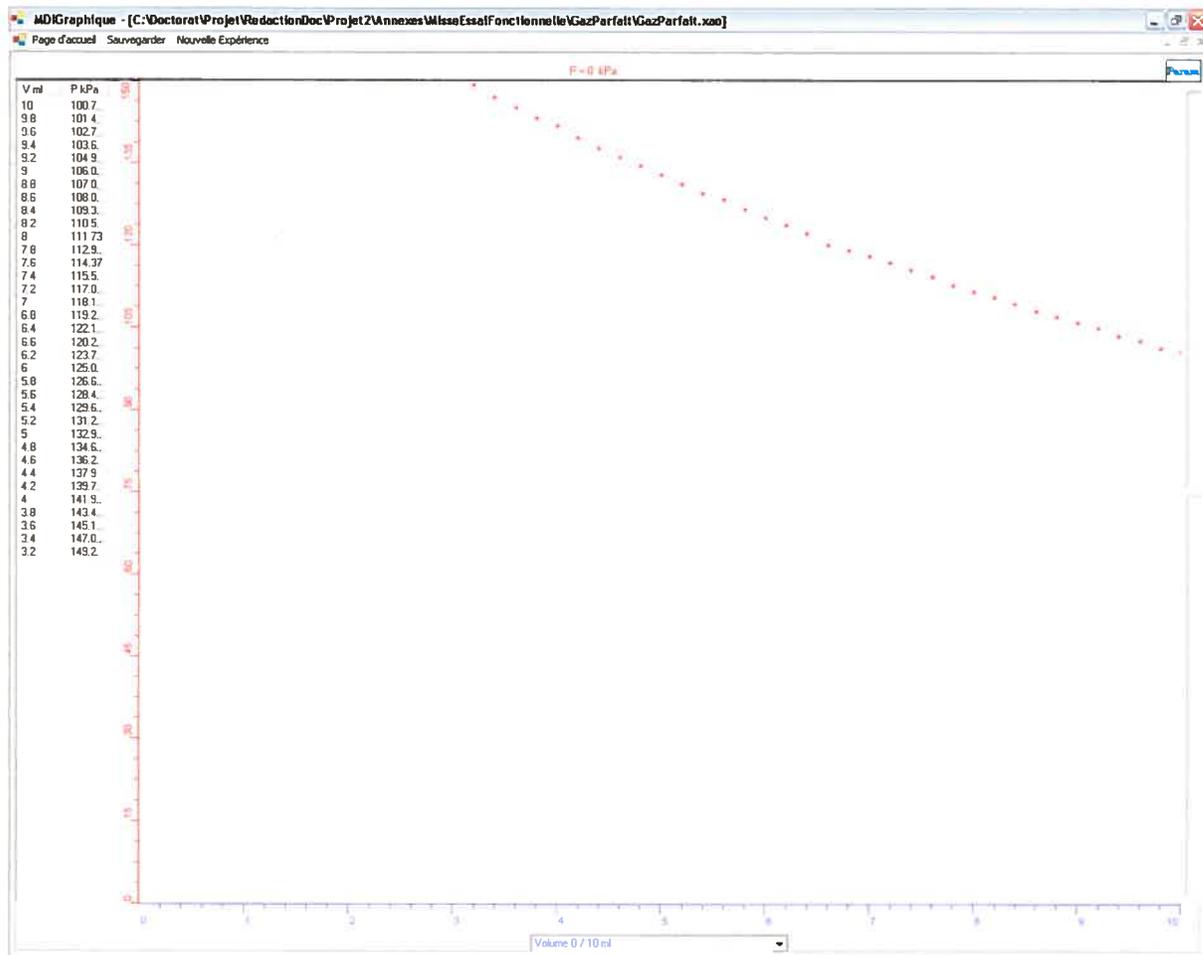


Figure 40: Représentation graphique des données expérimentales du phénomène de la loi des gaz parfait

5.3.3.4 Modélisation algébrique:

La relation algébrique de la loi des gaz parfaits est $P V = nRT$ (P est la pression en Pascal, V est le volume du gaz en m^3 , n est la quantité de matière en moles, $R = 8,314\ 472\ J/k/mol$ est la constante des gaz parfaits, T est la température absolue en degrés kelvin. La relation est donc de type $y = f(x) = a/x$, où $y = P$, $x = V$ et $a = nRT$. Dans le cas de cette expérience, le capteur de pression oscille sur un bit, donc sur un millième de l'échelle de ce dernier. On pourrait donc avoir un petit décalage sur la pression. Donc, pour mieux modéliser la courbe, on doit tenir compte dans l'équation algébrique d'une constante de décalage c . La relation devient alors $P = a/V + c$, où c sert à ajuster ce décalage si nécessaire. Notons aussi que durant l'acquisition des données, on a lu la valeur du volume enfermé dans la seringue. Donc, ce volume correspondait juste au volume de l'air qui se trouve à l'intérieur de la seringue selon la position du piston. Or, étant donné que la seringue était branchée via le tuyau du capteur, on devait, à chaque acquisition de donnée, ajouter à ce volume celui de l'air se trouvant à l'intérieur du tuyau. Pour rendre l'activité de modélisation algébrique plus intéressante, on a choisi de ne pas ajouter ce volume constant au volume de l'air à l'intérieur de la seringue durant l'acquisition de nos données. Ainsi, la relation algébrique de nos données expérimentales ici devra vérifier la relation suivante $P = nRT / (V+b) + c$, où b est le volume constant de l'air à l'intérieur du tuyau du capteur et c la constante de décalage. Étant donné que le produit nRT est un produit de trois facteurs constants, nous allons donc le noter a , d'où ce modèle algébrique

$$y = a / (x+b) + c.$$

5.3.3.5 Modélisation algébrique de la loi des gaz parfaits avec la méthode RGS

La meilleure fonction rationnelle du type $y = a/(x+b) + c$ sera celle qui minimise le plus possible les écarts entre elle et les points expérimentaux en les distribuant le plus normalement possible de part et d'autre de zéro. Voici les résultats avec la méthode RGS:

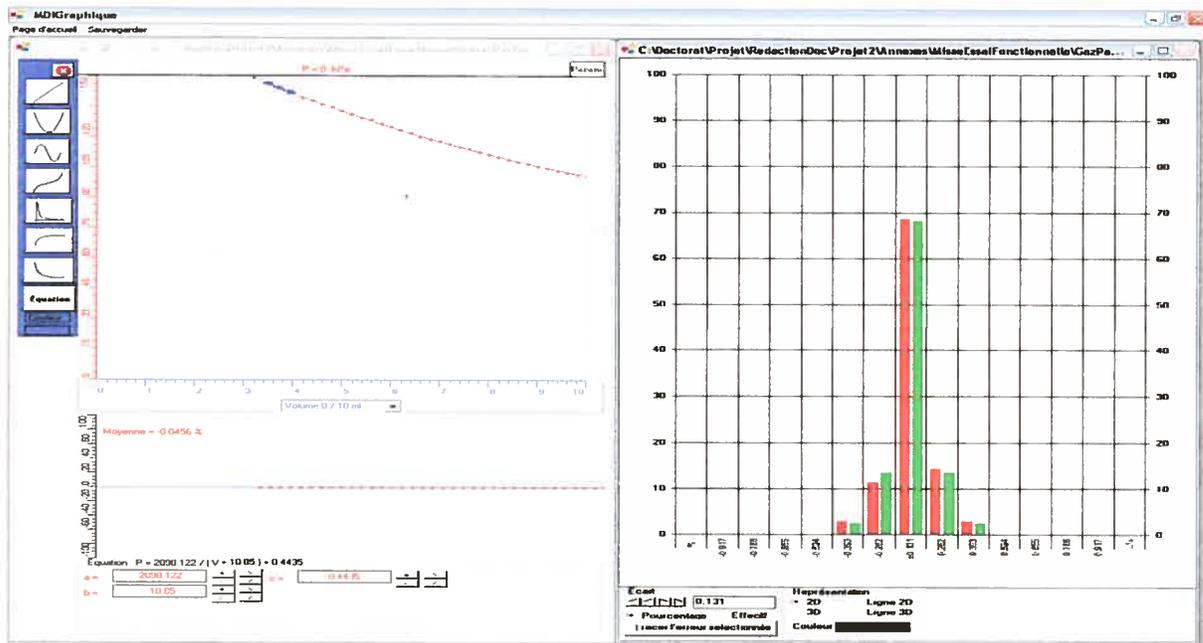


Figure 41: Résultat final de la modélisation algébrique des données expérimentales du phénomène de la loi des gaz parfaits avec la méthode RGS
La méthode RGS permet d'obtenir que, finalement, $P = 2098.122/(V+10.85) + 0.4435$ est la meilleure courbe. Elle nous donne aussi une estimation de l'erreur-type qui est de 0.131% de l'échelle des ordonnées, soit 0.196hPa.

5.3.3.6 Modélisation algébrique de la loi des gaz parfaits avec la méthode des moindres carrés

Pour trouver la meilleure équation rationnelle de type $y = a / (x+b) + c$ qui passe par cet ensemble de points donné, on ne peut pas appliquer la méthode des moindres carrés directement sur les fonctions rationnelles comme dans le cas des fonctions polynomiales. Pour ce faire, et contrairement à la méthode RGS, on doit faire un changement de variable convenable. Le seul changement qu'on peut faire dans ce cas est celui de poser $v = 1 / (V+b)$. La nouvelle relation recherchée sera de type linéaire : $P = a*v + c$. Cependant, pour pouvoir, effectuer ce changement de variable, on doit calculer v , donc on doit connaître à priori la valeur de b , celle du volume du tuyau. Ainsi, $b = nR^2h = 3.1416 * (1.5/1000)^2 * 1.54 = 10.85\text{ml}$ avec $R = 1.5 \text{ mm}$; $h = 1.5 \text{ m}$. On a transféré les données de cette expérience vers Excel (Voir Annexes \ MiseEssaiFonctionnelle \ GazParfait \ Donnée.xls), pour effectuer le changement de variable et de déterminer l'équation. Voici le graphique dans Excel avant le changement de variable:

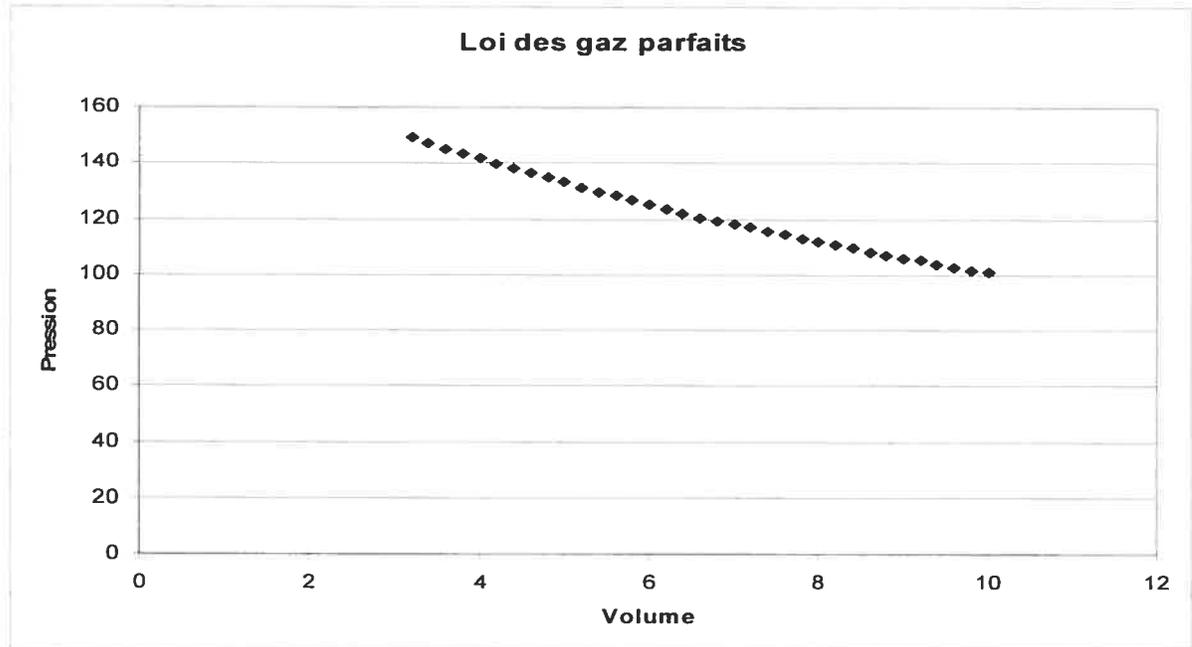


Figure 42: Données brutes du phénomène de la loi des gaz parfaits dans Excel

Voici, dans la figure 48, le nouveau graphique reflétant le changement de variable, $v = 1 / (V + 10.85)$

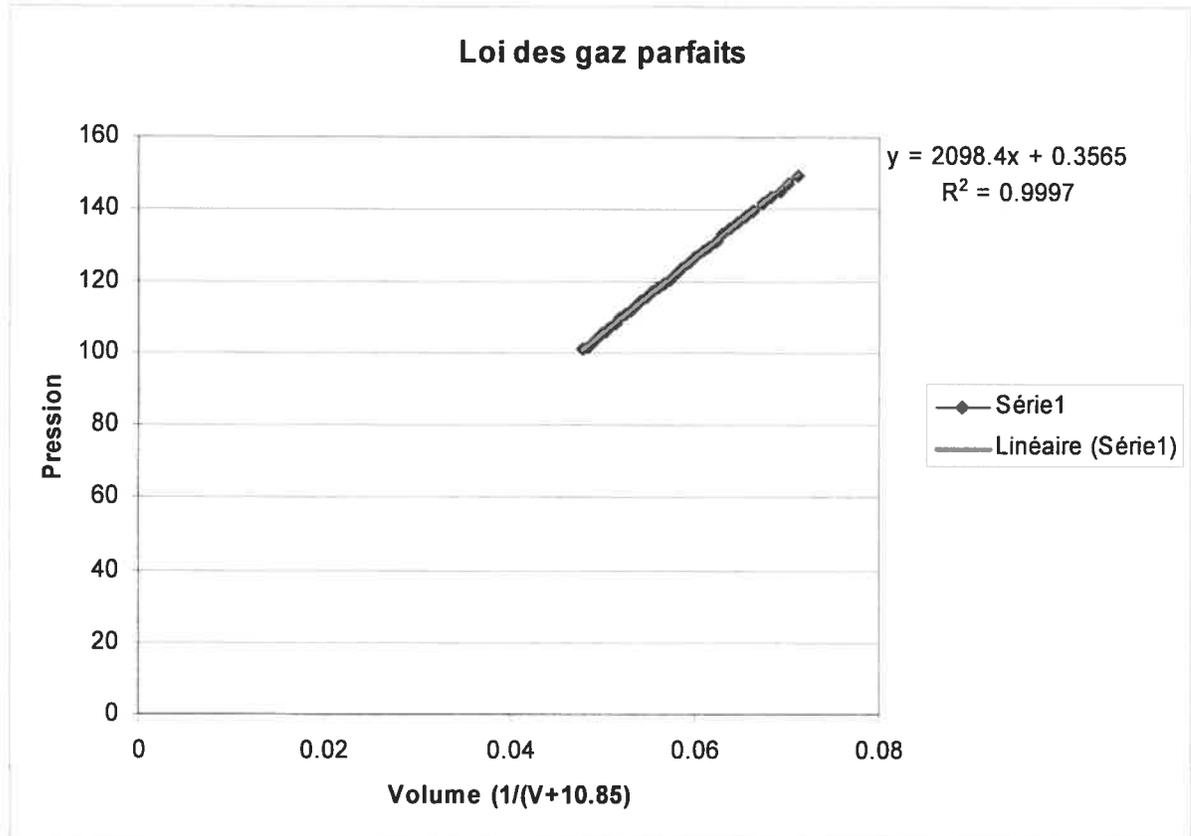


Figure 43: Changement de Variable et Modélisation dans Excel des données expérimentales de la loi des gaz parfaits

Excel nous donne que $P = 2098.4 / (V + 10.85) + 0.3565$

5.3.3.7 Comparaison des résultats des deux méthodes

On peut voir que les deux méthodes nous donnent des résultats semblables. Cependant, l'approche RGS a l'avantage de l'universalité et de la visualité alors qu'Excel doit non seulement procéder à un changement de variable, mais de plus il doit calculer à priori le volume du tuyau ce qui n'est pas nécessaire avec la méthode RGS. Par contre, avec la fonction «Solveur», qui minimise directement sur le critère de notre choix (par exemple : les écarts carrés maximum ou absolus), on pourrait, sans calculer ce volume à priori, effectuer ces calculs directement mais de manière encore plus aveugle qu'avec Excel de base.

5.3.4 Validation avec l'étude de la décharge d'un condensateur

On a choisi l'expérience de la décharge d'un condensateur pour pouvoir étudier le cas des fonctions exponentielles. Pour effectuer cette expérience, nous allons utiliser une alimentation de 12 volts, un capteur de voltage de 0 à 15V, un capteur d'Ampèremètre de ± 20 mA, d'un condensateur de 1000 MF et d'une résistance de $2k\Omega$.

5.3.4.1 Branchement du matériel à l'ordinateur

On alimente le microcontrôleur par une alimentation de 12V. Ensuite, on le branche à travers le port série ou le port USB à l'ordinateur. Par la suite, on branche le capteur de voltage et du courant dans le microcontrôleur. On prépare ensuite le circuit électrique.

5.3.4.2 Préparation du logiciel

On lance le logiciel MicrolabExAO. Ce dernier doit détecter le microcontrôleur et les capteurs de voltage et de courant. Dans la fenêtre d'accueil du logiciel, on clique dans la barre d'outils sur le bouton graphique. Dans la fenêtre graphique, on clique sur l'étiquette «param» pour paramétrer l'expérience. On prend 200 mesures (points expérimentaux), soit une durée de l'expérience de 20s à raison d'un échantillon à chaque 0.15.

5.3.4.3 Expérimentation et acquisition de données de la décharge d'un condensateur

Une fois le circuit, le matériel et le logiciel prêts, on commence l'acquisition des données expérimentales en cliquant sur le bouton « Acquisition».

Voici le résultat graphique de cette expérience avec le prototype, dans la figure suivante:

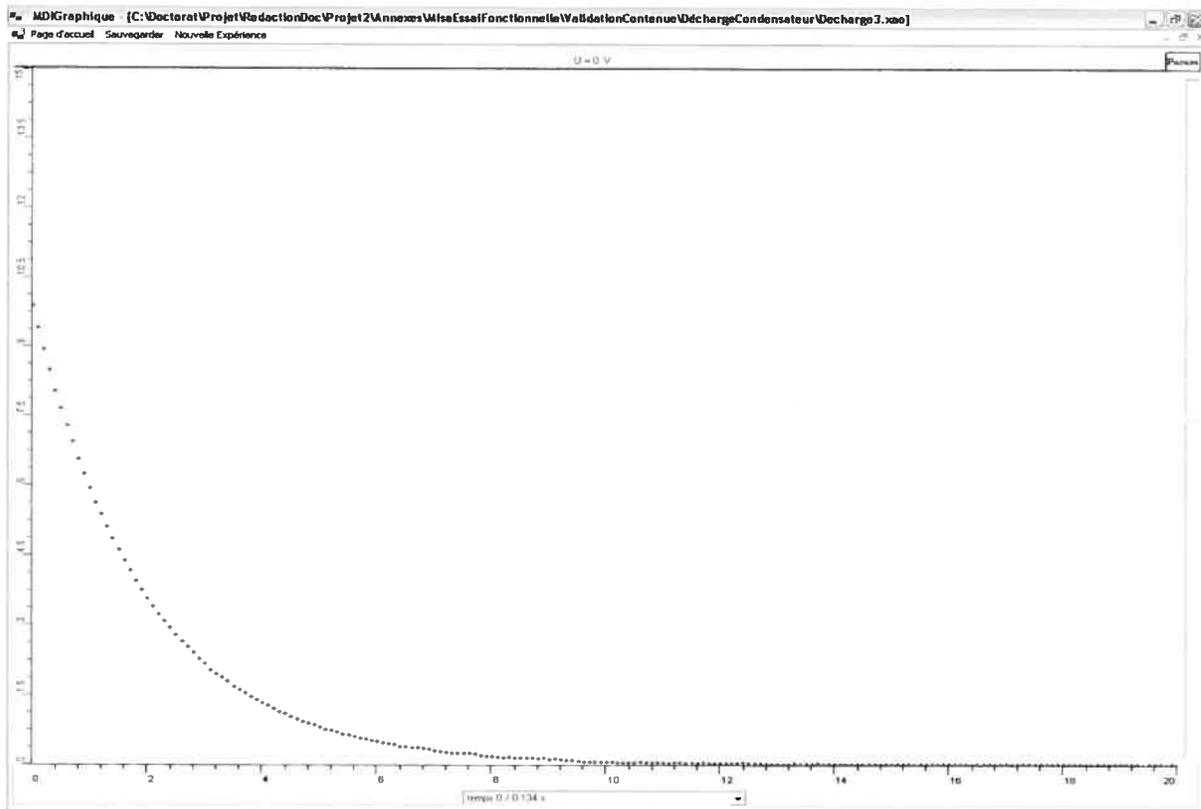


Figure 44: Représentation graphique des données expérimentales du phénomène de la décharge du condensateur

5.3.4.4 Modélisation algébrique

La relation algébrique de la tension en fonction du temps de la décharge d'un condensateur est de la forme $U = A * e^{-t/RC}$ (A est le voltage maximal initial du condensateur, C est la valeur du condensateur en Farad et R la valeur de la résistance en Ohms). Ainsi, pour trouver l'équation algébrique de nos données expérimentales, il s'agit de modéliser algébriquement avec la meilleure fonction exponentielle décroissante passant par l'ensemble de ces points expérimentaux. C'est-à-dire qu'il faut trouver les valeurs de A et RC correspondantes, RC étant considéré ici comme un facteur composite indissociable.

5.3.4.5 Modélisation algébrique de la décharge du condensateur avec la méthode RGS

Pour trouver la meilleure équation exponentielle qui passe par l'ensemble de nos points expérimentaux, on n'a pas besoin de faire un changement de variable tel que dans le cas de la méthode des moindres carrés discutée au paragraphe précédent. On n'a surtout pas besoin d'exclure les points qui tendent vers l'asymptote de la fonction. Ainsi, la méthode RGS,

comme pour les cas des fonctions polynomiales et rationnelles, s'applique directement sur les données expérimentales. Voici le résultat de la modélisation algébrique :

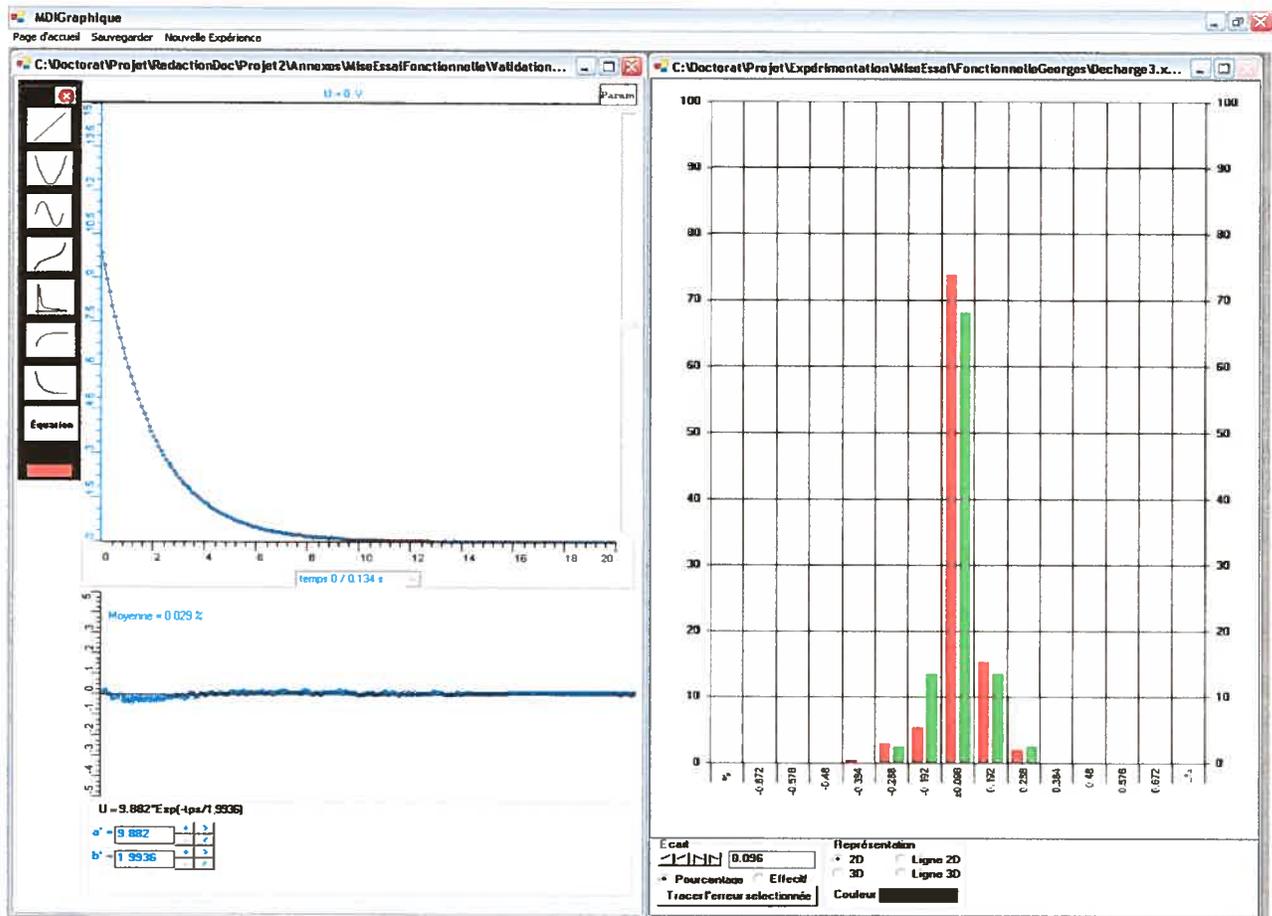


Figure 45: Modélisation algébrique des données expérimentales de la décharge du condensateur avec la méthode RGS

5.3.4.6 Modélisation algébrique de la décharge du condensateur la méthode des moindres carrés

Comme dans le cas des fonctions rationnelles, on ne peut pas appliquer sur une fonction exponentielle la méthode des moindres carrés sur nos données expérimentales⁸ directement, on doit d'abord faire un changement de variable. En passant à l'écriture logarithmique, on obtient :

$$u = \text{Log}(U) = \log(A * e^{-t/RC}) = \log(A) + \log(e^{-t/RC}) = \log(A) - t/RC.$$

⁸ Il existe cependant des méthodes de minimisation sophistiquées inaccessibles aux élèves et relativement peu connues même dans le monde scientifique.

Étant donnée que A, R, et C sont des constantes, on peut dire que la relation théorique entre les deux variables u et t est une relation linéaire de type $y = f(x) = a x + b$ ou $y = u$, $a = -1/RC$, $b = \log(A)$, $x = t$. En Appliquant la méthode des moindres carrés sur cette relation, on peut ainsi trouver les valeurs a et b. Ensuite, on peut déduire les valeurs $A = e^b$, $RC = -1/a$ ainsi que la meilleure fonction exponentielle décroissante passant par l'ensemble des points expérimentaux.

Nous allons maintenant transférer ces données vers Excel afin de déterminer la meilleure fonction exponentielle qui passe par l'ensemble des points expérimentaux (voir annexe MiseEssaiFonctionnelle \ données.xls).

Notons que lorsqu'on a transféré les données vers Excel, on peut, en cliquant sur Assistance graphique, demander directement la meilleure courbe exponentielle qui passe par l'ensemble des points expérimentaux. Voici le résultat donné par Excel.

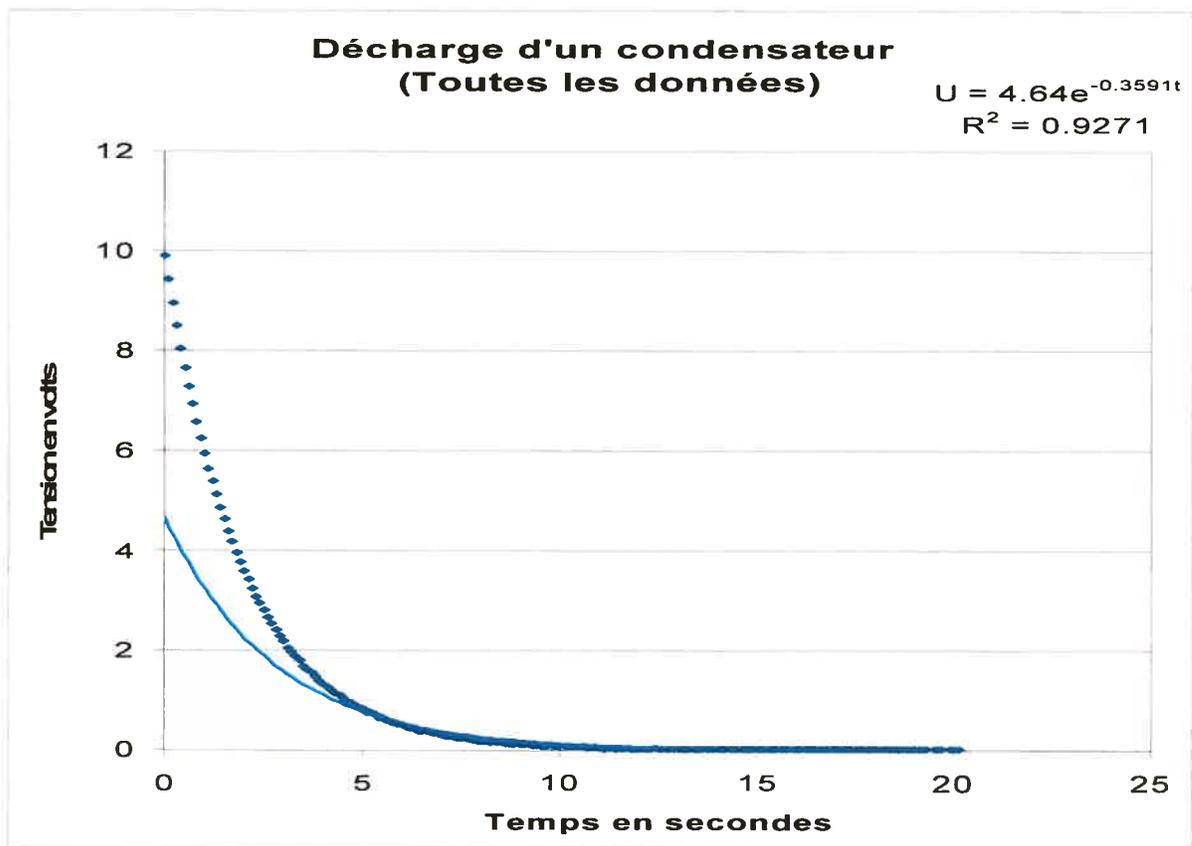


Figure 46: Résultat de la modélisation algébrique par Excel des données expérimentales de la décharge d'un condensateur

5.3.4.7 Comparaison des résultats des deux méthodes

Visuellement, et comme les deux schémas nous l'indiquent, la fonction exponentielle trouvée par Excel, représentée par la courbe bleue, s'ajuste moins bien que celle trouvée avec la méthode RGS. Ceci nous montre que l'algorithme utilisé automatiquement par Excel n'a vraiment pas réussi à trouver la meilleure courbe exponentielle décroissante qui passe par l'ensemble de ses points expérimentaux.

Théoriquement la valeur de A doit être égale à 10V et la valeur $RC = 2$. Or, avec Excel, on retrouve pour A, une valeur de 4.64V et pour RC une valeur de $1/0.3591 = 2.78$, tandis que qu'avec la méthode RGS, on retrouve pour A une valeur 9.882V et pour $RC = 1.99$. Ceci nous montre que la relation algébrique trouvée avec la méthode RGS modélise mieux ici le phénomène à l'étude. Pour mieux comprendre et interpréter le résultat étonnant donné par Excel, nous avons décidé d'effectuer étape par étape la méthode du changement de variables décrite précédemment. Pour ce faire, nous avons d'abord calculé u (le logarithme népérien de la tension aux bornes du condensateur). Ensuite nous avons affiché le graphique de la relation de u en fonction du temps. Théoriquement, on doit avoir une droite linéaire. Pratiquement, voici le résultat obtenu dans Excel après ce changement de variable:

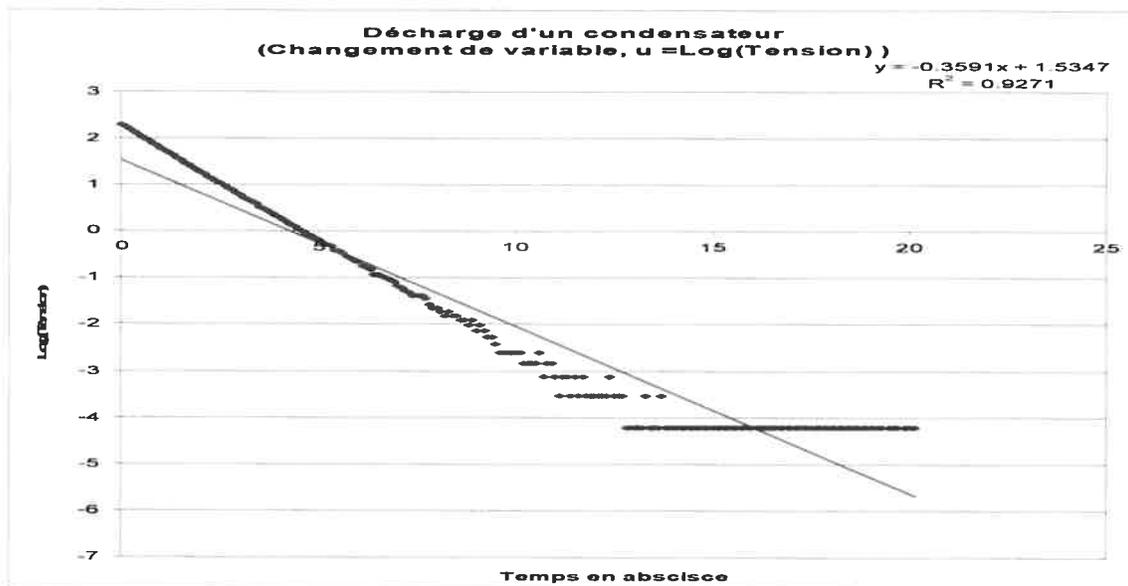


Figure 47: Changement de variable et régression linéaire pour modéliser la décharge du condensateur dans Excel. En observant ce graphique, on remarque que l'ensemble de la courbe obtenue ne ressemble pas du tout à une droite. Afin de mieux comprendre comment Excel a obtenu l'équation, $U =$

$4.64 * e^{-0.3591t}$, nous avons effectué une régression linéaire sur cet ensemble de points (Courbe bleue). Voici le résultat de la régression linéaire : $y = -0.3591t + 1.5347$ (Figure 47) qu'on a obtenue dans Excel. Nous remarquons ainsi que la constante de l'équation de la droite 1.5347 est égale à $\log(4.64)$ et que le coefficient directeur de la droite correspond bien à la constante de l'exposant de e dans l'équation exponentielle. Ceci nous montre que l'algorithme utilisé dans Excel est bien celui de la méthode de changement de variable tel que discuté précédemment. On peut maintenant comprendre pourquoi Excel n'a pas pu trouver la fonction qui s'ajuste le mieux à nos points expérimentaux. En effet, après avoir effectué le changement de variable, et à cause de l'incertitude de mesure, on n'a pas pu avoir une droite linéaire surtout pour les points qui tendent vers l'asymptote de la fonction exponentielle, donc les points dont l'ordonnée tend vers zéro. Ainsi, pour mieux ajuster la fonction exponentielle, on est obligé non seulement de faire un changement de variable mais aussi d'enlever ces points, c'est-à-dire ceux qui forment des segments parallèles dans la figure n°47. Voici donc le nouveau résultat obtenu dans Excel :

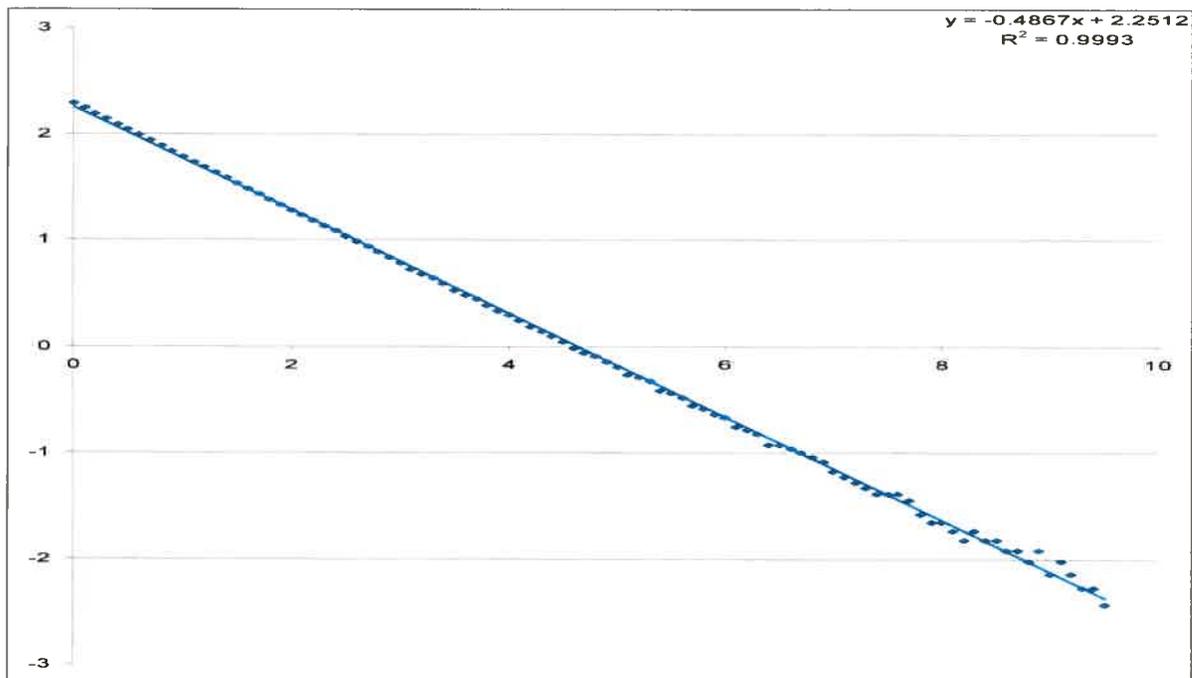


Figure 48: Modélisation algébrique de la décharge du condensateur dans Excel en éliminant les points qui tendent vers l'asymptote

De l'équation linéaire obtenue, $u = -0.4867t + 2.2512$, on peut déduire les constantes de l'équation $U = A * e^{-t/RC}$; $A = e^{2.2512} = 9.4495$ et $1/RC = -0.4867$ donc $RC = 2.05$.

Avec ces nouvelles valeurs de A et RC, on peut visualiser dans le graphique suivant que la nouvelle fonction exponentielle s'ajuste mieux sur les données expérimentales que celle trouvée avec Excel précédemment.

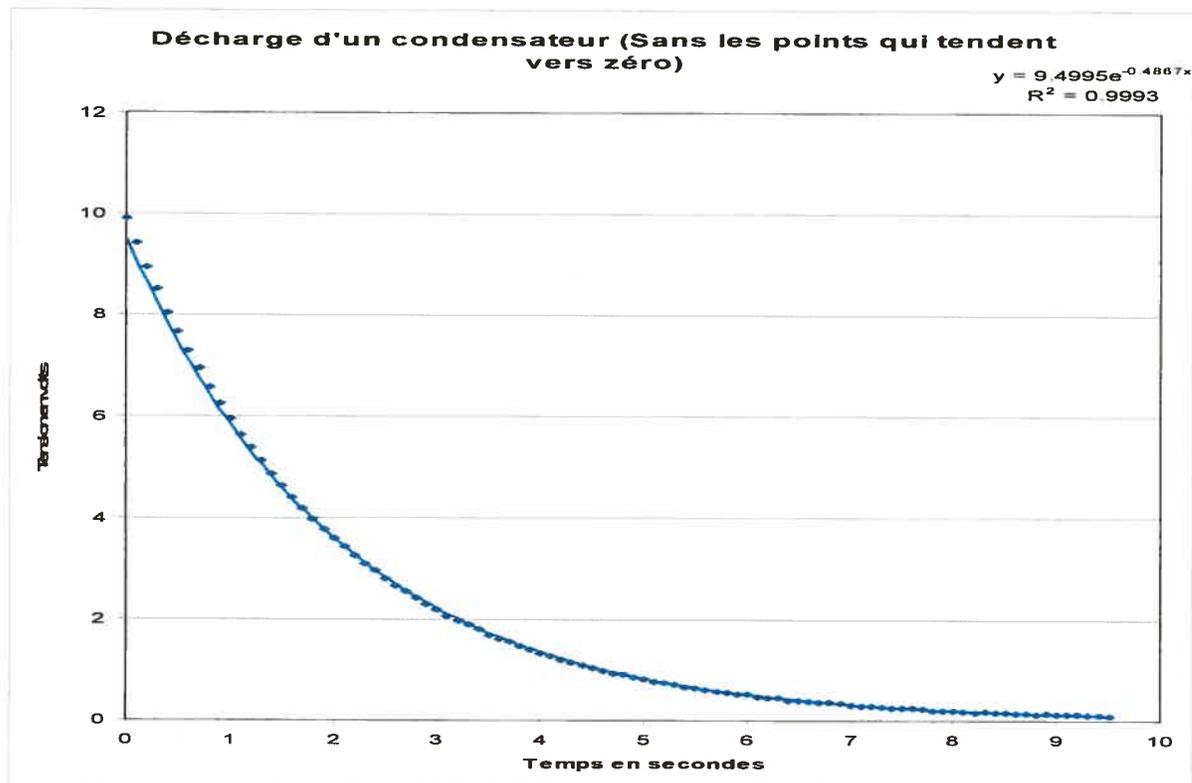


Figure 49: Résultat final de la modélisation algébrique des données expérimentales de la décharge du condensateur après l'élimination des points qui tendent vers l'asymptote

Si on compare les valeurs de A obtenues par les deux méthodes, on remarque qu'avec la méthode RGS, on trouve une valeur de 9.882V plus proche de la valeur théorique de 10V que celle trouvée avec Excel (9.449V), même après avoir supprimé les points dont l'ordonnée tend vers zéro. Si on compare les valeurs de RC obtenues par les deux méthodes, on remarque qu'elles sont équivalentes. Notons ici que les résultats obtenus avec Excel ont nécessité beaucoup de travail d'analyse et que pour les obtenir, nous avons dû effectuer une transformation de variable et supprimer des données de manière exceptionnelle alors que les résultats obtenus avec la méthode RGS ont été directs en utilisant la même méthode que pour les fonctions polynomiales.

5.3.5 Validation avec l'étude du mouvement pendulaire oscillatoire avec un amortissement visqueux

On a choisi l'expérience du mouvement pendulaire avec un amortissement visqueux pour pouvoir étudier le cas des fonctions sinusoïdales, en particulier les fonctions sinusoïdales amorties. Pour effectuer cette expérience, nous allons utiliser le capteur «pendule» et un morceau de plastique rectangulaire qui sert à créer un amortissement visqueux.

5.3.5.1 Branchement du matériel à l'ordinateur

On alimente le microcontrôleur par une alimentation de 12V. Ensuite, on le branche à travers le port série ou le port USB à l'ordinateur. Par la suite, on branche le capteur «pendule» dans le microcontrôleur.

5.3.5.2 Préparation du logiciel

On lance le logiciel MicrolabExAO. Le logiciel doit détecter le microcontrôleur et le capteur «pendule». Dans la fenêtre d'accueil du logiciel, on clique sur le bouton graphique. Dans la fenêtre graphique, on clique sur l'étiquette «param» pour paramétrer l'expérience. On prend 500 mesures (points expérimentaux), une à chaque 10 ms. La durée totale de l'expérience est 5 secondes.

5.3.5.3 Expérimentation et acquisition de données

Une fois le matériel et le logiciel prêts, on commence l'acquisition des données expérimentales en cliquant sur le bouton « Acquisition».

Voici le résultat graphique de cette expérience avec le prototype, dans la figure suivante:

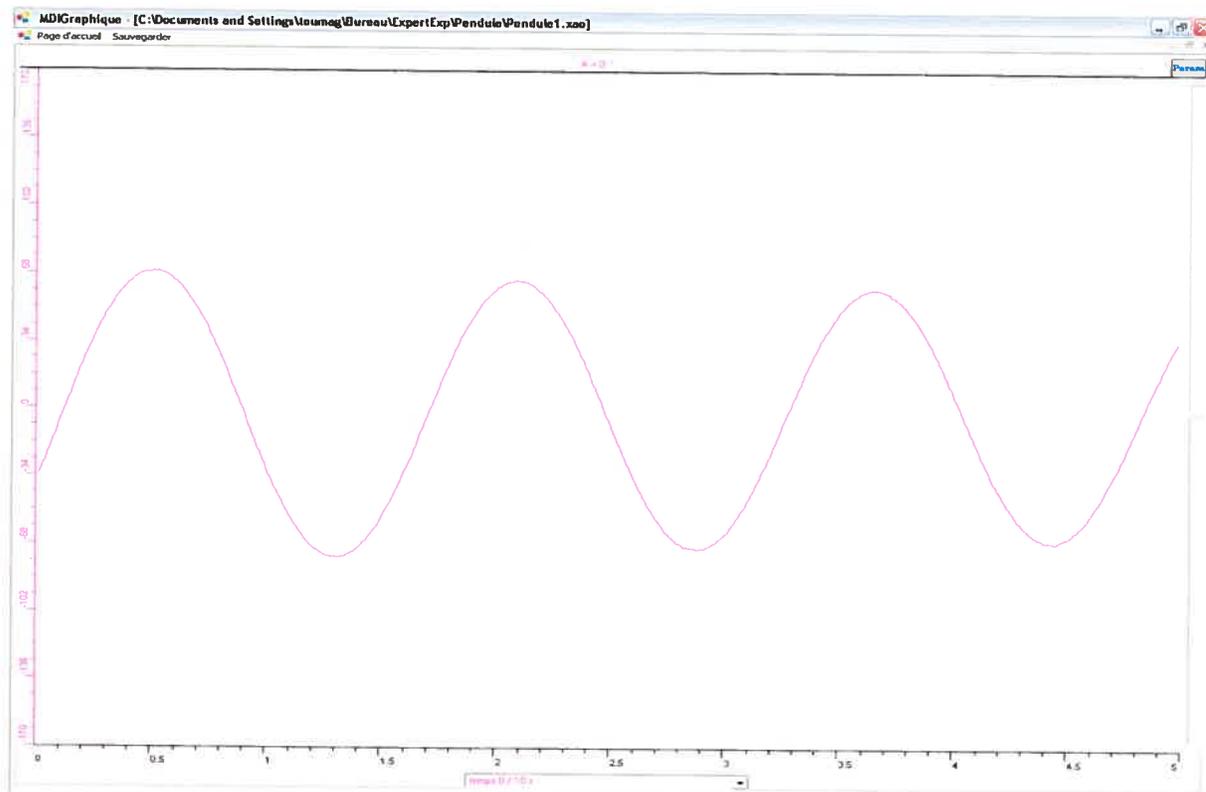


Figure 50: Représentation graphique des données expérimentales du mouvement pendulaire avec un amortissement visqueux

5.3.5.4 Modélisation algébrique

La relation algébrique de ce mouvement pendulaire oscillatoire avec un amortissement visqueux est de la forme $A = a * e^{-t/b} * \sin (c*t + d) + e$ où a est l'amplitude, c est la pulsation, d est le déphasage, e une constante de décalage. Notons qu'aucun changement de variable ne peut être appliqué sur cette fonction pour la transformer en fonction polynomiale et appliquer ensuite la solution des moindres carrés par équations normales. Cependant, la modélisation algébrique de cette fonction peut être réalisée par plusieurs algorithmes itératifs dont celui de Newton et Marquadt. Ces algorithmes sont de niveau universitaire. Notons qu'il ne s'agit pas, dans cette thèse, de discuter et d'aborder ces méthodes. Par contre, et étant donné qu'Excel ne peut pas modéliser ce type de fonctions, nous allons utiliser le logiciel Régressi⁹ pour modéliser nos données expérimentales afin de pouvoir comparer le résultat de ce dernier avec le résultat donné avec la méthode RGS.

⁹ Régressi a gagné le Prix du ministère de l'éducation Français

5.3.5.5 Modélisation algébrique du mouvement pendulaire avec un frottement visqueux avec la méthode RGS

Contrairement à la méthode des moindres carrés, la méthode RGS est toujours applicable même sur les fonctions complexes sur lesquelles on ne peut pas effectuer les changements de variables nécessaires à l'application de la méthode des moindres carrés.

Pour modéliser nos données expérimentales avec le prototype, et pour faciliter l'application de la méthode RGS, nous allons passer par trois étapes:

Première étape:

Trouver de façon approximative, la fonction exponentielle qui passe par les sommets de la fonction sinusoïdale (Ce que les physiciens appellent l'enveloppe).

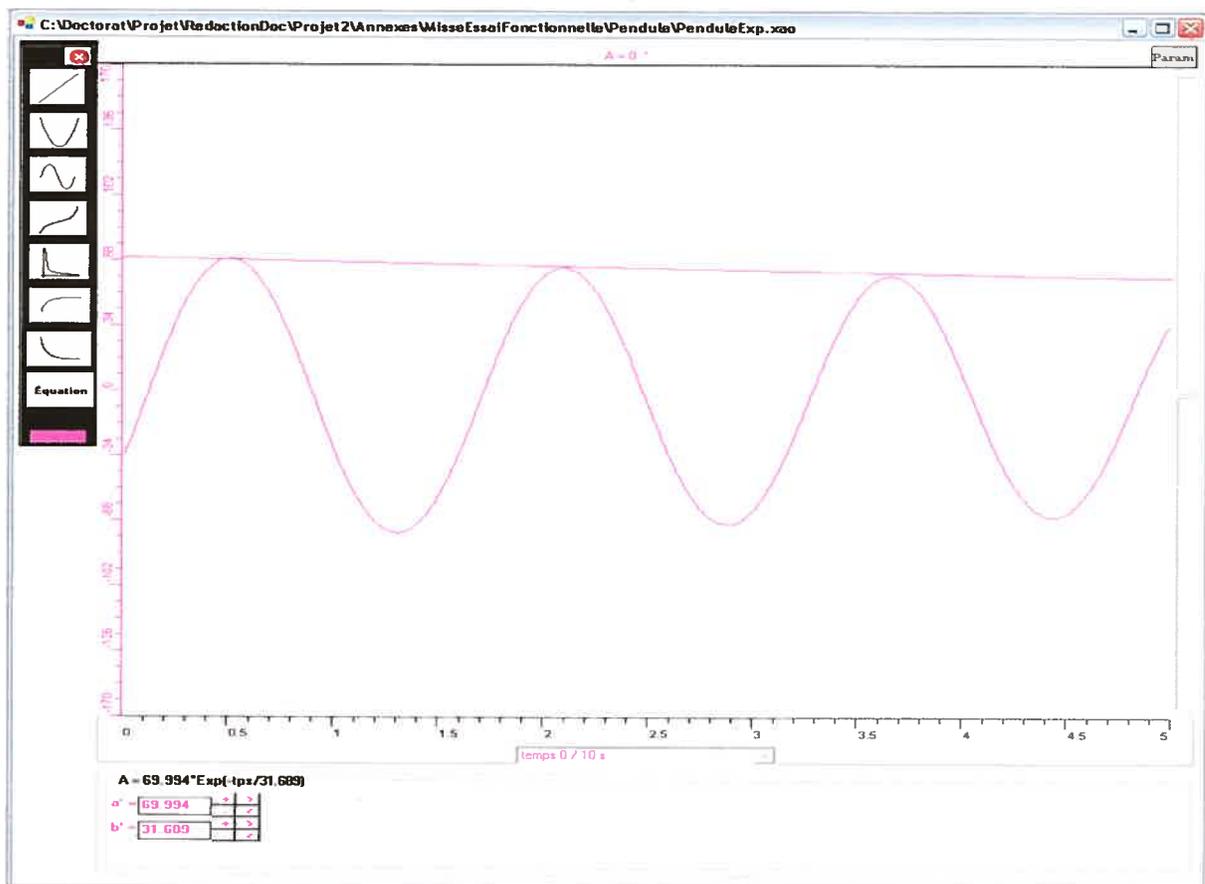


Figure 51: Ajustement visuel de la fonction exponentielle sur les sommets des données expérimentales du phénomène mouvement pendulaire avec frottement visqueux avec la méthode RGS.

Deuxième étape :

Trouver de façon approximative, la fonction sinusoïdale sans tenir compte de l'amortissement mais en tenant compte de son amplitude initiale.

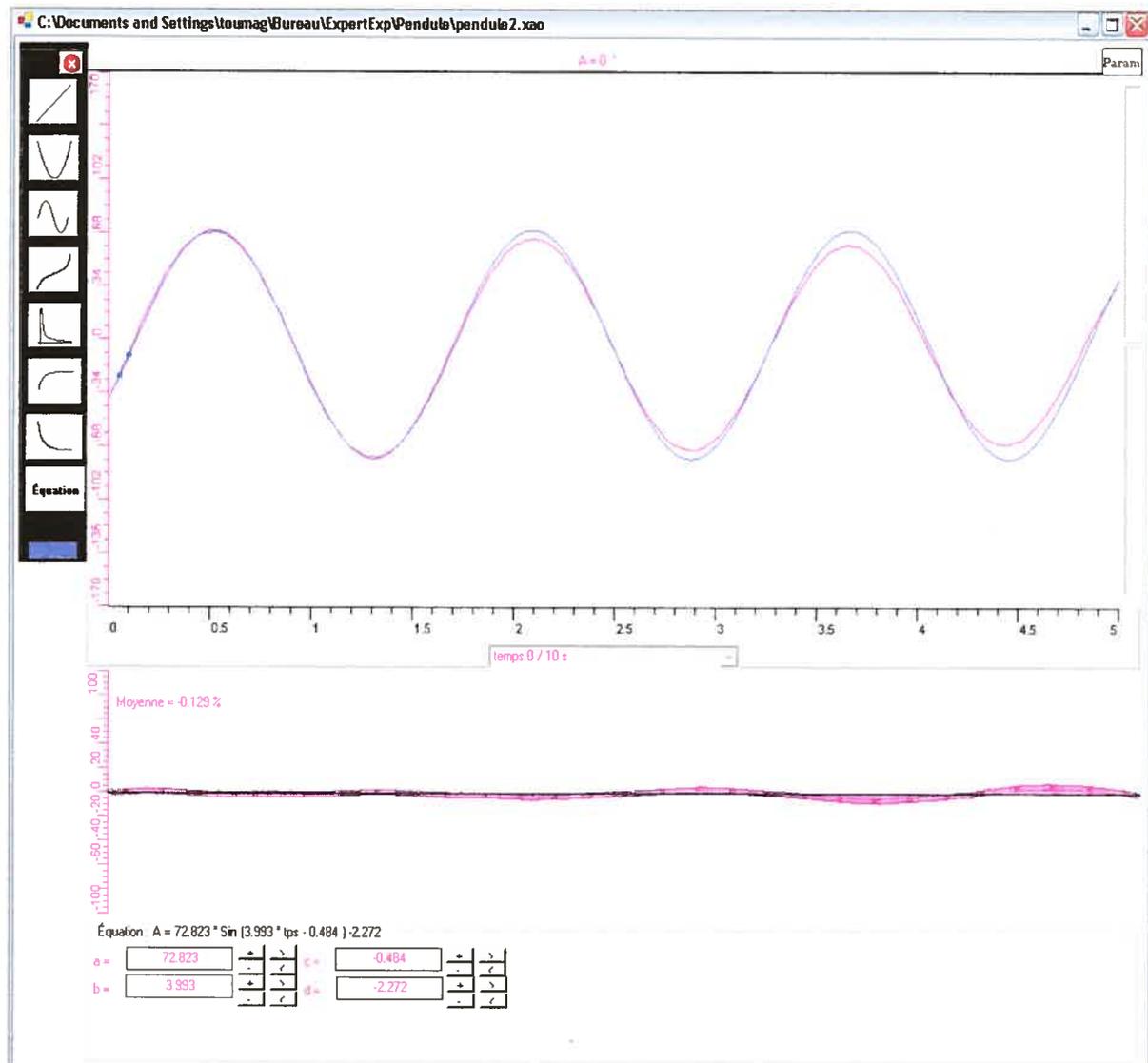


Figure 52: Ajustement visuel de la fonction sinusoïdale sur les données expérimentales en tenant compte seulement de la première amplitude avec la méthode RGS.

Troisième étape:

Pour tenir compte de l'amortissement progressif de l'amplitude, il suffit de multiplier la fonction sinusoïdale par la fonction exponentielle. Voici le résultat obtenu dans la figure 53:

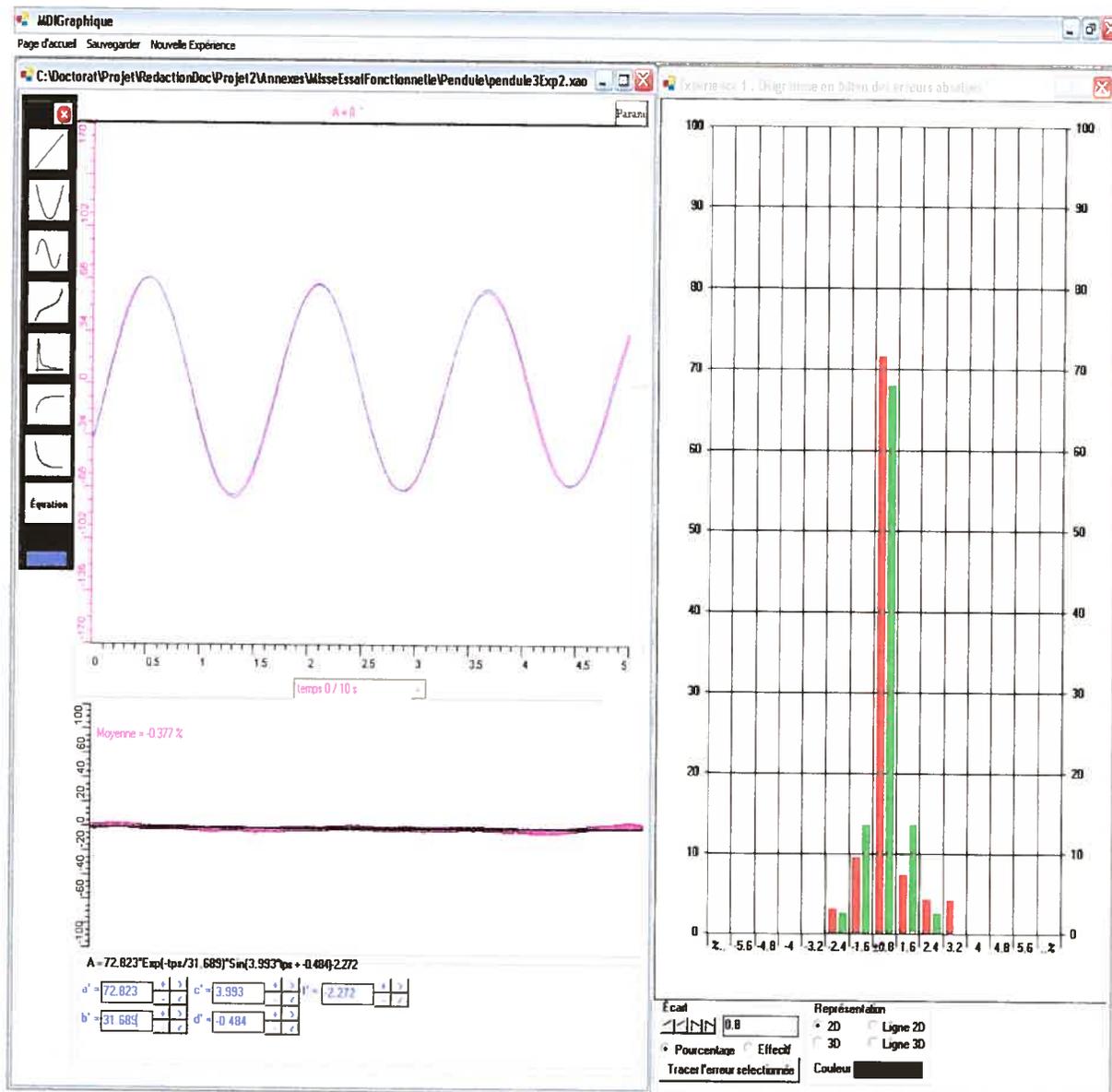


Figure 53: Modélisation avec la méthode RGS des données expérimentales du mouvement pendulaire avec un amortissement visqueux en multipliant la fonction exponentielle par la fonction sinusoïdale

Ainsi, la fonction obtenue est ajustable sur nos données expérimentales. Cependant, on peut remarquer que la distribution des écarts n'est pas tout à fait symétrique (normale). Ainsi, on peut encore ajuster la courbe pour que les points se distribuent le plus normalement possible de part et d'autre de la courbe bleue.

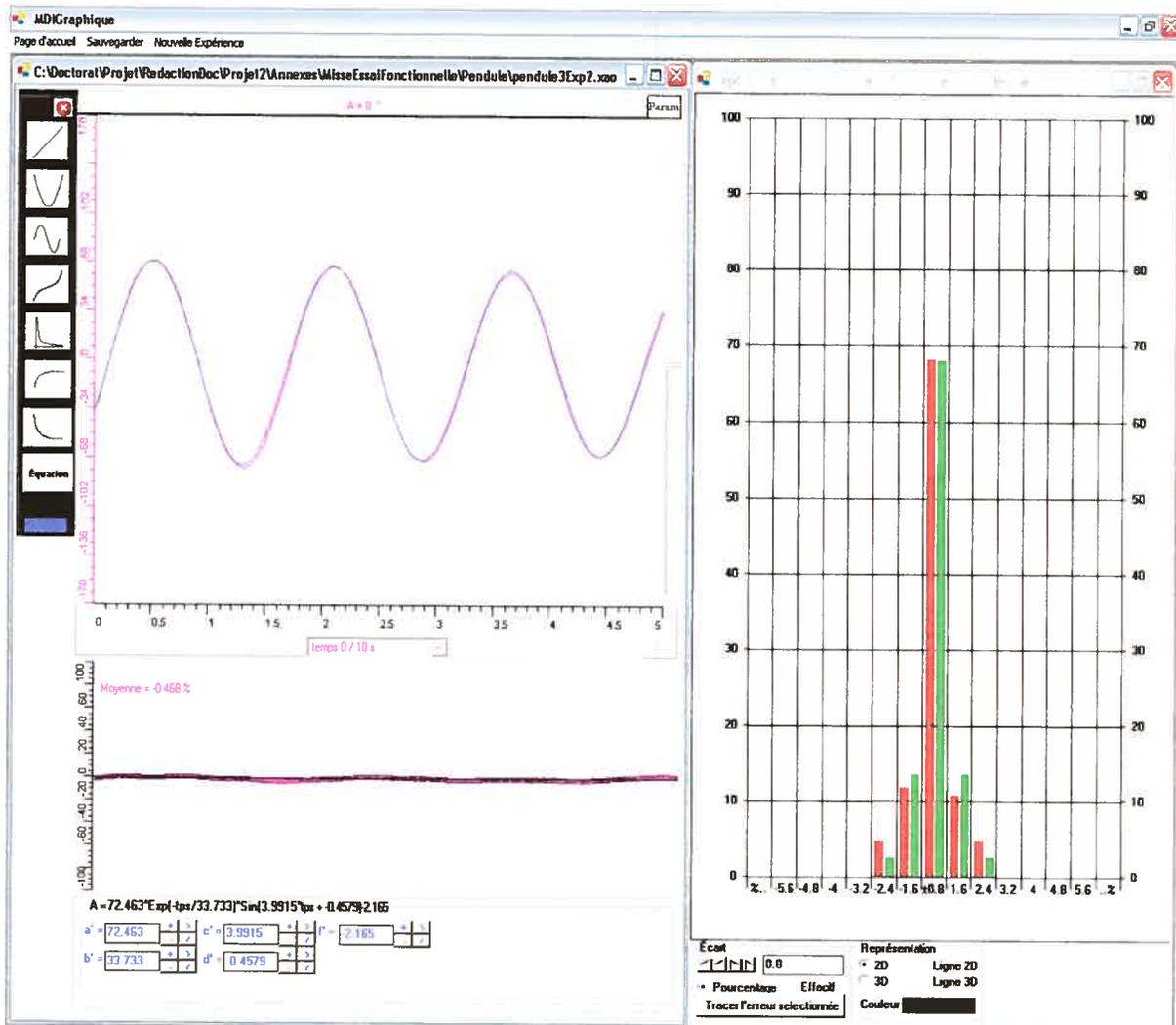


Figure 54: Résultat final de la modélisation algébrique avec la méthode RGS des données expérimentales du mouvement pendulaire avec un frottement visqueux en déterminant l'incertitude de mesures avec le modèle trouvé (Erreur-type)

5.3.5.6 Modélisation algébrique du mouvement pendulaire avec un frottement visqueux en utilisant le logiciel Régressi

Nous avons programmé le prototype de façon à pouvoir transférer automatiquement les données expérimentales vers Régressi. Ce dernier trouve automatiquement la meilleure fonction sinusoïdale amortie passant par l'ensemble de nos données expérimentales. Voici le résultat de la modélisation dans Régressi que nous avons obtenue.

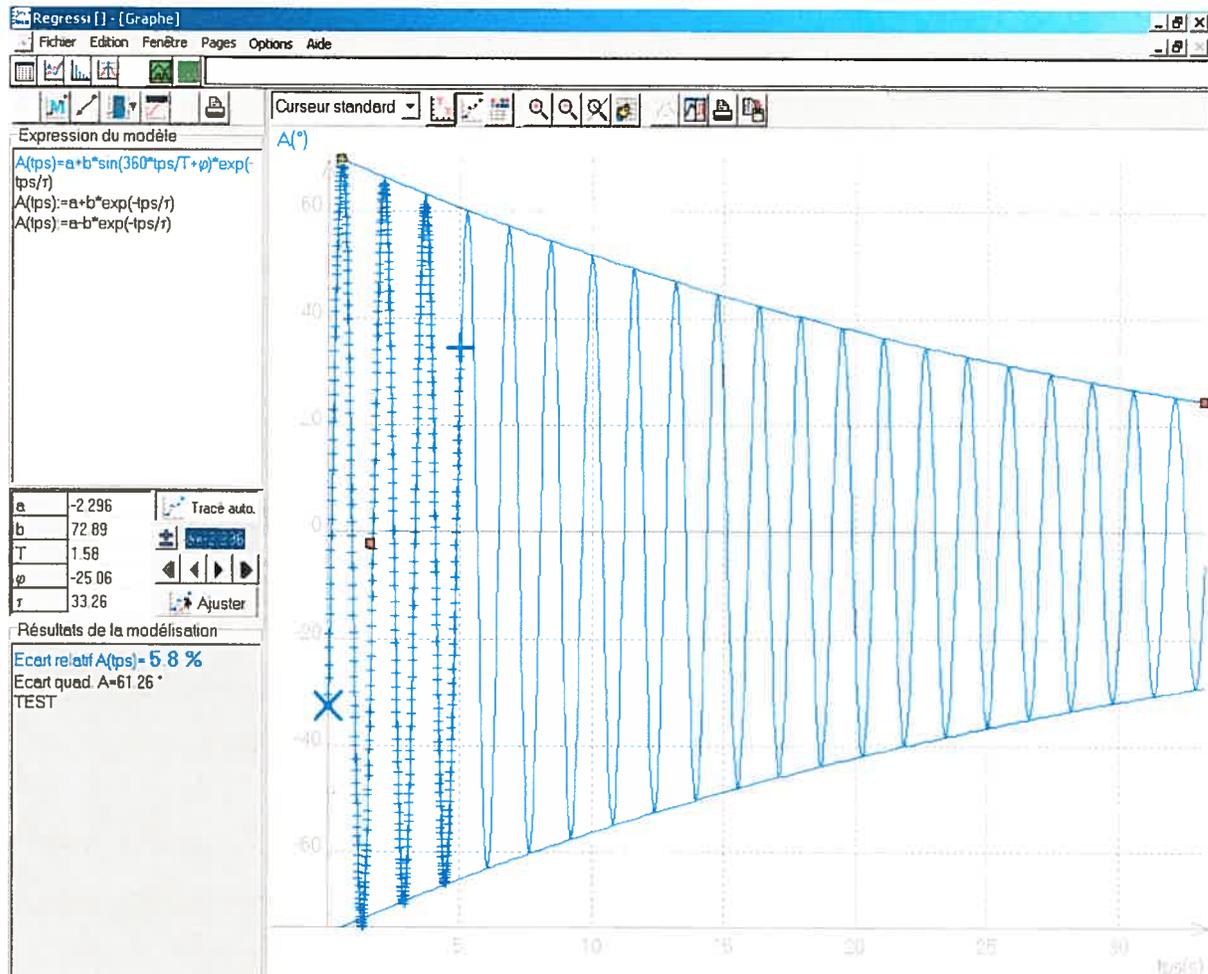


Figure 55: Résultat de la modélisation algébrique des données expérimentales du mouvement pendulaire avec un frottement visqueux en utilisant le logiciel Régressi

5.3.5.7 Comparaison des deux méthodes

Pour toute fin pratique, le résultat de la méthode utilisée dans Régressi est équivalent au résultat de la méthode RGS. Par contre, Régressi ne nous permet pas de rejeter les points singuliers avec un critère objectif ni d'évaluer une véritable incertitude sur les mesures.

5.4 Mise à l'essai fonctionnelle sur la conception didactique avec deux experts

Avant d'entreprendre la mise à l'essai empirique avec des enseignants et étudiants en milieu scolaire, nous avons décidé d'évaluer l'aspect pédagogique et didactique de la méthode RGS avec deux experts reconnus dans le domaine de la modélisation algébrique en sciences expérimentales. Le premier expert, Gilles Boisclair, est professeur de sciences, au cegep de Montmagny, et l'auteur de plusieurs livres sur les méthodes de régressions linéaires et non linéaires et sur le calcul d'incertitudes, au collégial. Le deuxième expert, Riopel M., est professeur de didactique à l'UQAM et ancien professeur en physique au collège Jean-de-Brébeuf de Montréal.

Le premier expert, en comparant la méthode RGS à la méthode des moindres carrés, nous révèle que la méthode RGS ne possède pas les défauts de la méthode des moindres carrés qui sont les suivants :

« Un premier défaut de la méthode des moindres carrés se situe au niveau pédagogique: nos élèves la voient comme une méthode magique qu'ils ne comprennent pas.

Son deuxième défaut se situe au niveau de ses capacités, elle ne peut servir qu'à déterminer une droite (fonction de type linéaire).»

Cet expert nous précise ensuite que, contrairement aux défauts de la méthode des moindres carrés, les forces de la méthode RGS, *« sont justement d'une part ses qualités pédagogiques et d'autre part sa capacité à déterminer quasiment n'importe quelle « meilleure courbe ».*»

Sur les bénéfices didactiques de la méthode RGS, le deuxième expert nous révèle que

« Cette méthode présente des bénéfices didactiques significatifs parce qu'elle permet de considérer les erreurs et/ou les incertitudes sans recourir au calcul différentiel et intégral. En fait, une méthode analogue, quoique simplifiée, est utilisée depuis plusieurs années au collège Jean-de-Brébeuf. Cette méthode simplifiée n'utilise cependant pas les ordinateurs. On demande aux élèves de trouver au moyen d'une règle les droites de pentes extrêmes passant par tous les points expérimentaux en considérant les incertitudes de ces

points. La méthode proposée par M. Touma utilise en plus l'ordinateur pour faire cela ce qui permet d'en étendre significativement la portée aux fonctions non-linéaires et aussi de visualiser les distributions statistiques. En fait, cette nouvelle méthode permet de faire un réel traitement statistique des incertitudes ce que la méthode avec la règle et le papier ne permet évidemment pas. »

Enfin, les experts concluent que la méthode RGS « est intéressante et mérite d'être largement utilisée partout où il faut trouver la meilleure fonction décrivant le comportement d'une série de mesures. ». Étant donné les avis de ces deux experts, nous pouvons raisonnablement penser que cette méthode, à cause de ses caractéristiques pédagogiques et de sa facilité d'utilisation, peut être utilisée avec des étudiants. Pour nous en assurer, nous allons entreprendre maintenant une mise à l'essai empirique avec des étudiants du collège Marie de France de Montréal. Les résultats de cette mise à l'essai empirique seront décrits dans le chapitre suivant.

Chaptire 6: Mise à l'essai empirique

Dans ce chapitre, nous allons décrire l'environnement dans lequel s'est effectuée la mise à l'essai empirique avec des étudiants. Nous décrivons aussi les conditions de cette mise à l'essai empirique. Les résultats de chaque groupe et leur analyse seront placés en annexe 6 alors que l'analyse et l'interprétation globale de ceux-ci seront placées dans le corps de ce texte.

En France, l'Expérimentation Assistée par Ordinateur (ExAO) fait partie du programme de formation en sciences expérimentales au lycée depuis plus de 10 ans et dans tous les collèges¹⁰ à partir de l'année 2003. Pour obtenir le baccalauréat français, tous les étudiants et étudiantes en sciences doivent obligatoirement subir un examen officiel du ministère de l'éducation française en ExAO. Ainsi, tous les étudiants en sciences qui suivent le programme français doivent nécessairement apprendre et s'appropriier les systèmes ExAO durant les dernières années de leurs études collégiales et les trois années de lycée. On peut donc dire que les étudiants ont déjà une bonne expérience en l'utilisation des logiciels éducatifs dédiés à l'ExAO. Par contre, ils effectuaient l'analyse et la modélisation algébrique de leurs données avec un logiciel de traitement dédié à la physique, Régressi. Pour ces raisons, nous avons choisi le collège français Marie de France, à Montréal, pour effectuer la mise à l'essai empirique, aussi parce que les professeurs et les étudiants en sciences de ce collège utilisent et sont habitués aux systèmes d'ExAO développés au Laboratoire de Robotique Pédagogique de l'Université de Montréal. Pour ce faire, nous avons choisi les 24 étudiants et étudiantes des deux professeurs qui ont participé à la mise à l'essai fonctionnelle du prototype. Voici donc la description de nos sujets:

- Tous les sujets n'avaient pas encore utilisé ce nouveau prototype pour effectuer des acquisitions de données;
- Tous les sujets ont déjà suivi un cours théorique sur la charge du condensateur avec leurs professeurs;
- Tous les sujets n'avaient pas encore expérimenté en laboratoire la charge du condensateur ;

¹⁰ Les collèges français correspondent, rappelons le, aux écoles secondaires québécoises

- Tous les sujets avaient déjà étudié les notions statistiques suivantes : histogramme, moyenne, mode, médiane, erreur-type ;
- Tous les sujets avaient déjà étudié les fonctions exponentielles ;
- Tous les sujets avaient déjà réalisé différentes expériences avec le matériel ExAO en effectuant l'acquisition des données avec le logiciel Visuel Orphy de la compagnie Micrélec et l'ancienne version du logiciel MicrolabExAO¹¹ développé et conçu au Laboratoire de Robotique Pédagogique;
- Tous les sujets transféraient les données expérimentales du logiciel Visuel Orphy ou de l'ancienne version du logiciel MicrolabExAO vers le logiciel Régressi de Micrélec ou vers Excel pour y effectuer automatiquement la modélisation algébrique;
- Tous les sujets ont assisté à une introduction et une explication sur l'utilisation des différentes fenêtres du prototype. En particulier, on leur a expliqué, durant une quinzaine de minutes, l'utilisation de la fenêtre de la modélisation algébrique pour expliquer la méthode RGS aux sujets. On leur a expliqué cette méthode en empruntant et en modélisant les données expérimentales de l'expérience de la pression de l'eau en fonction de la profondeur (hauteur) du liquide qui est détaillée dans le chapitre mise à l'essai fonctionnelle dans le paragraphe validation de contenu. On a donc expliqué la méthode RGS en l'appliquant seulement sur le cas d'une fonction linéaire de premier degré de type $P = f(h) = a \cdot h + b$.

La mise à l'essai empirique consiste donc à réaliser le laboratoire sur la charge d'un condensateur, en particulier la modélisation algébrique de ce phénomène physique. Il s'agit donc de modéliser une fonction exponentielle de la forme $A \cdot (1 - e^{-t/b})$, où A est la tension maximale du générateur et $b = RC$ où R est la résistance de 30 Ohms du circuit et C est la valeur du condensateur qui est de l'ordre de 10 000 μ F.

Dans cette expérience, nous avons introduit directement le prototype dans le curriculum des deux professeurs. Ceux-ci ont donné le cours théorique sur la charge d'un condensateur aux étudiants et ont préparé un protocole de laboratoire sur la charge du condensateur (Annexes I)

¹¹ L'ancienne version du logiciel MicrolabExAO a été développée par Riopel (1999-2000) et Fournier (2000-2002) au Laboratoire de Robotique Pédagogique de l'Université de Montréal.

de façon à effectuer la modélisation algébrique avec le prototype au lieu de Régressi ou Excel. C'est avec ce protocole que les professeurs ont expérimenté avec leurs étudiants la méthode RGS. Tel que décrit dans le chapitre méthodologie, nous avons recueilli les données par différents moyens qui sont les suivants:

a) Analyse des données contenues dans le fichier xao

Le fichier de sauvegarde d'extension .xao, qui contient les données brutes de l'expérience ainsi que la production finale de la modélisation algébrique effectuée par chaque groupe de deux étudiants(es). De cette production finale, on a pu vérifier:

- l'utilisation judicieuse des graphiques, de la fenêtre des écarts, et de la fenêtre d'histogramme;
- l'équation algébrique, résultat final de la modélisation.

À partir des données brutes, nous avons pu reproduire la modélisation complète afin de la comparer avec les résultats des étudiants.

b) Analyse des commentaires

Des commentaires écrits à partir des deux questions qui sont les suivantes et qui portent sur:

- la compréhension et le degré de difficulté de la modélisation algébrique en utilisant le logiciel MicrolabExAO;
- la comparaison de cette méthode avec le tableur grapheur normalement utilisé dans leur cours (Régressi).

Par la suite, nous allons présenter l'analyse et l'interprétation globale des résultats de la modélisation et les commentaires de chaque groupe d'étudiant, les résultats de chaque groupe d'étudiants ont été placés en annexe 6.

6.1 Analyse et interprétation des résultats bruts des différents groupes du collège Marie de France

Pour chacun des 12 groupes, on peut dire qu'ils ont tous utilisé les trois fenêtres mises à leur disposition : la fenêtre graphique, la fenêtre des écarts, et la fenêtre du diagramme à bandes afin de modéliser la courbe expérimentale. En observant les résultats dans le tableau de compilation ci-dessous (Tableau 2), on peut dire que tous les groupes ont réussi la première étape du processus de modélisation algébrique. La deuxième, la troisième et la quatrième étape ont été réussies par 11 groupes sur 12. La cinquième étape a été réussie par 7 groupes sur 12. La sixième a été réussie par 6 groupes sur 12. La septième étape n'a été réussie que par 3 groupes sur 12.

Étapes du processus de modélisation algébrique	Résultats	Nombre de groupes / 12
1 - Utilisation du graphique	Réussi	12
2 - Utilisation de la fenêtre des écarts	Réussi	11
3-Utilisation de la fenêtre de la distribution des écarts	Réussi	11
4 - Tenu compte du 68%	Réussi	11
5 - Tenu compte de la distribution symétrique	Réussi	7
6 - Tenu compte de la distribution normale	Réussi	6
7 - Choix de l'incertitude	Réussi	3

Tableau 2: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique de tous les groupes

En interprétant les tableaux de résultats de la modélisation algébrique des groupes et du chercheur, on trouve que:

- au millième près, 25% des coefficients correspondent aux résultats du chercheur.
- au Dixième près, 58% des coefficients résultats correspondent à ceux du chercheur. Pour ces groupes, on trouve que l'erreur relative de leur incertitude par rapport à celle du chercheur est inférieure à 0.2%, tandis ce qu'elle est supérieure à 0.3% pour les autres groupes qui ont des résultats différents de ceux du chercheur (sauf dans le cas du groupe 10, voir alinéa¹²).

¹² Nous allons revenir sur ce cas un peu plus loin dans ce paragraphe.

Dans le cas du groupe 7, il lui a été difficile d'optimiser et de trouver l'équation algébrique de type $a*(1 - e^{-tps/b})$ qui distribue les écarts normalement parce que l'origine de la courbe obtenue expérimentalement ne commençait pas à l'origine des échelles. Ce groupe n'avait pas réussi à synchroniser expérimentalement le début de l'acquisition des données sur le début de la charge du condensateur. Ainsi, entre le moment où le groupe a déclenché l'acquisition des données et a basculé l'interrupteur pour charger le condensateur, il s'est écoulé un certain temps avant que le condensateur ne commence à se charger. Pour tenir compte de ce temps écoulé dans l'équation de la charge du condensateur, le groupe aurait pu corriger mathématiquement cette erreur expérimentale en ajoutant une constante c sur le temps: $a*(1 - e^{-(tps+c)/b})$. Nous pensons ainsi que cette erreur de manipulation commise par ce groupe a rendu l'activité de modélisation algébrique plus complexe, surtout parce que le protocole de laboratoire ne prévoyait pas cette situation et que pour la solutionner, les étudiants auraient du utiliser, comme nous venons de le décrire, un modèle mathématique plus complexe. Cependant, en interprétant le résultat de la modélisation algébrique dans son fichier xao, on a constaté qu'il a quand même essayé de trouver l'écart le plus petit qui contient les 68% et les 95% (à quatre fois cet écart) des données expérimentales en ayant le moins possible des points singuliers. Nonobstant cette erreur de manipulation, on peut dire qu'il a réussi à appliquer les propriétés de la méthode RGS afin d'optimiser la fonction de modélisation.

Dans les deux cas des groupes 9 et 12, une erreur de manipulation a été commise sur l'origine des ordonnées. Cette fois-ci, ces groupes ont soit déclenché la charge du condensateur un peu avant de déclencher l'acquisition des données, soit le condensateur n'était pas complètement déchargé lorsqu'ils ont démarré l'expérience. Comme pour le groupe 7, cette erreur de manipulation a rendu plus complexe l'activité de modélisation algébrique. Pour tenir compte de la charge initiale du condensateur, le groupe 9 aurait dû ajouter une constante à l'équation. Par contre, ce qui est intéressant ici, c'est que le groupe 12, devant la difficulté d'appliquer le modèle de la charge du condensateur, a pu, grâce au logiciel et malgré le fait que le protocole ne prévoyait pas cette situation plus complexe, compenser algébriquement cette erreur et modéliser ainsi leurs données en ajoutant une constante sur l'ordonnée. Cependant, nous n'avons pu vérifier que ce groupe, en ajustant cette constante, se rendait vraiment compte qu'elle représentait la valeur du voltage de la charge du condensateur au temps $t = 0$, c'est-à-dire au moment où il a déclenché l'acquisition de données. Pour le groupe 9, même avec le type d'équation qu'il possédait, on constate qu'il a appliqué les propriétés de la méthode RGS (écart le plus petit qui contient les 68% des données expérimentales et les 95 % (à quatre fois

cet écart) de ces derniers). Pour le groupe 12, et étant donné que la méthode RGS est une méthode itérative, il n'a pas diminué suffisamment l'incertitude pour mieux ajuster sa courbe. Ceci donne la raison pour laquelle le résultat de la modélisation algébrique est différent de celui du chercheur. Enfin, en interprétant les résultats de ces deux groupes, on peut dire alors qu'ils ont réussi à mettre en œuvre toutes les propriétés de la méthode RGS afin de trouver la meilleure courbe dans les circonstances particulières.

Ce qui est intéressant dans les trois cas 7, 9 et 12, c'est que la méthode RGS, devant une distribution des erreurs qui n'était pas normale, nous a permis de nous interroger sur la source de ces deux erreurs, ce que ne nous pourrions faire directement avec la plupart des autres méthodes. Nous pensons que c'est la visualisation de cette distribution qui nous amène à induire un facteur que nous n'aurions pas décelé avec les autres méthodes utilisées, par exemple dans Excel ou Régressi.

Dans le cas du groupe 11, on remarque que les étudiants ont rencontré des difficultés à superposer graphiquement la fonction exponentielle sur les données expérimentales. Ceci pourrait s'expliquer par le fait qu'ils ne comprenaient pas l'effet indépendant de chaque paramètre de l'équation sur sa représentation graphique.

Dans le cas du groupe 10, on remarque que les étudiants ont réussi à appliquer toutes les propriétés de la méthode RGS afin de déterminer l'équation algébrique de la meilleure courbe. Cependant, comme dans le cas du groupe 12, ils n'ont pas diminué suffisamment l'incertitude pour mieux optimiser la courbe. Ceci, encore une fois, explique la différence entre les deux résultats obtenus par le groupe et le chercheur¹³.

6.2 Analyse et interprétation des témoignages des différents groupes

De manière générale, on peut dire que 9 groupes sur 12 considèrent que le logiciel MicrolabExAO est facile à utiliser (Groupes : 1;2;3;4;6;8;9; 10 et 12).

¹³ Rappelons ici que la préparation de l'expérience, son exécution ainsi que la modélisation algébrique avec la méthode RGS s'est effectuée en une séance de 1h et 15 minutes.

Les groupes 5 et 7 sont plus nuancés. Pour le groupe 5 il a trouvé « *la modélisation algébrique en utilisant le logiciel MicrolabExAO difficile* ». Le groupe 7 trouve les méthodes de modélisation complexes notamment dans l'interprétation de la distribution statistique « *j'ai un peu l'impression d'appliquer les méthodes que je ne comprenais pas vraiment comme celle du 68% dans le diagramme en bâtons* ». Paradoxalement, ce groupe conclut malgré tout « *on préfère ce logiciel à Régressi* ».

6.2.1 Pour ce que les étudiants n'ont pas apprécié par rapport à Régressi

En général, selon certains groupes, la méthode RGS utilisée dans le prototype demande plus de temps pour trouver la meilleure équation algébrique que la méthode automatique utilisée dans Régressi (Moindres carrés). Par exemple, le groupe 1 mentionne que « *le fait qu'on doive manuellement chercher la meilleure équation passant par tous les points n'est pas très approprié aux T.P.....on aurait besoin d'une façon plus rapide à avoir accès aux différentes équations* ». Le groupe 5 note qu'il n'a pas apprécié « *le temps qu'il faut pour trouver l'équation, comparé aux autres logiciels* ». Alors que le groupe 7 « *a d'ailleurs eu besoin d'une heure d'explications pour le comprendre* ».

Le groupe 2 a trouvé dur « *le moment où il fallait jongler avec les différentes colonnes* ». Pour faciliter l'ajustement des paramètres, le groupe 12 suggère: « *lorsque l'on joue sur les paramètres de la courbe, il devrait y avoir un indicateur de l'unité que l'on influence, car il arrivait qu'on se perde; il faudrait aussi pouvoir simplement taper un nombre directement et aller cliquer l'unité que l'on veut influencer* ». Finalement, le groupe 10 nous dit que « *l'utilisation de ce logiciel, quoique efficace, est plus compliquée que celle de Régressi* ». Pour résumer, ces résultats ne sont pas surprenants puisque l'objectif de la méthode RGS est d'amener les étudiants à la compréhension du processus de modélisation algébrique. Ce module inséré dans cette activité de laboratoire en sciences expérimentales a prolongé d'au moins 20 minutes la période de laboratoire. Malgré cela, si les étudiants comprennent mieux ce processus de modélisation complexe que celui qu'ils exécutaient de manière automatique et aveugle avec Régressi, ces commentaires sont encourageants. C'est ce qu'on nous allons vérifier dans le paragraphe suivant.

6.2.2 Pour ce que les élèves ont apprécié par rapport à Régressi

Pour vérifier cette compréhension du processus de modélisation algébrique effectué avec RGS par les élèves, nous allons analyser les commentaires des étudiants.

«Ce que j'ai apprécié:

- La manipulation itérative qui diffère de celle de Régressi. Celle-ci nous donne la chance de mieux comprendre l'influence des paramètres d'une équation sur la courbe.

-Le fait qu'il y avait plus qu'un support pour nous aider à approcher la courbe expérimentale de la courbe théorique (distance des points à la courbe et le graphique)

-Le graphique. Le concept de diviser la proximité de la localisation des points à la courbe en pourcentages fixes (68% et des % symétriques) est intéressant.» (Groupe 5)

«Il permet, grâce au diagramme en bâtons des erreurs absolues, la visualisation de l'écart entre les résultats théoriques et les résultats expérimentaux, ce que ne permet pas le logiciel Régressi » (Groupe10);

« C'est intéressant de voir comment modéliser des courbes, contrairement à Régressi où on nous donne une équation qui tombe du ciel » (Groupe 8);

« On comprend mieux d'où viennent les modélisations qu'on obtient » (Groupe7);

Pour finir, le groupe4 suggère au professeur:

«Je pense sincèrement qu'il devrait remplacer le logiciel actuellement en vigueur dans les lycées et dans les cégeps. Le fait de pouvoir concevoir nous-mêmes une courbe très précise, correspondant à un ensemble de données expérimentales, avec la plus petite erreur relative possible, est une liberté qui n'avait encore jamais été atteinte. Cela permettra à la fois de contribuer au développement des capacités mathématiques des élèves et de devenir par le fait même un nouveau critère d'évaluation.»

De manière générale, on peut dire que le fait de visualiser différents outils graphiques a permis aux différents groupes de comprendre le processus de modélisation algébrique ce qu'ils n'arrivaient pas à comprendre avec Régressi. De plus, pour les groupes 5 et 10, l'utilisation de la courbe des écarts ainsi que le digramme en bâton, nous permet de croire que certains étudiants ont pu appréhender, au moins en partie, la notion de distribution des écarts. Pour appuyer notre interprétation des résultats des étudiants, avant de conclure sur cette mise à l'essai empirique, nous allons inclure l'analyse effectuée par leurs enseignants sur l'ensemble de cette activité

-La facilité d'utilisation du didacticiel

Premier enseignant:

« L'aspect pédagogique est très bien mis en avant. Ce logiciel permet d'aborder des notions très variées de physique et chimie à partir de la même structure d'acquisition. C'est un point très important pour que l'élève voie une cohérence entre les différentes expériences abordées. L'aspect convivial du logiciel est apprécié, tant des enseignants que des élèves ayant travaillé avec. Cette mise en forme (je pense au Vue-mètre, et au mode acquisition, très en couleurs) est vital au niveau collégial pour donner envie à l'étudiant d'aller de l'avant. »

Deuxième enseignant :

« Le mode Vumètre permet un calibrage simple des capteurs ainsi que des changements d'échelle particulièrement pratiques.

De façon très visuelle (sous forme graphique), l'élève voit en temps réel (et très simplement) comment évolue une variable d'étude au cours du temps ou en fonction d'une autre variable. Le paramétrage du logiciel en mode graphique (pour effectuer une acquisition) est un jeu d'enfant et ça tombe plutôt bien, vu notre public! »

- L'originalité de la méthode de modélisation algébrique :

Premier enseignant:

« La gestion statistique de la modélisation est remarquable. Elle est conviviale et peut rester simple car très visuelle si on se limite à expliquer simplement la méthode des « moindres carrés ». Elle permet par ailleurs un travail transversal avec les professeurs de mathématiques si on aborde une gestion statistique plus poussée où seront introduits écarts types et courbe de Gauss. Cette vaste plage d'utilisation en fait un logiciel de modélisation complet et utilisable à tous les niveaux d'enseignement. Cette approche est promise à mon sens à un bel avenir ! »

Deuxième enseignant:

« En sciences physiques nous ne pouvons pas toujours nous contenter d'un simple graphique! Il faut que nous confrontions les résultats obtenus à la théorie. Avec Microlab, l'étudiant a la possibilité de modéliser sa courbe et d'apprécier la qualité de cette modélisation grâce à des outils statistiques puissants ».

- Les bénéfices didactiques

Premier enseignant:

« Ils se résument en une phrase : l'élève ne subit pas son expérience et reste actif jusqu'au bout. En effet, il comprend par l'intermédiaire des capteurs virtuels que toute acquisition physique peut se résumer à l'acquisition d'un signal électrique, ce qui peut l'amener à vouloir concevoir de nouveaux capteurs. Par ailleurs, dans la partie modélisation, l'élève construit le modèle graphiquement et ne subit pas une courbe qui arrive de nulle part, comme proposé dans d'autres logiciels. En résumé, l'élève se sent impliqué et a envie d'avancer. N'est-ce pas ce qui fait parfois défaut dans notre discipline ? »

Deuxième enseignant:

« Enfin un logiciel regroupant les deux modules fondamentaux en ExAO : la partie acquisition et la partie traitement des données (modélisation)! Je rajouterai que Microlab permet très simplement de créer des capteurs virtuels à partir de capteurs réels, comme par exemple un capteur de puissance électrique à partir d'un capteur de tension et d'un autre d'intensité... Ainsi l'élève apprend à concevoir de nouveaux capteurs »

- Les avantages de Microlab par rapport à d'autres tableurs (Régressi, Excel)

Premier enseignant:

« Ce logiciel a l'énorme avantage de gérer acquisition et modélisation, et malgré tout d'être parfaitement convivial, ce qui fait que l'élève ne se perd pas dans des options qui n'en finiraient pas. Plus l'élève est autonome dans son protocole et dans la gestion des chemins d'accès, mieux c'est, car le professeur est alors plus disponible pour expliquer les concepts purement physiques associés. Par sa simplicité d'utilisation, Microlab apporte ce confort didactique. Bien sûr, l'approche originale de la modélisation sous sa gestion statistique est aussi un atout certain de ce logiciel par rapport à ce qui existe déjà sur le marché. »

Deuxième enseignant:

« La modélisation... Jusqu'à présent on utilisait un tableur comme Régressi (Micrélec, France) ou Excel. Régressi a le mérite d'être dédié exclusivement aux sciences, mais si la modélisation est très simple, elle n'en est pas moins magique! Trois ou quatre clics de souris et les résultats s'affichent, sans qu'on y comprenne quoi que ce soit! Pour ce qui est du logiciel ultra généraliste Excel, une véritable usine à gaz pour des élèves qui ne l'ont jamais vraiment utilisé, et le côté magique est également là... Certes! Enlever le côté magique est une difficulté supplémentaire pour l'élève, mais cela en vaut la peine! Il faut prendre le temps d'expliquer aux élèves cette nouvelle approche de la modélisation, ainsi ils comprendront l'intérêt des notions statistiques apprises en mathématique. »

- Utiliseriez-vous cette méthode (modélisation algébrique) avec vos élèves?

Premier enseignant:

« Elle est déjà en service dans l'établissement, et elle a de belles années devant elle ! »

Deuxième enseignant:

« C'est déjà fait, et sans regret, aucun! »

6.3 Limites de la mise à l'essai empirique

Les limites de cette mise à l'essai résident dans le fait que la nature même de nos résultats issus d'une situation d'apprentissage encadrée à l'intérieur du cours des deux professeurs et considérablement limitée dans le temps (60 minutes), ne nous a pas permis de procéder à une analyse conceptuelle et didactique afin de dégager précisément et de mettre en évidence toutes les transformations, raisonnement, manipulation possibles de l'étudiant dans sa démarche de mise en application du dispositif RGS. Cette démarche devra être l'objet d'une prochaine recherche dans laquelle nous ferons une actographie complète des démarches de l'étudiant en contrôlant de manière plus systématique le déroulement du processus et en lui fournissant un complément de formation sur la nature aléatoire des données et leur représentation.

6.4 Conclusion

D'une manière générale, on peut dire que les étudiants ayant participé à la mise à l'essai empirique ont apprécié la façon visuelle et itérative d'optimiser la fonction de modélisation, même si certains trouvaient plus facile d'utiliser la méthode automatique de Régressi. Leurs professeurs par contre, semblent apprécier le caractère pédagogique de la méthode RGS comme le souligne l'un deux « *Certes! Enlever le côté magique est une difficulté supplémentaire pour l'élève, mais cela en vaut la peine!* ».

Cette expérience a été menée sur des étudiants qui suivaient parallèlement les systèmes français et québécois. Nous n'avons pu le tester complètement avec des étudiants dans le système du secondaire québécois. Toutefois, nous avons effectué une pré-expérimentation avec trois élèves du secondaire 5 et leur enseignant. En général, ces élèves n'ont pas eu de difficultés à utiliser le prototype. Par contre, pour ce qui est de l'utilisation de la méthode RGS, deux élèves ont déclaré avoir eu des difficultés voire beaucoup de difficultés à la comprendre, mais qu'ils l'ont comprise à la fin (voir annexe 10;11;12). Notons que ces étudiants n'avaient jamais utilisé un système d'ExAO, ni modélisé algébriquement un phénomène physique. Malgré cela, et attendu que ces élèves ne disposaient que de 45 minutes pour réaliser une acquisition de données et modéliser celle-ci, attendu aussi les commentaires de leur professeur sur ses avantages : « *La transparence du logiciel ainsi que l'implication de l'élève dans le processus de modélisation* », ses commentaires sur ses conditions préalables d'utilisation au secondaire, à savoir la compréhension de la « *signification de la courbe normale* » nous pensons comme lui que la méthode RGS peut être utilisée au niveau secondaire, principalement en secondaire cinq.

Dans cette mise à l'essai, les commentaires des professeurs nous prouvent que ceux-ci ont bien assimilé les possibilités et avantages de notre méthode RGS, qu'ils sont prêts à l'utiliser et à construire des protocoles qui devraient permettre de l'exploiter à sa pleine valeur avec des élèves, ce que nous n'avons pas réalisé ici en si peu de temps.

Chaptire 7: Résumé et conclusion

7.1 Résumé

Cette recherche de développement voulait mettre en scène et expliciter la modélisation algébrique dans un laboratoire de sciences expérimentales, au secondaire comme au collégial, et introduire l'élève à l'estimation de l'incertitude. Dans cette foulée, nous nous sommes trouvé à proposer et à concrétiser une méthode de modélisation générique à dominante sensorielle, visuo-graphique mais néanmoins rigoureuse, la Régression Graphico-statistique (RGS).

La méthode RGS s'intègre parfaitement dans l'environnement d'Expérimentation Assistée par Ordinateur dans lequel elle est implantée. Ainsi, elle permet une intégration des sciences avec les mathématiques afin d'investiguer et expérimenter un phénomène physique de manière graphique et algébrique. Cette démarche à caractère didactique, cet outil, dirions-nous cette approche, permet à l'étudiant de comprendre et de justifier mathématiquement tout le processus de modélisation en incluant l'optimisation de l'équation du modèle et l'évaluation de son incertitude.

L'introduction didactique des statistiques dans ce processus de modélisation est tout à fait nouvelle et originale en ce sens qu'ici, on utilise les statistiques non seulement pour optimiser la fonction par rapport à l'ensemble des points expérimentaux, mais aussi pour estimer l'incertitude de mesure qui est attachée.

Même si l'on peut utiliser la méthode de Gauss-Legendre de manière automatique dans les calculatrices et les logiciels comme Excel ou Régressi, la compréhension du rationnel sous-jacent reste hors de portée de l'élève, ce qui ne peut selon nous que nuire à un apprentissage raisonné de la démarche expérimentale et notamment du processus de modélisation. Par contre, la méthode RGS, par ses qualités didactiques, accompagne l'élève dans cet apprentissage et nécessite chez-lui beaucoup moins de connaissances préalables pour être effectivement utilisée. En effet, il suffit aux élèves de maîtriser les concepts associés à:

- a) l'effet de chaque paramètre de l'équation algébrique d'un modèle sur la superposition d'une fonction théorique à un ensemble de données expérimentales

- b) la notion d'effectifs et leurs fréquences (c'est-à-dire, l'occurrence de ces effectifs);
- c) la représentation d'un histogramme;
- d) le postulat qui prédit que les erreurs de mesures sont aléatoires et se distribuent quasi normalement, tel que décrit dans le chapitre prototype.

La mise à l'essai fonctionnelle nous a permis, dans une première étape, d'améliorer le prototype afin de le rendre plus efficace et performant en regard du modèle d'action et de son ergonomie générale, c'est-à-dire de sa facilité d'utilisation.

Dans une deuxième étape, nous avons effectué une validation de contenu en comparant les résultats obtenus par la méthode RGS et les méthodes traditionnellement utilisées en classes avec d'autres moyens, comme Excel et Régressi.

Pour la modélisation des fonctions polynomiales, nous pouvons dire que les résultats obtenus sont équivalents. Ajoutons une petite nuance, puisque, avec la méthode RGS, nous pouvons encore améliorer la fonction symbolique donnée par Excel ou Régressi en inscrivant leurs résultats et en confrontant ceux-ci avec les données empiriques dans le prototype. Dans la plupart des cas, nous avons pu alors améliorer leur optimisation en la coordonnant avec la distribution des écarts. De plus, l'erreur-type peut être évalué sur n'importe quel type de fonction linéaire alors que celle-ci n'est évaluée dans Excel que pour des fonctions linéaires du premier degré.

La méthode de Gauss-Legendre appliquée dans la plupart des tableurs ne se généralise que dans des cas très particuliers où l'on peut procéder à un changement de variable afin de ramener toute expression algébrique à une expression linéaire. Nous avons montré que la méthode RGS se généralise, non seulement pour ces expressions algébriques, mais aussi pour n'importe quelle fonction, qu'elle soit ramenée ou non à une expression linéaire (voir le cas de la charge du condensateur au chapitre 6).

Attendu que cette recherche de développement est à caractère didactique, nous avons voulu vérifier son applicabilité avec des professeurs et des étudiants de niveaux secondaire et collégial. Cette évaluation préalable nous a montré que les étudiants ont apprécié la méthode et mieux compris le processus de modélisation, malgré le fait qu'elle était moins «rapide», c'est-

à-dire moins automatique que les méthodes analytiques. Les professeurs se sont montrés encore plus enthousiastes pour son caractère didactique. L'un d'eux nous dit :

« Pour ce qui est du logiciel ultra généraliste Excel, une véritable usine à gaz pour des élèves qui ne l'ont jamais vraiment utilisé, et le côté magique est également là... Certes! Enlever le côté magique est une difficulté supplémentaire pour l'élève, mais cela en vaut la peine! Il faut prendre le temps d'expliquer aux élèves cette nouvelle approche de la modélisation, ainsi ils comprendront l'intérêt des notions statistiques apprises en mathématique. »

7.2 Conclusion

Nous avons entrepris cette recherche de développement technologique dans le but de permettre aux élèves d'accéder à la modélisation algébrique des phénomènes physiques et la comprendre. Nous voulions de plus leur permettre d'estimer l'incertitude de mesure avec, par exemple, la méthode des extrêmes afin de visualiser celle-ci sur la fonction symbolique.

Au cours du développement, nous nous sommes aperçu qu'il était nécessaire d'optimiser la fonction symbolique d'une manière plus rigoureuse qu'avec l'ajustement approximatif que nous voulions proposer. Nous étions alors confronté à la difficulté initiale qui était de laisser les élèves aux prises avec la méthode des moindres carrés de Gauss-Legendre. Pour surmonter cette difficulté, nous avons pensé présenter les écarts sous forme visuelle. Cette idée est apparue fructueuse puisque, comme la méthode de Gauss-Legendre qui utilise le carré des écarts afin de les réduire de manière algébrique, la méthode RGS plus accessible permet de les réduire explicitement par des opérations itératives de l'élève avec un support visuel. De plus, nous avons montré que cette méthode, attendu que la représentation de la différence des écarts avait la même forme et le même type que la fonction initiale, pouvait être réduite progressivement en ajustant successivement les paramètres correspondant aux caractéristiques visuelles de la courbe. Pour ce faire, nous avons alors donné la possibilité à l'apprenant d'amplifier ces écarts en changeant progressivement leur échelle de mesure. Nous avons démontré cette possibilité avec la fonction linéaire du second degré, dans le chapitre mise à l'essai fonctionnelle dans le paragraphe validation de contenu.

Pour estimer l'erreur de mesure, la méthode des extrêmes nous est apparue insuffisante puisque celle-ci incluait ipso facto les points singuliers. Nous avons donc pensé distribuer ces écarts sur un diagramme à bandes de manière à faire apparaître leur étalement en agissant sur les intervalles de classe. Ainsi, en distribuant de cette manière les écarts, nous exerçons deux

actions simultanées, à savoir l'optimisation de la courbe et l'évaluation de l'erreur-type. C'est ce rationnel qui nous a permis de substituer la méthode RGS à la méthode de Gauss-Legendre. Ici, la distribution des incertitudes est caractérisée par deux facteurs : l'ajustement de la courbe sur les données empiriques et l'incertitude de mesure proprement dite. L'accès à l'évaluation de l'incertitude de mesure nécessite donc de réduire d'abord l'erreur d'ajustement des paramètres de la fonction symbolique de manière précise, ce que nous faisons en minimisant progressivement la valeur de l'intervalle de classes. Cette valeur minimale sera alors une estimation valable de l'erreur-type, c'est-à-dire de l'incertitude des mesures.

Au contraire des méthodes traditionnelles, avec la méthode RGS, nous ne sommes pas obligés d'utiliser d'autres méthodes de régression ou de transformer nos données pour les ramener à une forme linéaire, en général du premier degré. En effet, nous avons montré, dans le chapitre mise à l'essai fonctionnelle, dans le paragraphe validation de contenu, qu'avec une fonction exponentielle décroissante, cette méthode s'applique directement et sans transformation. D'ailleurs, elle s'applique sur n'importe quelle fonction, linéaire ou non linéaire, ce que ne peut faire la méthode de Gauss-Legendre avec Excel ou les calculatrices graphiques. La méthode RGS est donc une méthode générique à interface humaine qui s'applique sur n'importe quelle fonction algébrique.

Il ne faut surtout pas oublier qu'avec la méthode RGS, on obtient non seulement le meilleur ajustement du modèle choisi (correspondant à la solution des moindres carrés quand l'ensemble de points est «discipliné») ainsi que l'évaluation de l'incertitude de mesure; elle permet aussi de repérer les points singuliers ou aberrants, que nous pourrions éliminer alors avec un critère objectif et surtout scientifique, ce que les méthodes traditionnelles ne permettent ordinairement pas.

Sur le plan théorique, en fournissant à l'élève un nouvel outil conceptuel en mathématique (la méthode RGS), nous complétons les recherches effectuées au Laboratoire de Robotique pédagogique sur l'ExAO et son paradigme décrit par la métaphore de la lunette cognitive. Un système ExAO global exige de l'élève qu'il réalise une expérience, qu'il prenne acte des mesures obtenues, qu'il perçoive le caractère modélisable de ses résultats. Le nouvel outil développé ici lui permet de sélectionner un modèle et de tenter de l'ajuster à ses données (par itérations grâce à une interaction graphique/souris/coefficients chiffrés etc.), qu'il constate les écarts (structurels, dus aux coefficients, dus à l'incertitude) et tente d'en minimiser une

fonction sommative, et qu'il vise l'optimalité en poursuivant la réduction d'amplitude de la distribution des écarts, et leur quasi normalité. Cet outil, que nous avons inséré dans le cycle itératif de la modélisation scientifique, permet à l'élève de construire un modèle calculable et prédictif du phénomène à l'étude. C'est-à-dire qu'il permet à l'élève de réaliser une activité cognitive d'interprétation inductive en changeant de cadre de rationalité (Lerouge, 2000). Cet outil est bien un outil intellectuel au sens d'Astolfi qui objective et établit entre des phénomènes une relation suffisamment générale et invariante qui permet la prévision de résultats ou d'effets. Cet outil est une manière d'opérationnaliser objectivement un ensemble de concepts en un modèle scientifique. Cet outil cognitif permet donc l'activité de construction inductive en sciences expérimentales de modèles et leur validation déductive. Cette activité cognitive de substitution, au sens d'Astolfi (1992) permet bien de rendre ce modèle mathématique prédictif et calculable.

Comme les experts qui ont analysé et évalué la méthode RGS, nous avons été surpris des résultats obtenus autant dans la validation de contenu (Chapitre 5) que dans la mise à l'essai empirique (Chapitre 6). Ces résultats nous amènent à proposer cette méthode pour la formation des élèves autant en sciences expérimentales qu'en mathématiques appliquées, non seulement pour son caractère didactique, mais aussi parce qu'elle donne des résultats équivalents voire même supérieurs aux méthodes traditionnelles, mais qu'en plus elle permet, grâce à la fenêtre de distribution des écarts, de vérifier que la distribution des écarts est normale, d'évaluer quantitativement l'incertitude de prédiction et de rejeter facilement les points singuliers ou aberrants afin de les éliminer avec un critère objectif.

L'utilisation de la méthode RGS avec l'ExAO est un paradigme didactique en soi, qui constitue une idéalisation du processus de formation à la démarche expérimentale.

Dans le cadre de cette recherche de développement technologique nous n'avons pas exploré ni validé complètement l'utilisation de la méthode RGS en sciences expérimentales. Ce travail reste ouvert à d'autres recherches en didactiques des mathématiques et des sciences ainsi qu'à d'autres domaines utilisant les mathématiques appliquées.

RÉFÉRENCES

- Akpa., A-O. (1994), *Élaboration d'un ensemble didactique, le «Réseau électrique», pour l'acquisition du concept électrique au second cycle du secondaire.* Thèse doctorale, UQTR.
- Astolfi J - P, Drouin A-M. (1992) *La Modélisation à l'école élémentaire.* Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences. INRP p. 66.
- Astolfi, J. - P, Darot, E., Ginsburger-Vogel, Y. et Toussaint, J. (1997), *Mots-clés de la didactique des sciences.* Paris, De Boeck.
- Astolfi. ,J - P, et Develay, M. (1993), *la didactique des sciences*, Paris, Seuil, 127p.
- Astolfi J - P, Peterfalvi B., Verin A (1998), *Comment les enfants apprennent les sciences*, RETZ.
- Ayaçguer - Richoux H. (2000), *Rôle des expériences quantitatives dans l'enseignement de la physique au lycée*, Thèse de doctorat, Université de Paris 7, p.153-154.
- Beaugrand, J.P. (1988), *Démarche scientifique et cycle de la recherche*, In M. Robert, *Fondements et étapes de la recherche scientifique en psychologie*, St Hyacinthe, Edisem.
- Beaufile D. (1993), *L'ordinateur outil d'investigation scientifique au lycée : propositions et implications didactiques*, Didaskalia V.1, 123-130
- Beaufile et al. (1999), *Quelques éléments de réflexion à propos des exercices à caractère expérimental.* Dans *Activités expérimentales des élèves en physique-chimie : quels enjeux d'apprentissage*, Caen : CRDP, p.101-116.
- Berger, C.F., Lu, C.R., Belzer, S.J. et Voss, B. E.(1994), *Research on the Uses of Technology in Science Education*, In D.L. Gabel, *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*, Toronto, Maxwell Macmillan Canada, p.466-490.

- Boisclair G., Pagé, guide des sciences expérimentales, 3^{ème} édition, ERPI, 2004, p.50-60.
- BLUM, W., Alsina, C., Biembengut, M-S., Bouleau, N., Confrey, J., Galbraith, P., Ikeda, T., Lingefjard, T., Miler, E., Niss, M., Verschaffel, L., Hodgson, B., Henn, H-W., (2003), *ICMI Study 14 Discussion Document : Applications and modelling in mathematics education*, site accessed 20/10/2004
http://www.mathematik.uni-ortmund.de/didaktik/aktuelles/files/disc_doc.pdf
- Brousseau G. (1999), *Théorie des situations didactiques*, Grenoble: La pensée Sauvage, Texte rassemblés par N. Balacheff, M. Cooper, R. Sutherland et V. Warfield, 387p.
- Bunge M. (1983), *Epistémologie*. Paris : Maloine.
- Caron F. (2002), *Effets de la formation fondamentale sur les compétences d'étudiants universitaires dans la résolution de problèmes de mathématiques appliquées*, Montréal, Université de Montréal, Thèse de doctorat.
- Briand J., et Chevalier M-C. (1995), *les enjeux didactiques dans l'enseignement des mathématiques* : HATIER PEDAGOGIE, 238p.
- Cervera D. (1998), *Élaboration d'un environnement d'expérimentation en simulation incluant un cadre théorique pour l'apprentissage des fluides*, Montréal, Université de Montréal, thèse de doctorat, 151 p.
- Crevier F. (1996), *Conception et validation d'une méthode d'ingénierie didactique*, Montréal, Université de Montréal, thèses de doctorat, 302 p.
- De Landsheere, G. (1985), *Introduction à la recherche en éducation*, Liège, Thone, 311p.
- Dupin, J.J (1995), *Modèles et modélisation dans l'enseignement. Quelques contraintes didactiques*, Acte de l'école d'été, Edition coordonnée par : Noirfalise R:

IREM de Clermont-FD, et Perrin-Glorian, M-J : IUFM Arras et Équipe DIDIREM Paris VII, p.247-257.

- Duval, R. (2005), *Sémiosis et pensée humaine*. Berne: Peter Lang.
- Duval, R. (1988a), *Écart sémantiques et cohérence mathématique : introduction aux problèmes de congruences*. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives*. 1 7-25.
- Fournier F. (2002), *Un environnement d'apprentissage technologique pour la compréhension du concept de mesure en sciences expérimentales*, Montréal, Université de Montréal, Thèse de doctorat, 199p.
- Fregona D, (1995), *Les figures planes comme " milieu " dans l'enseignement de la géométrie: interactions, contrats et transpositions didactiques*, Thèse de l'Université de Bordeaux I, diffusion LADIST Bordeaux
- Gagné, G., Lazure, R., Sprenger-Charolles, L. et Ropé, F. (1989), *Recherches en didactique et acquisition du français langue maternelle*, Montréal, De Boeck-Université, p.40-56.
- Gauthier, B. (1995), *Recherche sociale*, Sainte-Foy, Presses de l'Université du Québec, p.517.
- Girouard M, (1995), *La « lunette Cognitive » Pour l'acquisition d'un langage graphique, son influence sur l'atteinte des objectifs terminaux des cours de physique GPY-151-2-4 à l'éducation des adultes*, Montréal, Université de Montréal, thèse de doctorat, 169.p.
- Girouard M, Nonnon P. (1999), *La « lunette Cognitive » Pour l'acquisition d'un langage graphique de codage, son influence sur l'atteinte d'objectifs terminaux des cours de physique à l'éducation des adultes*. Montréal. Actes du cinquième colloque international sur la robotique pédagogique, Université de Montréal, p.139-179.
- Granger, G.-G. (1995) *La science et les sciences*, Paris, Presses Universitaires de France, 127p.

- Guillon A. (1995), Démarches scientifiques en travaux pratiques de physique de DEUG à l'université de Cergy-Pontoise, Didaskalia, n°7, p.113-127
- IGEN (1998), *Évaluation des capacités expérimentales*, Inspection Générale de l'Education Nationale - Groupe de Physique et Chimie, (reprographie, diffusion MENRT, 7p.)
- Larcher Claudine, « *la physique et la chimie, sciences de modèles* », Didactique appliquée de la physique-chimie, Paris : Nathan.
- Laurencelle L (1998), «*théorie et techniques de la mesure instrumentales*», Presse de l'Université du Québec, 280p.
- Laurencelle L (2005), «*Abrégé sur les méthodes de recherche et la recherche expérimentale* », Presse de l'Université du Québec, 115p.
- Lazarowitz, R. et Tamir, P. (1994), Research on Using Laboratory Instruction in Science, In D.L. Gabel, Handbook of Research on Science Teaching and Learning, Toronto, Maxwell Macmillan Canada, p.94-128.
- Leonard, W.H. (1990), Computer-based technology in college science laboratory courses, Journal of College Science Teaching, n°19, p.210-211.
- Lerouge A. (1992), *la notion de cadre de rationalité. A propos de la droite au collège*. Recherches en Didactique des Mathématiques. (20) p.171-208.
- Margolinas, CL. (1993), De l'importance du vrai et du faux dans la classe de mathématiques. Grenoble : La Pensée sauvage, p.229.
- Malafosse D., Lerouge A., Dusseau J.-M, (2000) Étude en interdidactique des mathématiques et de la physique de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : espace de réalité. Didaskalia. V.16, 81-106.

- Malafosse D., Lerouge A., Dusseau J.-M, (2001) *Étude en interdidactique des mathématique et de la physique de la loi d'Ohm au collège : changement de cadre de rationalité*. Didaskalia. V.18, 61-98.
- Malafosse D. (2002), *Pertinence des notions de cadre de rationalité et de registre sémiotique en didactique de la physique*, Recherche en Didactique des Mathématiques, Vol. 22 n°1, p.31-76
- Nachimas (1989), The microcomputer based laboratory. Theory and practice, Megamot Behavioral Science Quarterly, n°32, p.245-261.
- Nonnon, P (1999), Radioscopie virtuelle, Actes du cinquième colloque international sur la robotique pédagogique, Université de Montréal, p.335, 342.
- Nonnon, P. (1993), *Proposition d'un modèle de recherche développement technologique en éducation*, Regard sur la robotique pédagogique, Liège, Université de Liège, p. 147-154.
- Nonnon P. (1986), *Laboratoire d'initiation aux sciences assisté par ordinateur*. Université de Montréal, page 22.
- Nonnon P., Laurencelle, L. (1984), L'appariteur-robot et la pédagogie des disciplines expérimentales, Spectre, vol.13, n°3, p.34-36.
- Guillon A. (1995), Démarche scientifiques en travaux pratiques de physique de DEUG à l'université de Cergy-Pontoise, Didaskalia, n°7, p.113-127.
- Riopel M. (2005), *Conception et mise à l'essai d'un environnement d'apprentissage intégrant l'expérimentation assistée par ordinateur et la simulation assistée par ordinateur*, Montréal, Université de Montréal, thèse de doctorat, 225p.
- Rival, M. (1996), *Les grandes expériences scientifiques*, Paris, Seuil, 205 p.
- ROJAT D. (accès au site, 2004). *Modélisation et simulation quelques aspects des relations entre l'idée*

www.cndp.fr/archivage/valid/39063/39063-4925-4740.pdf

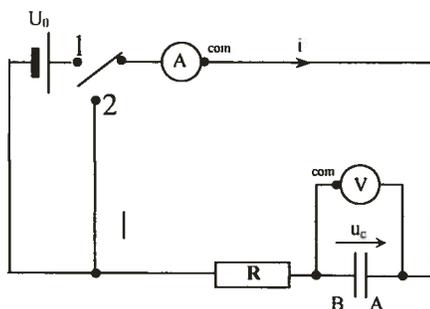
- Séré M.G., Journeaux R., Winther J., (1998), *Enquête sur la pratique des enseignants dans le domaine des incertitudes*, Bulletin de l'Union des Physiciens, 801, p.241-254
- Ven der Marin, J.M (1996), *Méthodes de recherche pour l'éducation*, 2^{ème} éd. Les presses de l'Université de Montréal, De Boeck Université.
- Vergnaud G. (1995), *Au fond de l'apprentissage, la conceptualisation*. Actes de la VIII^{ème} Ecole d'été de didactique des mathématiques, Clermont-Ferrand, p. 174-185.
- Wise, K. C. (1988), *The effect of using computing technologies in science instruction : A synthesis of classroom-based research*, in J.D. Ellis (Ed.), 1988 AETS Yearbook, Columbus, The Ohio State University, p. 105-118.

ANNEXE 1: PROTOCOLE D'EXPÉRIMENTATION

ETUDE DE LA CHARGE ET LA DECHARGE D'UN CONDENSATEUR

Ensemble Capteurs - Ordinateur - logiciels MICROLAB EXAO

A) MONTAGE ET PRINCIPE :



Interrupteur en position (1) : **charge**

Générateur : source idéale de tension ($U_0 \approx 10 \text{ V}$, pour tout i)

$R = \text{_____} \Omega$; mesure faite à l'ohmmètre.

C de l'ordre de $10\,000 \mu\text{F}$

L'ordinateur enregistre dans chaque phase les variations de la tension u_c aux bornes du condensateur et de l'intensité i qui traverse le circuit RC en fonction du temps t .

B) LANCEMENT DU LOGICIEL D'ACQUISITION :

Attention au branchement du condensateur, il y a risque d'explosion si celui-ci est branché à l'envers. Bien brancher le + du condensateur au + du générateur.

Réaliser (SANS ALLUMER LE GÉNÉRATEUR ! !) le montage en plaçant sur la voie X(1) de l'interface l'ampèremètre

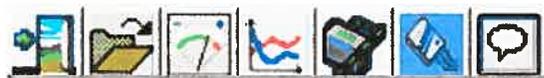
+/- 100 mA et sur la voie Y(2) le voltmètre 0 / 15 V.

Appeler le professeur afin qu'il puisse vérifier votre montage.

Placer vous dans la session élèves de votre classe. Cliquer Démarrer, paramètres, imprimantes, choisir l'imprimante relative à votre salle de classe, cliquer fichier puis imprimante par défaut.

Lancer le logiciel d'acquisition **MicrolabExAO**. S'assurer que l'ordinateur a bien reconnu la présence des 2 capteurs.

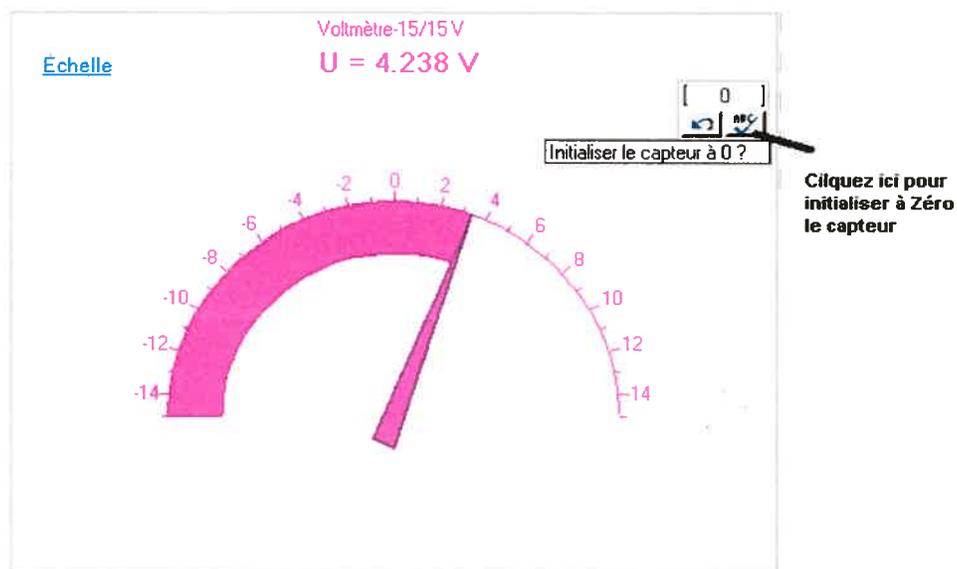
Le condensateur étant complètement déchargé (on peut le court-circuiter par un fil), assurons-nous que les grandeurs mesurées sont nulles en allant dans **Vu-mètre** (3^{ème} bouton



Vumètre

à gauche dans la barre d'outil),

Ensuite : mettez à zéro, le voltmètre (mettez à zéro aussi l'ampèremètre). Une fois terminée, fermer la fenêtre des vumètres.



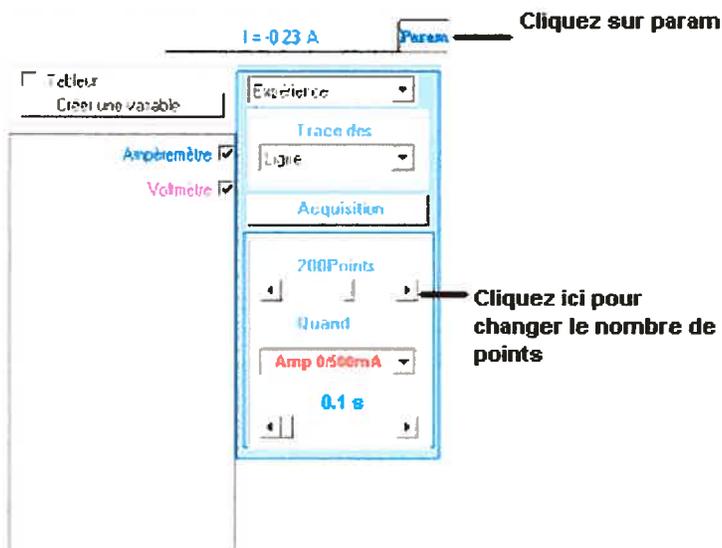
C) ETUDE DE LA CHARGE DU CONDENSATEUR :

I. MESURES :

Allez dans le mode graphique (4^{ème} bouton à gauche dans la barre d'outils)



Ensuite : A droite de la fenêtre graphique, cliquez sur Param pour afficher le menu des paramètres. Prenez 200 points au lieu de 100 points. Garder l'échantillon du temps égale à 0.1s (le temps total de l'expérience sera = $200 * 0.1s = 20$ secondes)



Allumer le générateur et régler la tension à 10 V.

Quand vous serez prêt, cliquer de nouveau sur Param, ensuite cliquer sur acquisition pour déclencher l'acquisition de mesure et Basculer l'interrupteur en position (1) → les courbes se tracent.

Laisser l'interrupteur en position (1).

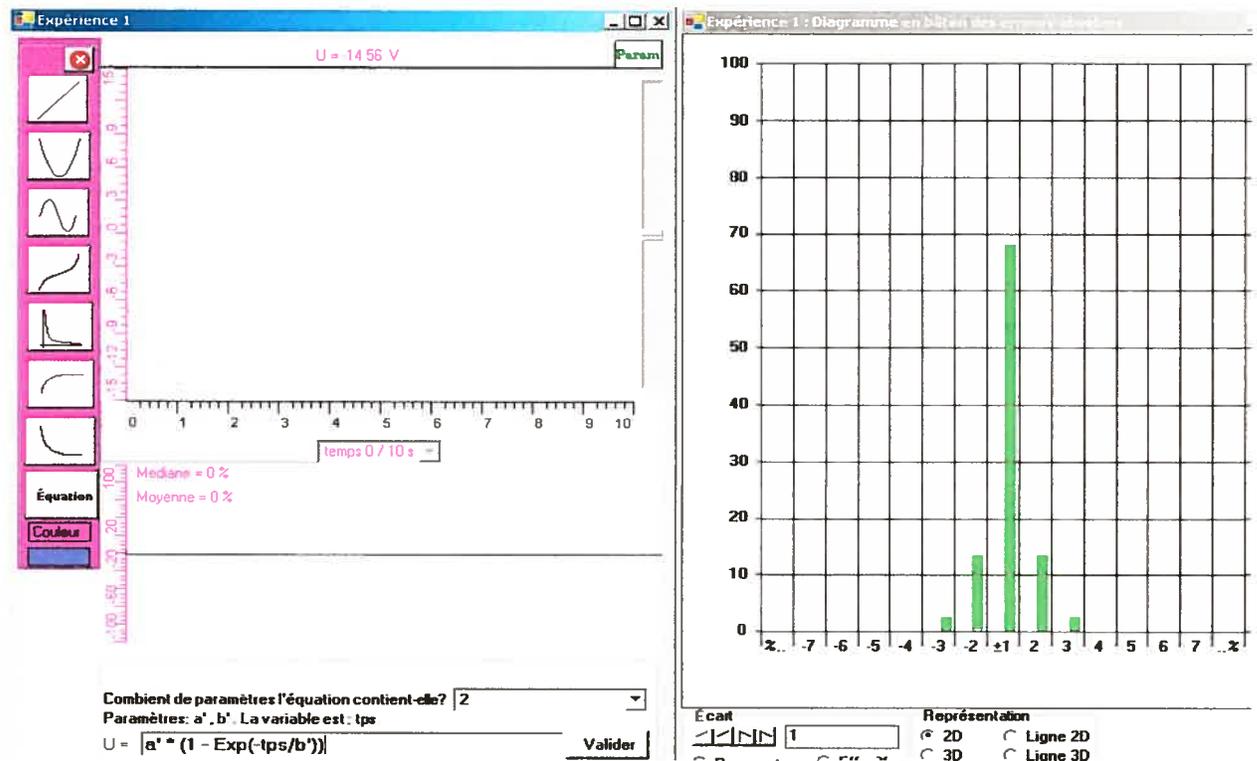
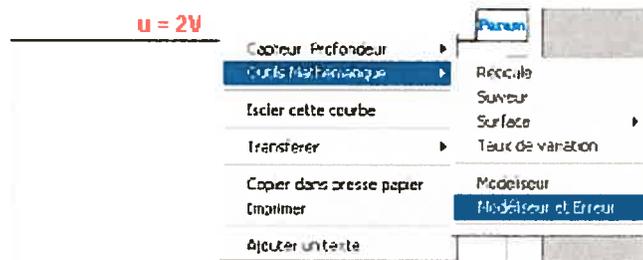
Appeler le professeur afin qu'il puisse vérifier votre graphique.

II. EXPLOITATION :

1. **Modélisation de $u_c(t)$** : Définir u_c en ordonnée et t en abscisse. Ne sélectionner que les points.

Cliquez sur param est décocher l'ampèremètre.

Cliquer sur le bouton du capteur pour choisir le module **modélisation et erreur**



Le module de modélisation est affiché ainsi que le module statistique :

Cliquez sur le bouton 'Équation'. Cliquez sur la liste des paramètres et choisissez deux (pour avoir deux paramètres a' et b')

Veillez, comme la figure suivante l'indique, entrer l'équation $U = a'*(1-\exp(-tps/b'))$ puis cliquer sur le bouton valider

$a'*(1 - \text{Exp}[-tps/b'])$						
a' =	<input type="text" value="0"/>	<table border="1"><tr><td>+</td><td>></td></tr><tr><td>-</td><td><</td></tr></table>	+	>	-	<
+	>					
-	<					
b' =	<input type="text" value="0"/>	<table border="1"><tr><td>+</td><td>></td></tr><tr><td>-</td><td><</td></tr></table>	+	>	-	<
+	>					
-	<					

Veillez maintenant ajuster les coefficients a' et b' pour trouver la meilleure courbe qui passe par le nuage de points

La modélisation donne :

Sauvegarder l'expérience sur le bureau en lui donnant un nom (Cliquez sur le menu sauvegarder)

ANNEXE 2: QUESTIONNAIRE FOURNI AUX EXPERTS

Cher collègue, j'aimerais profiter de votre expertise dans l'utilisation de l'ordinateur, outil de laboratoire en sciences et technologies, pour évaluer un didacticiel d'Expérimentation Assistée par Ordinateur (ExAO). Ce didacticiel veut permettre aux étudiants(es) et élèves de modéliser plus facilement les données expérimentales représentées graphiquement par un ensemble de points par une équation algébrique.

Pourriez-vous s'il vous plaît expérimenter cet environnement d'apprentissage et me donner votre évaluation, vos commentaires et vos suggestions.

J'aimerais notamment avoir des commentaires sur:

- 1) La faciliter d'utilisation du didacticiel,
- 2) L'originalité de la méthode de modélisation,
- 3) Les bénéfices didactiques de celle-ci avec des étudiants au CEGEP et/ou des élèves au secondaire,
- 4) Ses avantages ou inconvénient par rapport à l'utilisation des calculatrices graphiques et des tableurs grapheurs (Ex Excel, Régressi, etc.)
- 5) Utiliseriez-vous cette méthode (Modélisation algébrique) avec vos élèves et étudiants?

Pour ce faire, vous disposez du matériels nécessaires pour prendre des mesures sur :

- 1) Un pendule (Mouvement sinusoïdale sans frottement et avec frottement)
- 2) Un capteur de pression relative pour étudier la relation pression en fonction de la profondeur de l'eau

Attendu que vous n'aurez peut-être pas la disponibilité nécessaire pour effectuer les prises de données, nous vous fournissons sur le CD les fichiers des données obtenues pour ces expériences.

Vous pouvez d'autre part réaliser des expériences originales avec le prototype.

Merci de votre collaboration

Georges Touma

N.B : Nous avons demandé aux deux experts du collège Marie de France de répondre à ces cinq questions après avoir effectué la mise à l'essai empirique avec leurs étudiants.

ANNEXE 3: RÉPONSE DU DEUXIÈME EXPERT (PROFESSEUR EN DIDACTIQUE)

Facilité d'utilisation du didacticiel

Je trouve le logiciel facile à utiliser. L'interface est très visuelle.

Originalité de la méthode de modélisation algébrique

Cette méthode est très originale. À ma connaissance, c'est la première fois qu'une telle méthode est utilisée. C'est une méthode très ingénieuse qui permet de visualiser des distributions statistiques simplement sans avoir besoin de maîtriser préalablement les théories mathématiques concernant ces distributions.

Bénéfices didactiques de celle-ci avec des étudiants au CEGEP et/ou des élèves au secondaire

Cette méthode présente des bénéfices didactiques significatifs parce qu'elle permet de considérer les erreurs et/ou les incertitudes sans recourir au calcul différentiel et intégral. En fait, une méthode analogue, quoique simplifiée, est utilisée depuis plusieurs années au collège Jean-de-Brébeuf. Cette méthode simplifiée n'utilise cependant pas les ordinateurs. On demande aux élèves de trouver au moyen d'une règle les droites de pentes extrêmes passant par tous les points expérimentaux en considérant les incertitudes de ces points. La méthode proposée par M. Touma utilise en plus l'ordinateur pour faire cela ce qui permet d'en étendre significativement la portée aux fonctions non-linéaires et aussi de visualiser les distributions statistiques. En fait, cette nouvelle méthode permet de faire un réel traitement statistique des incertitudes ce que la méthode avec la règle et le papier ne permet évidemment pas.

Avantages ou inconvénient par rapport à l'utilisation des calculatrices graphiques et des tableurs graphesurs (Ex Excel, Régressi, etc.)

Avec les tableurs ou les calculatrices graphiques, il faut habituellement que les élèves s'initient à la programmation de ces nouvelles fonctionnalités, ce qui est trop complexe. La méthode proposée par M. Touma ne nécessite aucune maîtrise préalable de la programmation. Il faut cependant mentionner qu'on pourrait probablement construire une interface équivalente avec Excel que les élèves utiliseraient directement, mais alors la vitesse d'exécution de l'application pourrait être significativement réduite.

Utiliseriez-vous cette méthode (Modélisation algébrique) avec vos élèves et étudiants?

Oui, dans le contexte de l'enseignement de la physique au collégial, et plus particulièrement dans le contexte d'une expérimentation au laboratoire faisant intervenir l'ExAO.

ANNEXE 4: RÉPONSE DU TROISIÈME EXPERT (PROFESSEUR EN SCIENCES AU SECONDAIRE)

Facilité d'utilisation du didacticiel

L'interface utilisateur du logiciel comporte beaucoup d'information sur la même fenêtre. Par conséquent, elle est un peu déboussolante au premier abord. Mais, dès que celle-ci a été apprivoisée (quelques minutes suffisent) elle se révèle être très efficace justement grâce à la grande quantité d'information qu'elle procure en un seul coup d'œil. Plusieurs facilitateurs ont été intégrés à l'interface afin de rendre plus efficace son utilisation. En particulier, les couleurs des points expérimentaux sélectionnés et les bandes de références pour la courbe normale. L'interface est très visuelle, ce qui facilite son utilisation

Originalité de la méthode de modélisation algébrique

La méthode utilisée se distingue par l'utilisation de concepts statistiques élémentaires (courbe normale) et se révèle très efficace.

Bénéfices didactiques de celle-ci avec des élèves du secondaire

Cette méthode qui permet d'obtenir une relation mathématique à partir de points expérimentaux possède l'avantage, sur le plan didactique, d'offrir de très bons résultats de façon transparente tout en impliquant l'élève dans chacune des étapes de la méthode. En effet, contrairement à Excel qui nous permet d'obtenir une relation sans avoir aucune idée de sa provenance, avec ce logiciel, l'élève peut voir et comprendre d'où proviennent les équations obtenues et leurs précisions qui ne dépendent que de la rigueur de l'élève dans l'exécution de la méthode.

Avantages ou inconvénients par rapport à l'utilisation des calculatrices graphiques et des tableurs grapheurs

La transparence du logiciel ainsi que l'implication de l'élève dans le processus de modélisation sont ses principaux avantages comparativement à Excel ou Régressi. Il permet à l'élève d'être plus actif dans son apprentissage.

Le seul désavantage pourrait être le temps que nécessite la méthode qui est, évidemment, plus longue que l'utilisation d'Excel ou Régressi. Mais, ce désavantage est largement compensé par les avantages qu'elle offre et la précision de la relation obtenue.

Utiliseriez-vous cette méthode avec vos élèves?

Pour des élèves qui n'ont jamais eu de cours de statistiques, cette méthode oblige l'enseignant à déborder de son programme d'étude pour présenter de nouveaux outils mathématiques (signification de la courbe normale, etc.) nécessaire à l'élève afin d'utiliser adéquatement la méthode. Au secondaire, l'utilisation de cette méthode est possible au 5^e secondaire en investissant un peu de temps afin d'expliquer le logiciel aux élèves. Par contre, je crois qu'elle est difficilement utilisable pour les niveaux inférieurs au 5^e secondaire.

ANNEXE 5: EXPERT DANS LE DOMAINE DES REGRESSIONS LINÉAIRES ET NON LINÉAIRES

Montmagny 22 décembre 2005

M. Georges Touma
Université de Montréal

Objet de la lettre :

Appréciation et opinions sur la méthode que vous avez développée pour déterminer la «meilleure courbe» s'ajustant à une série de mesures illustrées dans un graphique de type « y vs x ».

Pour débiter j'aimerais vous remercier d'être venu à Montmagny pour me rencontrer et me faire connaître votre méthode.

En sciences expérimentales, la question de trouver la meilleure fonction décrivant le comportement de nos mesures revient souvent, elle est centrale dans plusieurs domaines relevant de la physique et de l'ingénierie. Pour l'aborder, on passe presque toujours par une représentation graphique dans laquelle la meilleure fonction devient la meilleure courbe.

On se demande donc comment déterminer cette meilleure courbe ?

Le problème est de taille, souvent on dit à nos élèves que la meilleure courbe doit avoir plusieurs caractéristiques :

- elle doit passer par un maximum de points;
- elle doit être placée de telle sorte que les points soient équilibrés de part et d'autre.

Comme vous l'avez mentionné, il est plus facile d'aborder la question de la meilleure courbe avec des fonctions du premier degré donnant une droite.

Pour déterminer la meilleure droite, traditionnellement, on utilise la méthode des moindres carrés : minimiser la somme des écarts aux carrés. On trouve alors une formule dont la démonstration requiert la compréhension des dérivées partielles. Cette méthode est très répandue, en fait, elle est partout (Excel, calculatrices...). Au point de vue pédagogique, pour nos élèves, l'utilisation des résultats tirés de cette méthode relève quasi de la « magie ». Il est certain que nos élèves, encore plus s'ils n'ont pas vu le calcul différentiel, ne comprennent pas pourquoi ça marche! Nos élèves comprennent l'objectif (trouver la meilleure droite), **ils utilisent ensuite des formules mystérieuses**, ce n'est qu'à la fin qu'ils peuvent vérifier si les résultats équilibrent les points de part et d'autre de la meilleure droite ou encore si les écarts s'insèrent dans un histogramme en forme de Gaussienne.

Un premier défaut de la méthode des moindres carrés se situe au niveau pédagogique: nos élèves la voient comme une méthode magique qu'ils ne comprennent pas.

Son deuxième défaut se situe au niveau de ses capacités, elle ne peut servir qu'à déterminer une droite.

Votre méthode n'a pas ces défauts. Au contraire, ses forces sont justement d'une part ses qualités pédagogiques et d'autre part sa capacité à déterminer quasiment n'importe quelle « meilleure courbe ».

Au point de vue pédagogique, votre méthode, est très riche.

Elle permet :

- * d'une part, de préciser quelles sont les caractéristiques de la meilleure courbe
- * et d'autre part de construire cette meilleure courbe de telle sorte qu'elle respecte ces caractéristiques.

La façon dont vous avez configuré l'écran permet à l'élève de comprendre ce qu'il fait :

- il décide d'abord du type de fonction dont il a besoin
- ensuite (grâce à vos points) il commence par placer la meilleure courbe pour qu'elle passe par un maximum de points.
- il visualise les écarts qu'il tente de minimiser grâce à votre deuxième fenêtre
- finalement, il s'assure que, non seulement la somme des écarts soient nuls mais aussi que ces écarts s'insèrent dans un histogramme en forme de Gaussienne.

Au point de vue de ces capacités, votre méthode est puissante puisqu'elle permet de modéliser une fonction contenant jusqu'à six facteur.

Votre méthode est donc très intéressante et mérite d'être largement utilisée partout où il faut trouver la meilleure fonction décrivant le comportement d'une série de mesures.

Gilles Boisclair

Suggestions :

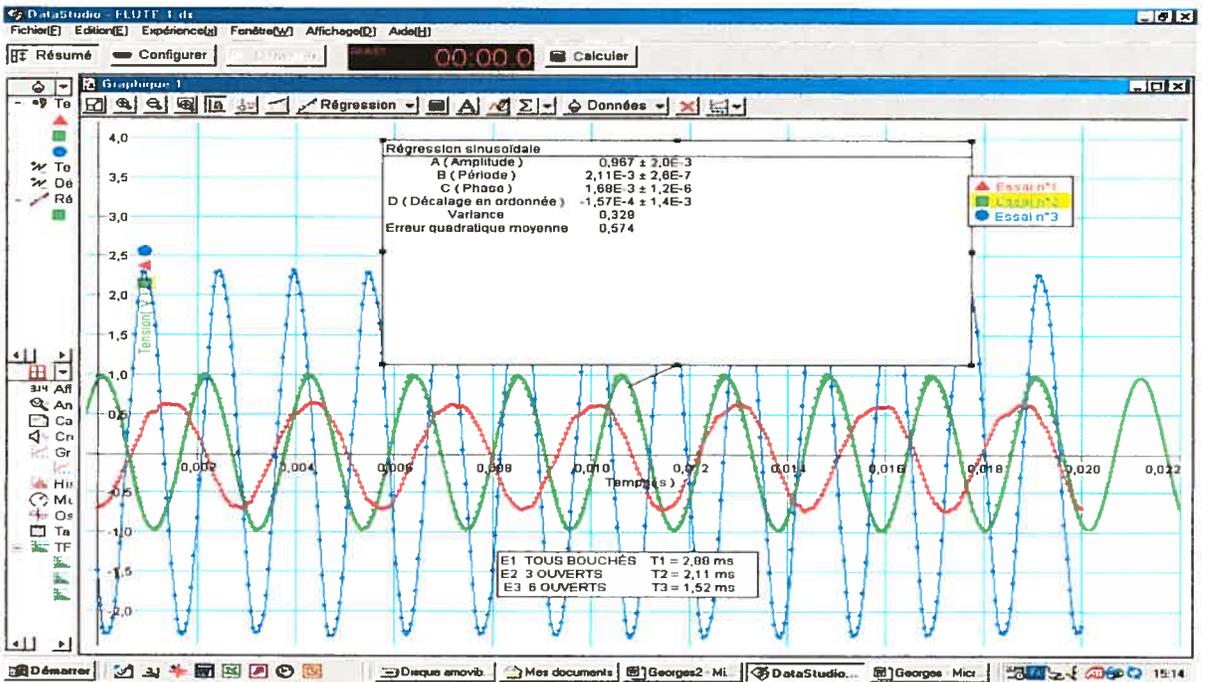
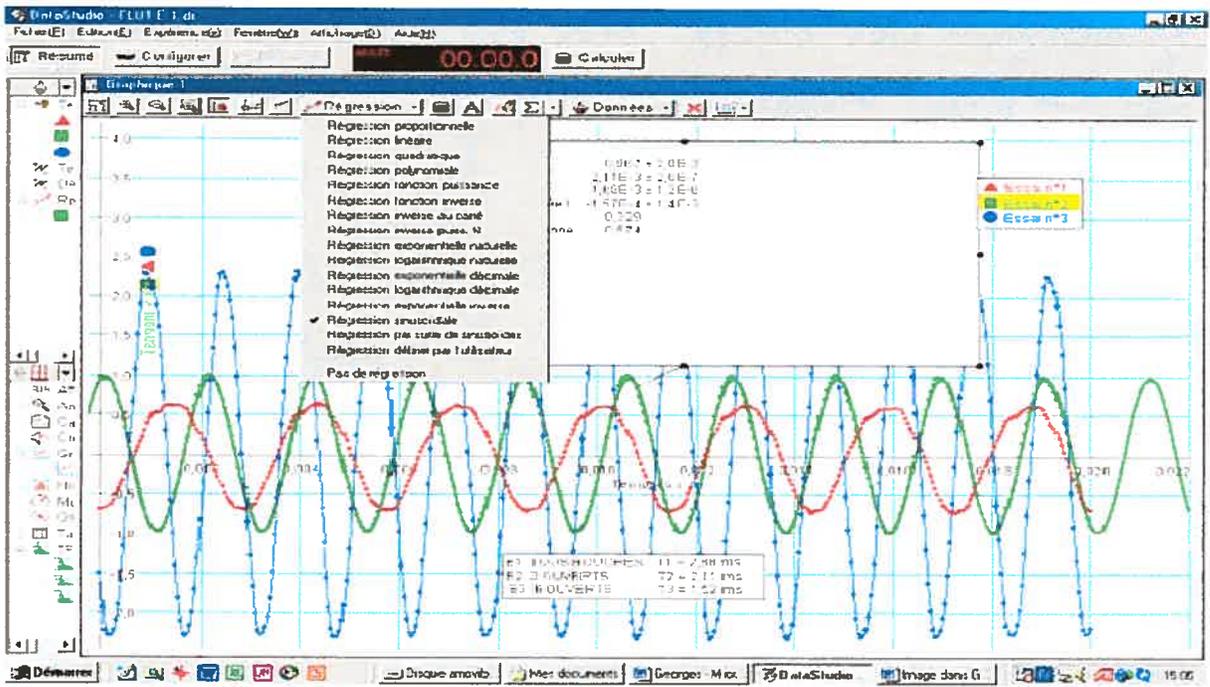
Ma première suggestion vise à permettre à tous d'apprécier et d'utiliser votre méthode. Pour ce, il faudrait qu'on puisse importer dans votre programme des données venant d'Excel.

Ma deuxième suggestion est que vous compareriez les résultats obtenus de votre méthode avec ceux tirés d'Excel donnant certaines courbes de tendances.

Ma dernière suggestion est au niveau de l'incertitude sur les paramètres de la meilleure courbe. Vous savez qu'une des grandes forces de la méthode des moindres carrés est de permettre de trouver des formules calculant l'incertitude sur les variables en ordonnée, ainsi que l'incertitude sur la pente et l'ordonnée à l'origine. Je ne sais pas si c'est possible, mais il faudrait avoir aussi l'incertitude sur la pente et l'ordonnée à l'origine avec votre méthode. D'autre part, quand on utilise Data Studio et qu'on demande une régression, le logiciel nous renvoie les paramètres de la régression et aussi une incertitude (je ne sais pas comment les calculer). Je crois donc que votre défi ultime est aussi de pouvoir trouver ces fameuses incertitudes.

Ci joint deux copies d'écran tirées de Data Studio :

Sur la première vous voyez les types de régression offerts dont un défini par l'utilisateur, Sur la deuxième les résultats accompagnés de \pm .



ANNEXE 6: ANALYSE DES DONNÉES QUI SONT CONENUES DANS LE FICHER .XAO DES SUJETS

6.1 Analyse des données du groupe 1

6.1.1 Modélisation algébrique par le chercheur des données du groupe 1

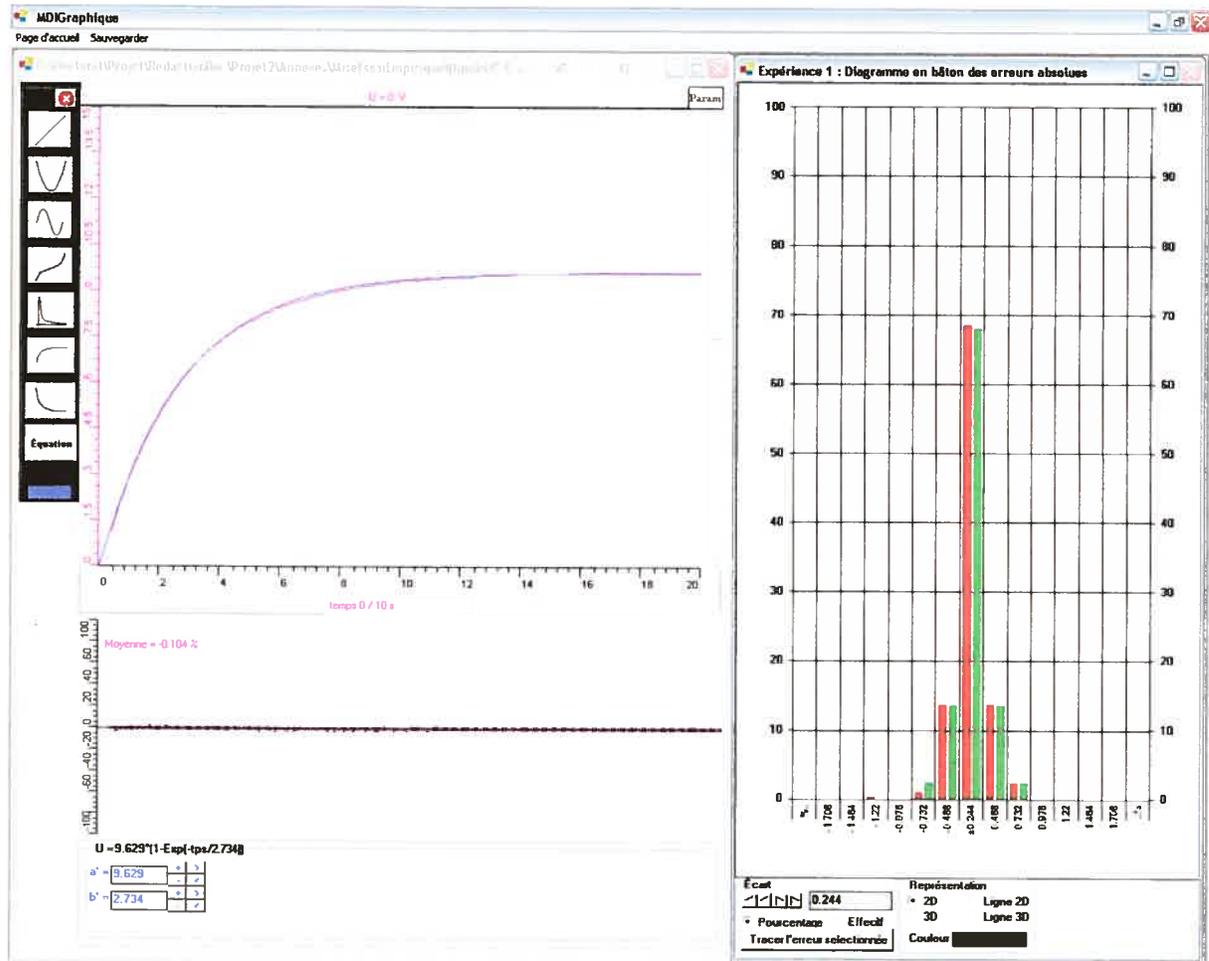


Figure 56 : Modélisation algébrique par le chercheur des données du groupe 1

6.1.2 Modélisation algébrique du groupe 1 avec la méthode RGS

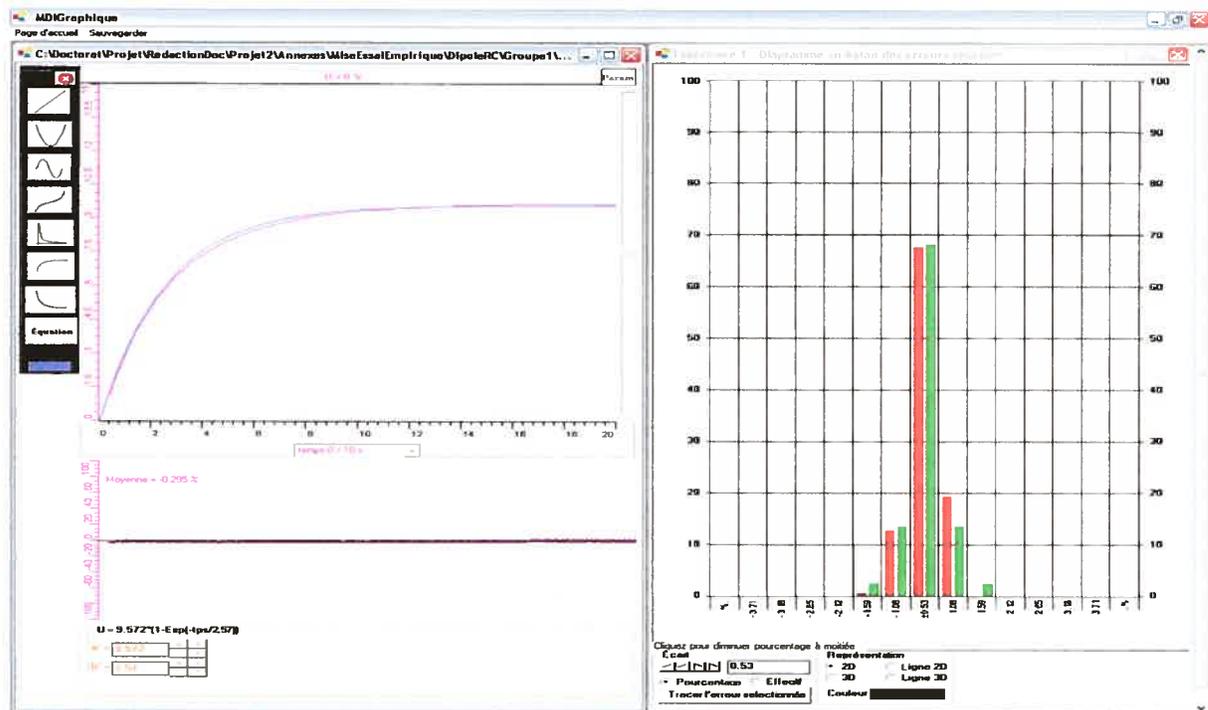


Figure 57 : Modélisation algébrique du groupe 1 avec la méthode RGS

6.1.3 Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 1

	Modélisation effectuée par le groupe 1	Modélisation effectuée par le Chercheur
Équation	$U = 9.572 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 2.57))$	$U = 9.629 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 2.734))$
Incertitude	$0.53 * 3 = 1.59\%$ de l'échelle (0à 15V)	$0.244 * 3 = 0.732\%$ de l'échelle (0à 15V)
Distribution	Non symétrique	Normale

Tableau 3: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 1

6.1.4 Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 1

Étapes du processus de modélisation algébrique	Résultats
1 -Utilisation du graphique	Réussi
2 - Utilisation de la fenêtre des écarts	Réussi
3 - Utilisation de la fenêtre de la distribution des écarts	Réussi
4 - Tenu compte du 68%	Réussi
5 - Tenu compte de la distribution symétrique	Non réussi
6 - Tenu compte de la distribution normale	Non Réussi
7 - Choix de l'incertitude	Non Réussi

Tableau 4: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 1

6.2 Analyse des données du groupe 2

6.2.1 Modélisation algébrique des données du groupe 2 effectuée par le chercheur

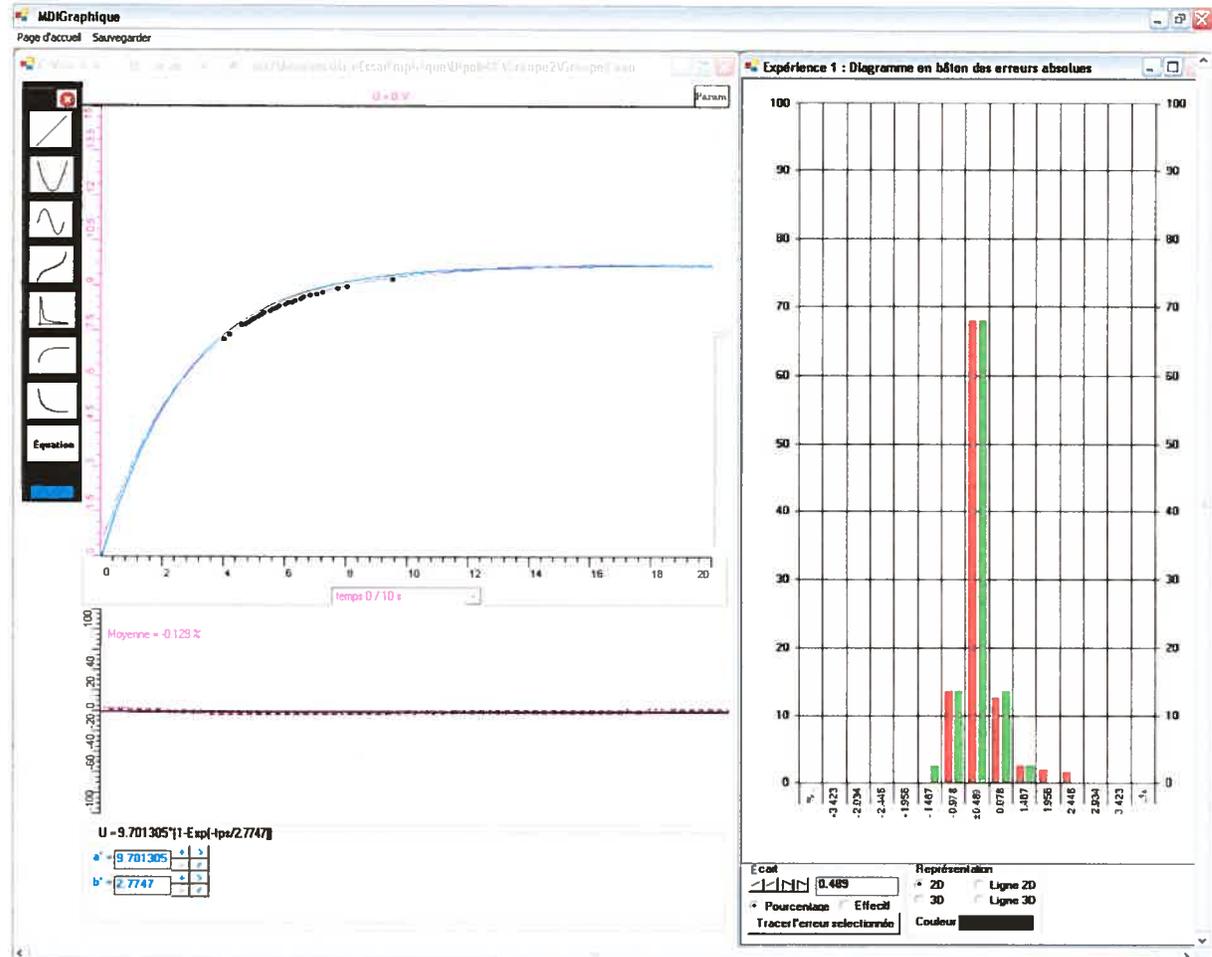


Figure 58 : Modélisation algébrique des données du groupe 2 effectuée par le chercheur

6.2.2 Modélisation algébrique du groupe 2 avec la méthode RGS

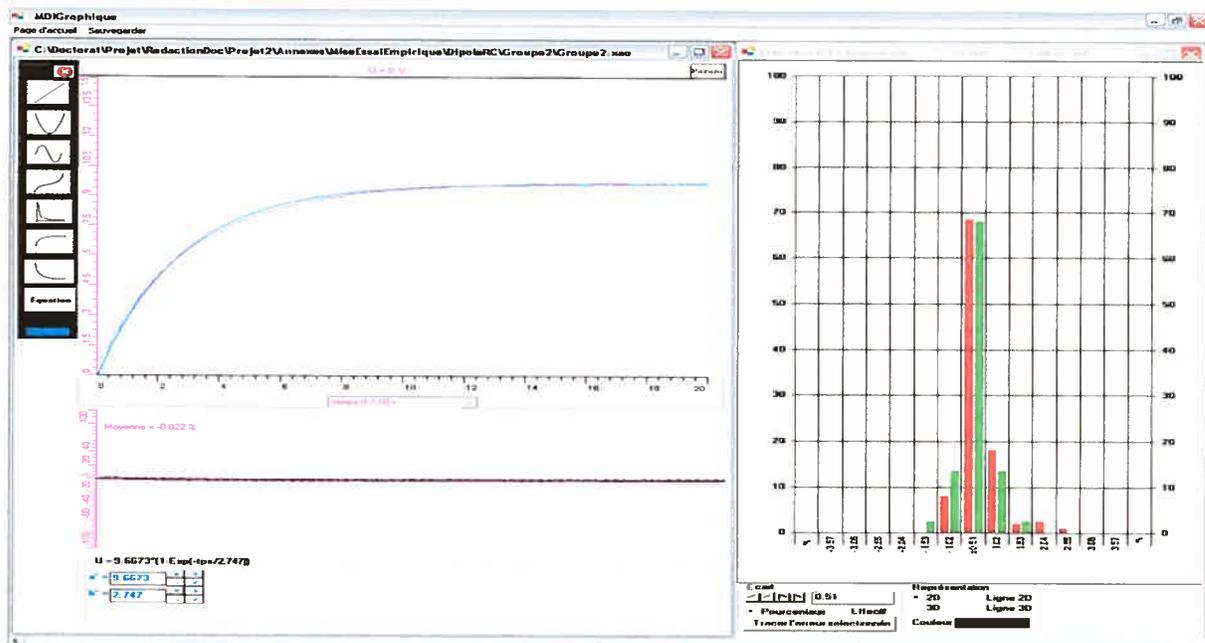


Figure 59 : Modélisation algébrique du groupe 2 avec la méthode RGS

6.2.3 Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 2

	Modélisation effectuée par le groupe 2	Modélisation effectuée par le chercheur
Équation	$U = 9.6673 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 2.747))$	$U = 9.701305 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 2.7747))$
Incertitude	$0.51 * 3 = 1.53 \%$ de l'échelle (0 à 15V)	$0.409 * 3 = 1.227 \%$ de l'échelle (0 à 15V)
Distribution	Non symétrique	Symétrique

Tableau 5: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 2

6.2.4 Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 2

Étapes du processus de modélisation algébrique	Résultats
1 - Utilisation du graphique	Réussi
2 - Utilisation de la fenêtre des écarts	Réussi
3 - Utilisation de la fenêtre de la distribution des écarts	Réussi
4 - Tenu compte du 68%	Réussi
5 - Tenu compte de la distribution symétrique	Non réussi
6 - Tenu compte de la distribution normale	Non Réussi
7 - Choix de l'incertitude le plus petite	Non Réussi

Tableau 6: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 2

6.3 Analyse des données du groupe 3

6.3.1 Modélisation algébrique des données du groupe 3 effectuée par le chercheur

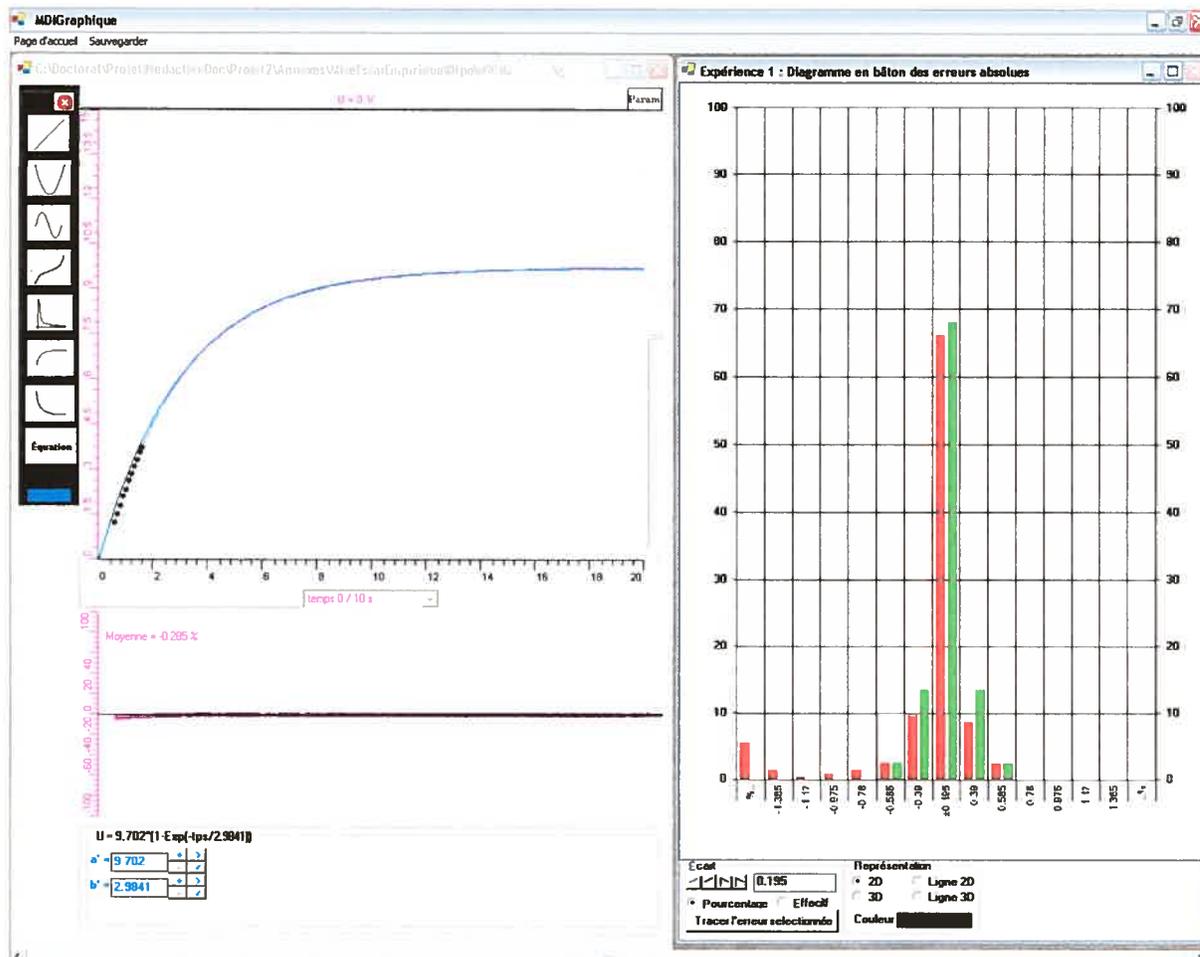


Figure 60 : Modélisation algébrique des données du groupe 3 effectuée par le chercheur

6.3.2 Modélisation algébrique du groupe 3 avec la méthode RGS

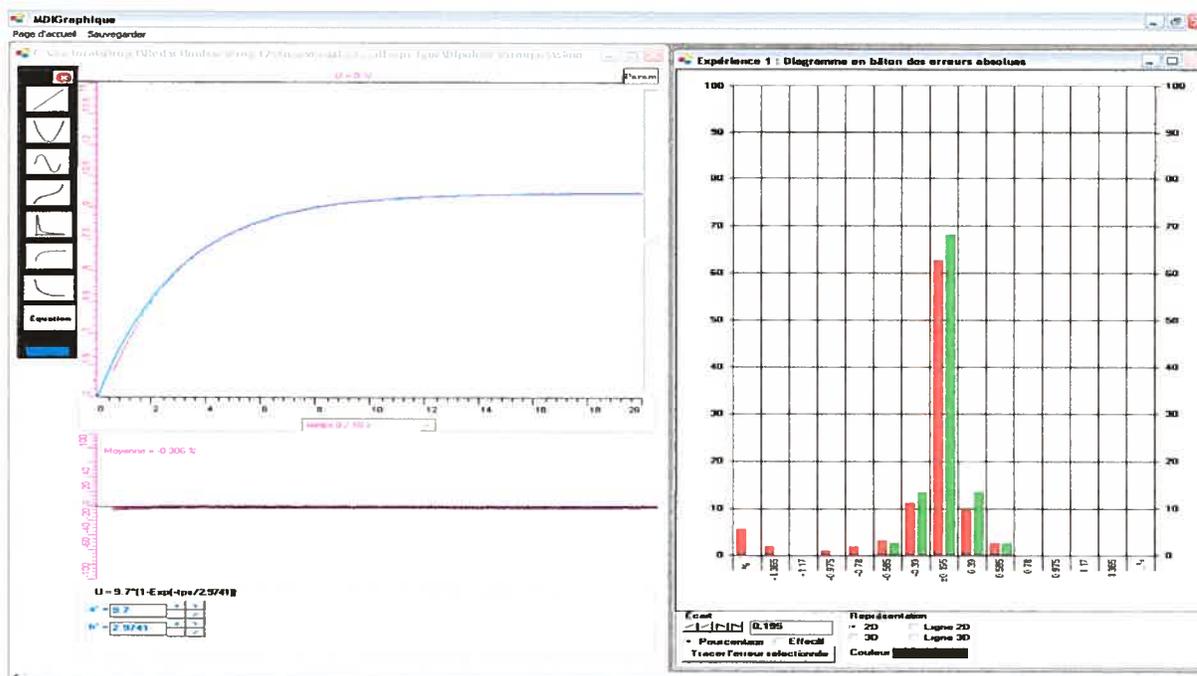


Figure 61 : Modélisation algébrique du groupe 3 avec la méthode RGS

6.3.3 Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 3

	Modélisation effectuée par le groupe 3	Modélisation effectuée par le chercheur
Équation	$U = 9.7 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 2.9741))$	$U = 9.702 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 2.9841))$
Incertitude	$0.195 * 3 = 0.585 \%$ de l'échelle (0 à 15V)	$0.195 * 3 = 0.585 \%$ de l'échelle (0 à 15V)
Distribution	Normale	Normale

Tableau 7: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 3

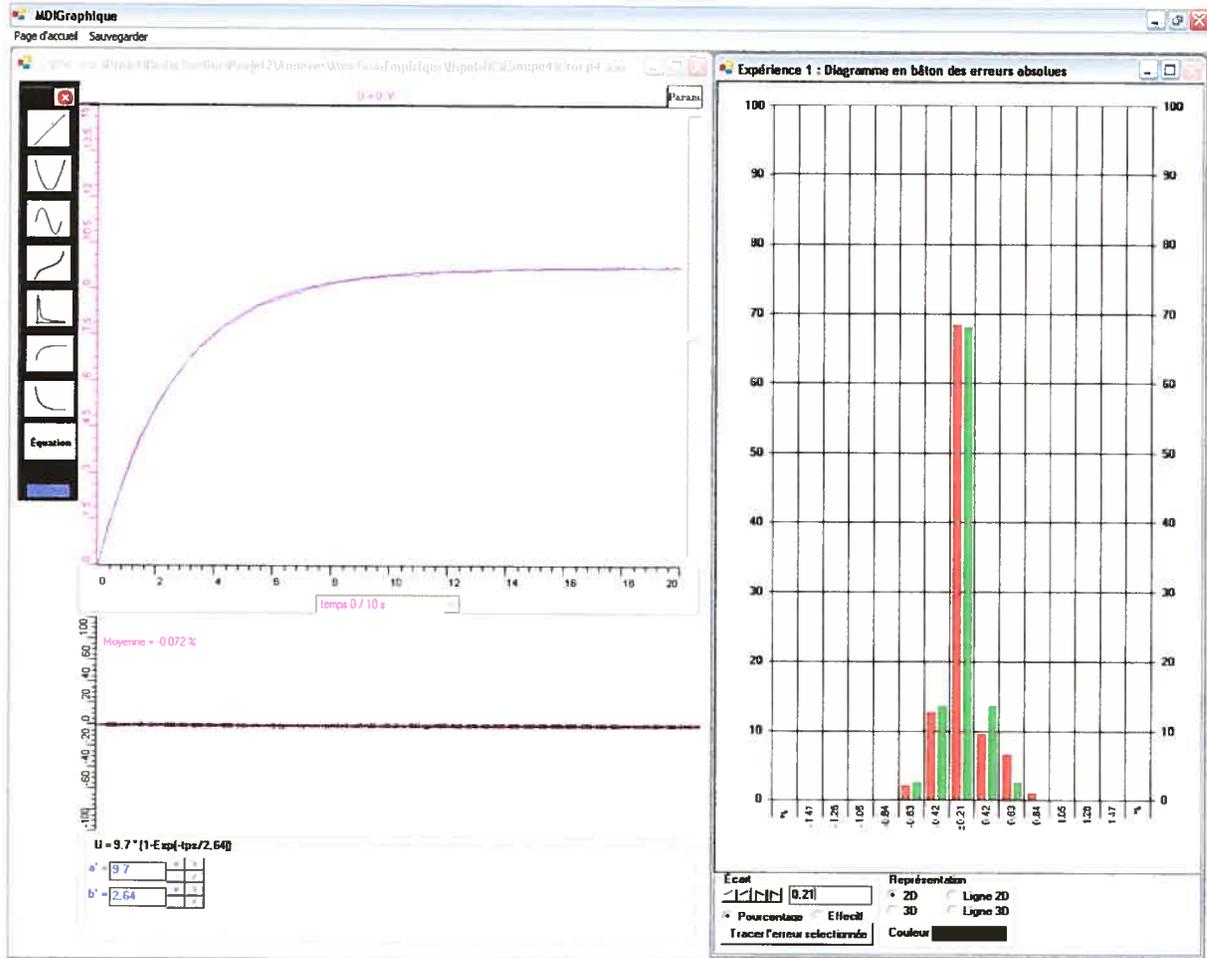
6.3.4 Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 3

Étapes du processus de modélisation algébrique	Résultats
1 - Utilisation du graphique	Réussi
2 - Utilisation de la fenêtre des écarts	Réussi
3 - Utilisation de la fenêtre de la distribution des écarts	Réussi
4 - Tenu compte du 68%	Réussi
5 - Tenu compte de la distribution symétrique	réussi
6 - Tenu compte de la distribution normale	Réussi
7 - Choix de l'incertitude	Réussi

Tableau 8: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 3

6.4 Analyse de données du groupe 4

6.4.1 Modélisation algébrique des données du groupe 4 effectuée par le chercheur



6.4.2 Modélisation algébrique du groupe 4 avec la méthode RGS

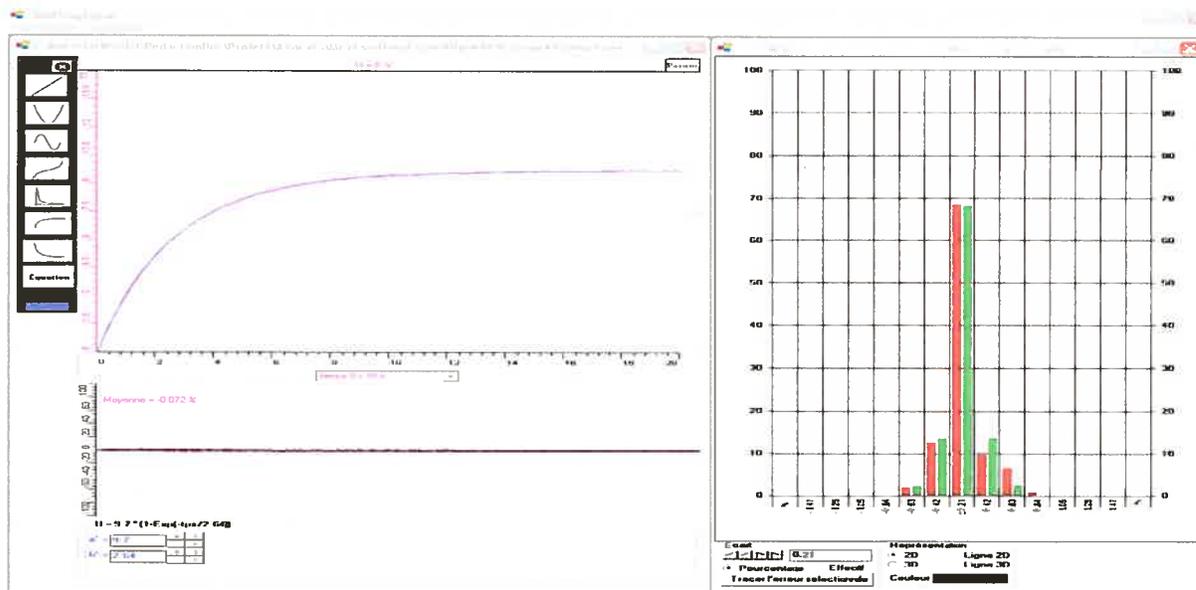


Figure 63 : Modélisation algébrique du groupe 4 avec la méthode RGS

6.4.3 Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 4

	Modélisation effectuée par le groupe 4	Modélisation effectuée par le chercheur
Équation	$U = 9.7 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 2.64))$	$U = 9.7 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 2.64))$
Incertitude	$0.21 * 3 = 0.63 \%$ de l'échelle (0 à 15V)	$0.21 * 3 = 0.63 \%$ de l'échelle (0 à 15V)
Distribution	Normale	Normale

Tableau 9: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 4

6.4.4 Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 4

Étapes du processus de modélisation algébrique	Résultats
1 - Utilisation du graphique	Réussi
2 - Utilisation de la fenêtre des écarts	Réussi
3 - Utilisation de la fenêtre de la distribution des écarts	Réussi
4 - Tenu compte du 68%	Réussi
5 - Tenu compte de la distribution symétrique	Réussi
6 - Tenu compte de la distribution normale	Réussi
7 - Choix de l'incertitude	Réussi

Tableau 10: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 4

6.5 Analyse des données du groupe 5

6.5.1 Modélisation algébrique des données du groupe 5 effectuée par le chercheur

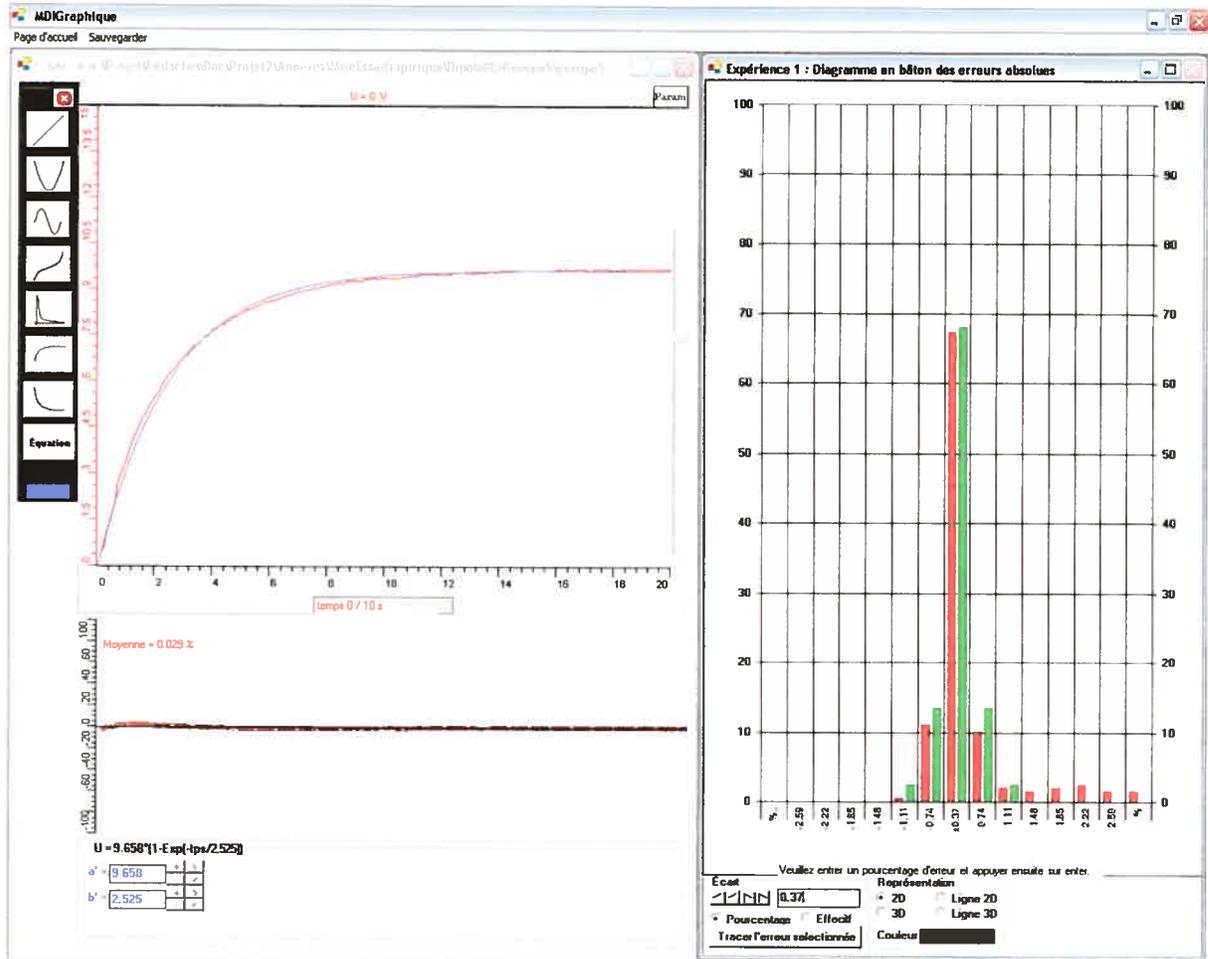


Figure 64 : Modélisation algébrique des données du groupe 5 effectuée par le chercheur

6.5.2 Modélisation algébrique du groupe 5 avec la méthode RGS

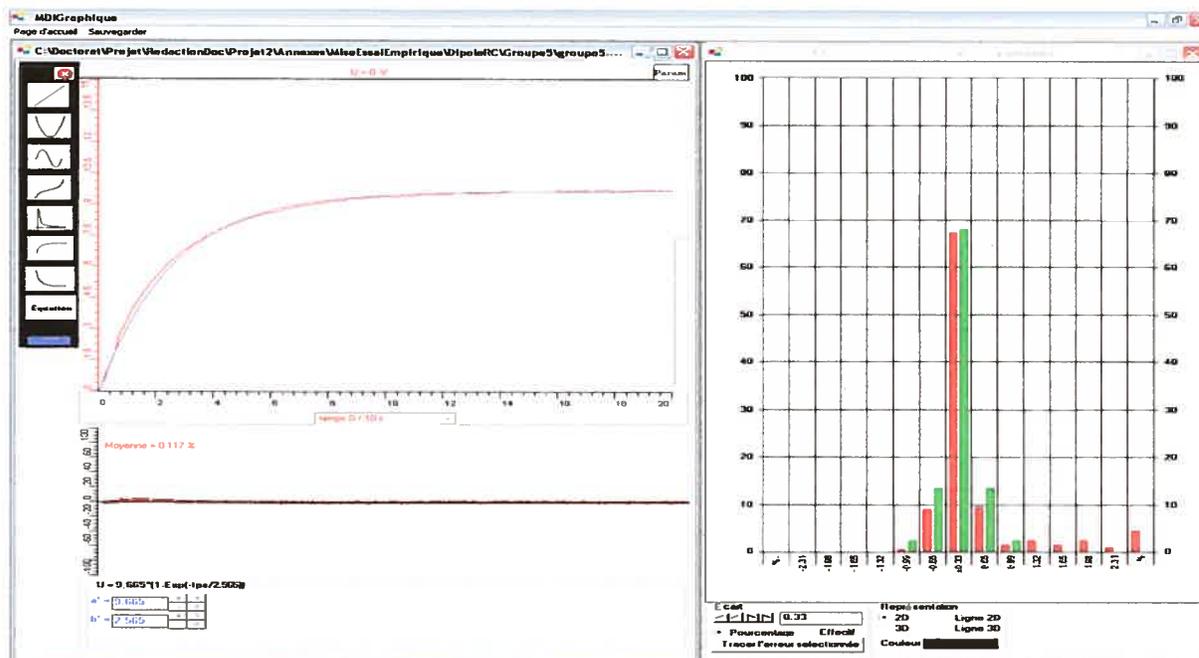


Figure 65 : Modélisation algébrique du groupe 5 avec la méthode RGS

6.5.3 Tableau comparatif de la modélisation algébrique du groupe 5 et du chercheur

	Modélisation effectuée par le groupe 5	Modélisation effectuée par le chercheur
Équation	$U = 9.665 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 2.565))$	$U = 9.658 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 2.525))$
Incertitude	$0.33 * 3 = 0.99 \%$ de l'échelle (0 à 15V)	$0.37 * 3 = 1.11 \%$ de l'échelle (0 à 15V)
Distribution	Normale	Normale

Tableau 11: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 5

6.5.4 Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 5

Étapes du processus de modélisation algébrique	Résultats
1 - Utilisation du graphique	Réussi
2 - Utilisation de la fenêtre des écarts	Réussi
3 - Utilisation de la fenêtre de la distribution des écarts	Réussi
4 - Tenu compte du 68%	Réussi
5 - Tenu compte de la distribution symétrique	Réussi
6 - Tenu compte de la distribution normale	Réussi
8 - Choix de l'incertitude	Non Réussi

Tableau 12: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 5

6.6 Analyse des données du groupe 6

6.6.1 Modélisation des données du groupe 6 effectuée par le chercheur

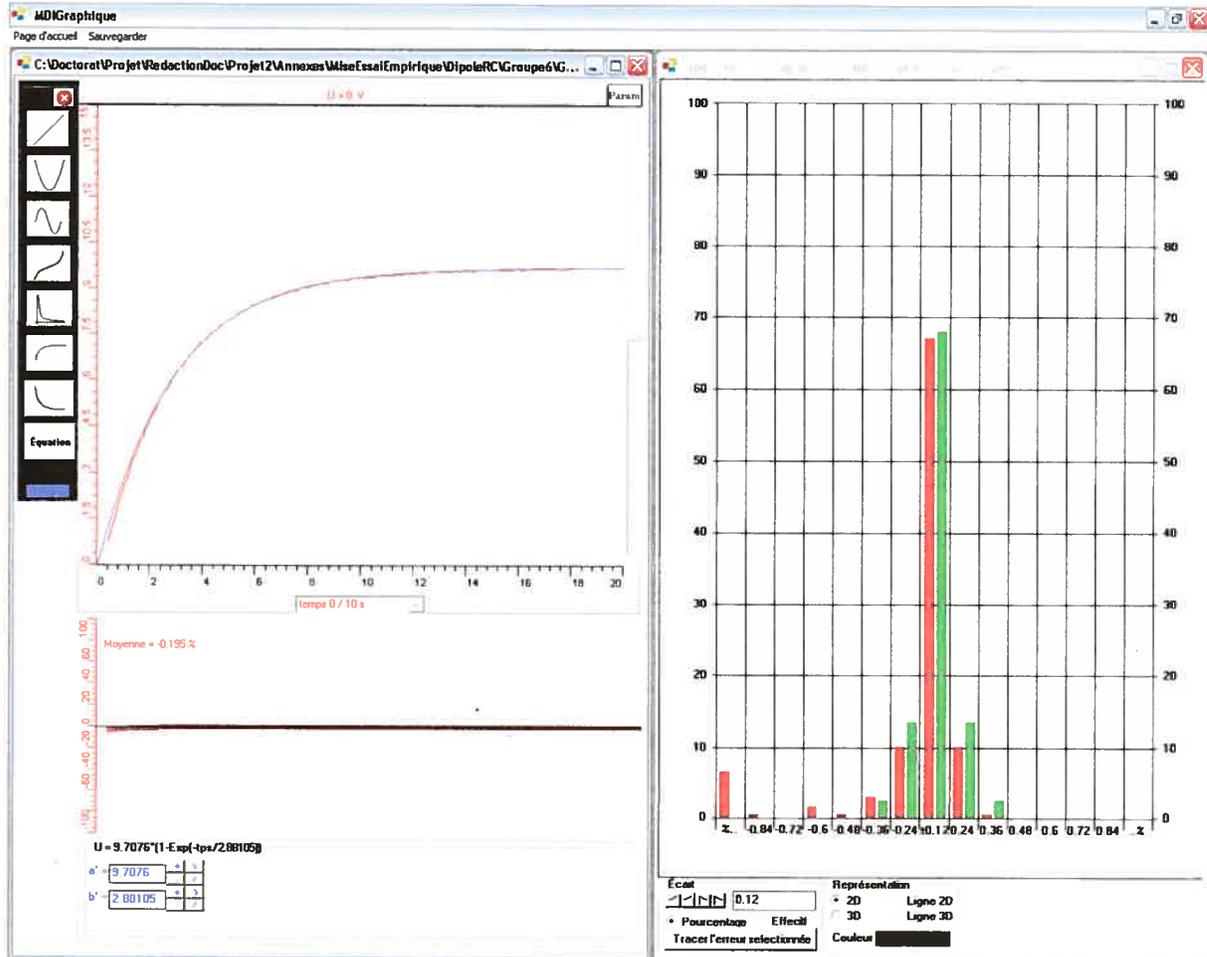


Figure 66 : Modélisation des données du groupe 6 effectuée par le chercheur

6.6.2 Modélisation algébrique du groupe 6 avec RGS

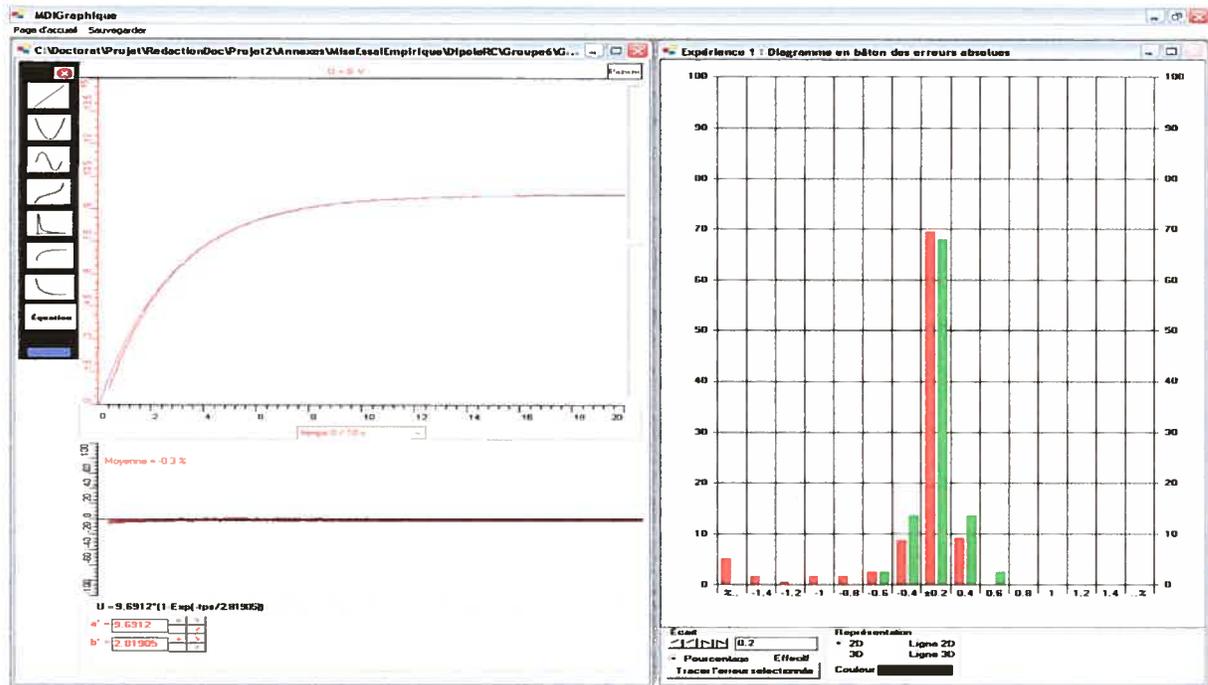


Figure 67 : Modélisation algébrique du groupe 6 avec RGS

6.6.3 Tableau comparatif de la modélisation algébrique de groupe 6 et du chercheur

	Modélisation effectuée par le groupe 6	Modélisation effectuée par le chercheur
Équation	$U = 9.6912 \cdot (1 - \text{Exp}(- \text{tps} / 2.81905))$	$U = 9.7076 \cdot (1 - \text{Exp}(- \text{tps} / 2.88105))$
Incertitude	$0.2 \cdot 3 = 0.6 \%$ de l'échelle (0 à 15V)	$0.12 \cdot 3 = 0.36 \%$ de l'échelle (0 à 15V)
Distribution	Symétrique	Normale

Tableau 13: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 6

6.6.4 Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 6

Étapes du processus de modélisation algébrique	Résultats
1 - Utilisation du graphique	Réussi
2 - Utilisation de la fenêtre des écarts	Réussi
3 - Utilisation de la fenêtre de la distribution des écarts	Réussi
4 - Tenu compte du 68%	Réussi
5 - Tenu compte de la distribution symétrique	Réussi
6 - Tenu compte de la distribution normale	Réussi
7 - Choix de l'incertitude	Non Réussi

Tableau 14: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 6

6.7 Analyse des données du groupe 7

6.7.1 Modélisation par le chercheur des données du groupe 7 effectuée par le chercheur

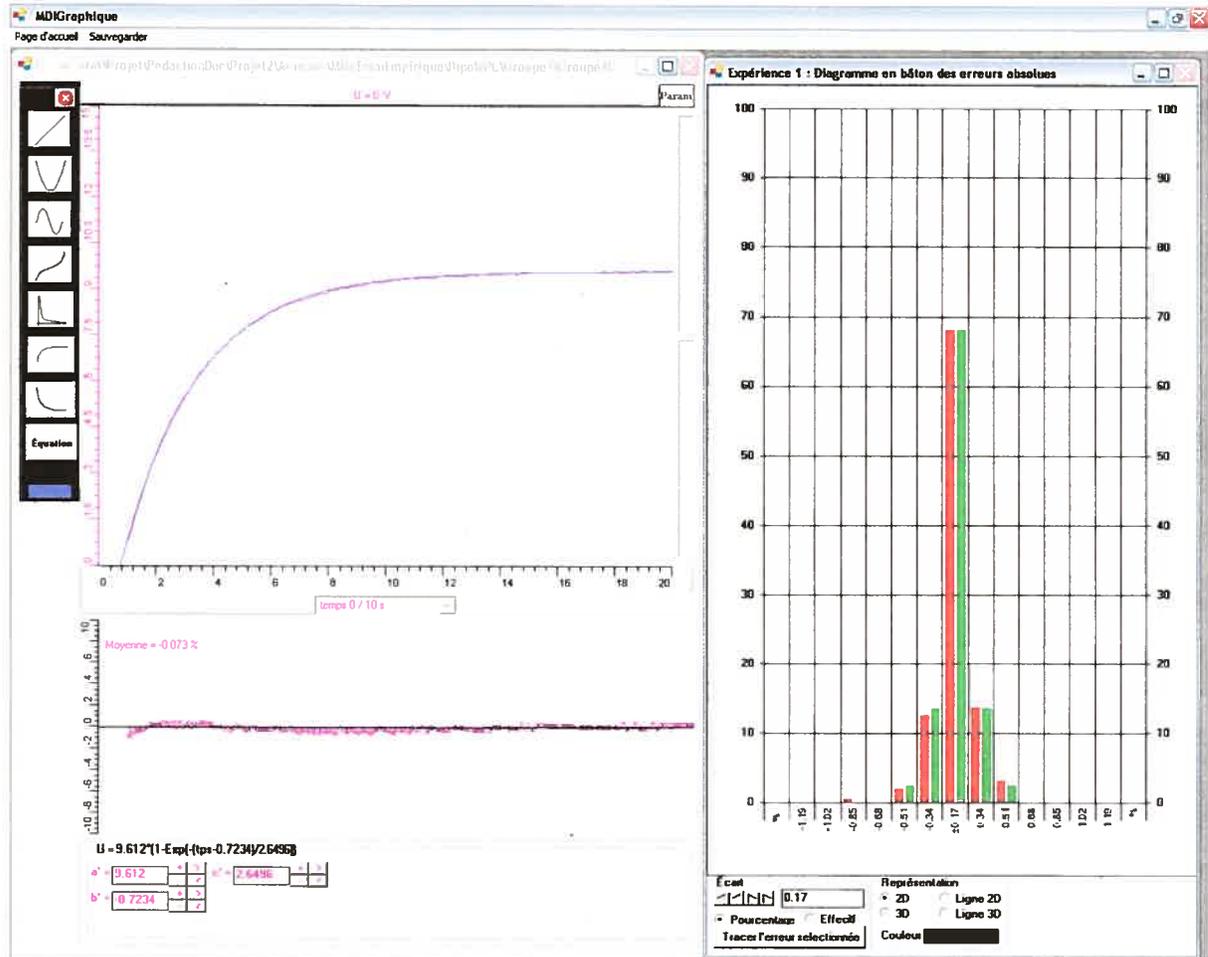


Figure 68 : Modélisation par le chercheur des données du groupe 7 effectuée par le chercheur

6.7.2 Modélisation algébrique du groupe 7 avec la méthode RGS

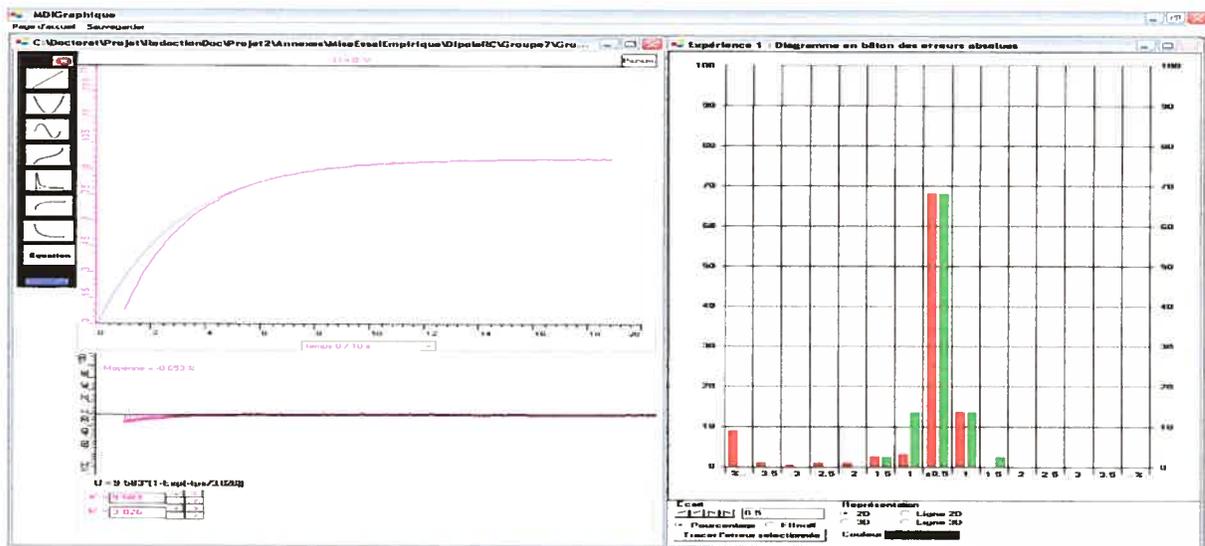


Figure 69 : Modélisation algébrique du groupe 7 avec la méthode RGS

6.7.3 Tableau comparatif de la modélisation algébrique du groupe 7 et du chercheur

	Modélisation effectuée par le groupe 7	Modélisation effectuée par le chercheur
Équation	$U = 9.583 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 3.026))$	$U = 9.612 * (1 - \text{Exp}(-(\text{tps} - 0.7234) / 2.6496))$
Incertitude	$0.5 * 3 = 1.5 \%$ de l'échelle (0 à 15V)	$0.17 * 3 = 0.51 \%$ de l'échelle (0 à 15V)
Distribution	Non symétrique ¹⁴	Normale

Tableau 15: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 7

6.7.4 Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 7

Étapes du processus de modélisation algébrique	Résultats
1 - Utilisation du graphique	Réussi
2 - Utilisation de la fenêtre des écarts	Réussi
3 - Utilisation de la fenêtre de la distribution des écarts	Réussi
4 - Tenu compte du 68%	Réussi
5 - Tenu compte de la distribution symétrique	Non Réussi
6 - Tenu compte de la distribution normale	Non Réussi
7 - Choix de l'incertitude	Non Réussi

Tableau 16: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 7

¹⁴ Dans ce cas il est impossible de distribuer les écarts normalement parce que le graphique ne commence pas à l'origine des abscisses. Le groupe a déclenché l'acquisition des données quelques secondes avant qu'il commence à charger le condensateur.

6.8 Analyse des données du groupe 8

6.8.1 Modélisation algébrique des données du groupe 8 effectuée par le chercheur

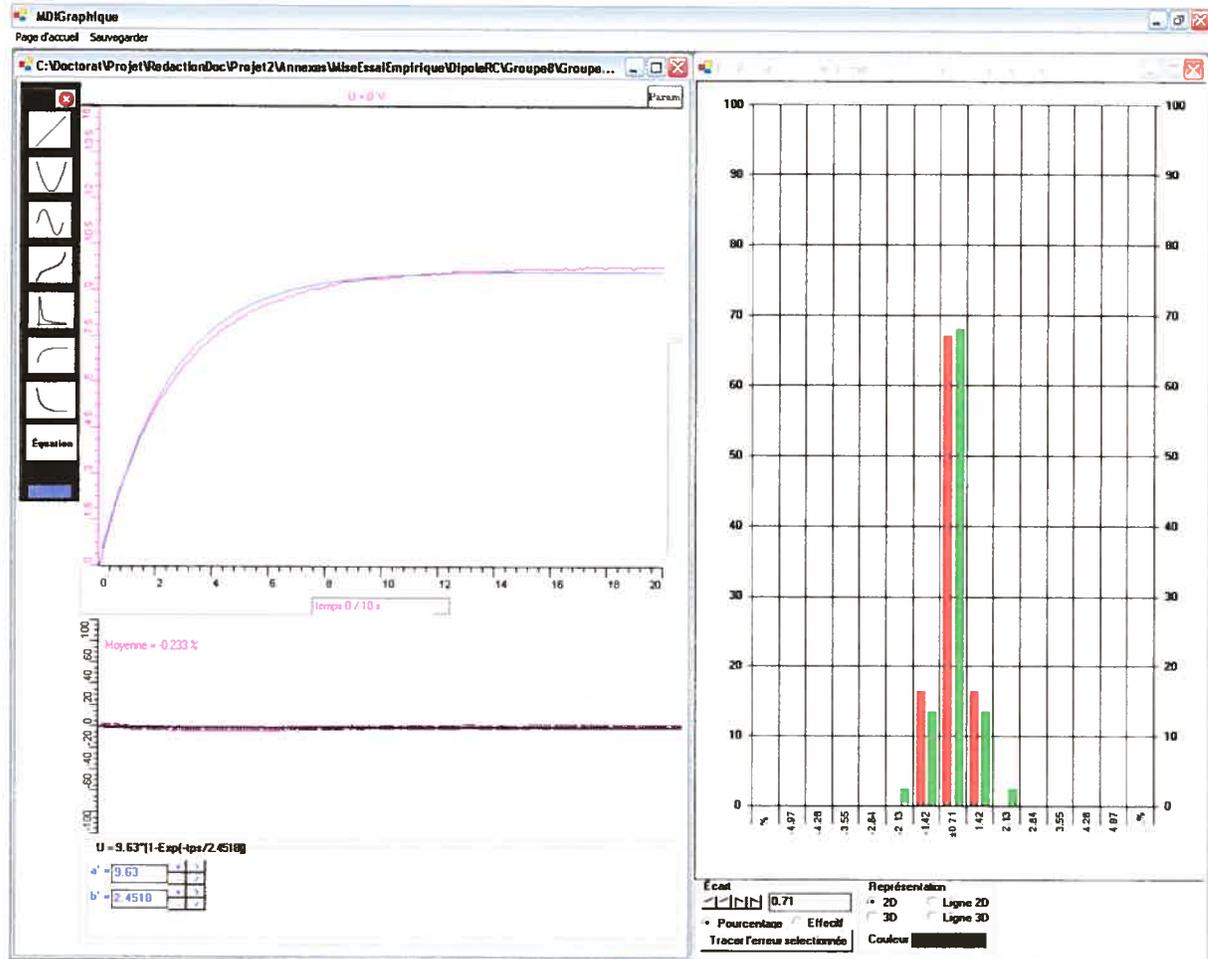


Figure 70 : Modélisation algébrique des données du groupe 8 effectuée par le chercheur

6.8.2 Modélisation algébrique des données du groupe 8 avec la méthode RGS

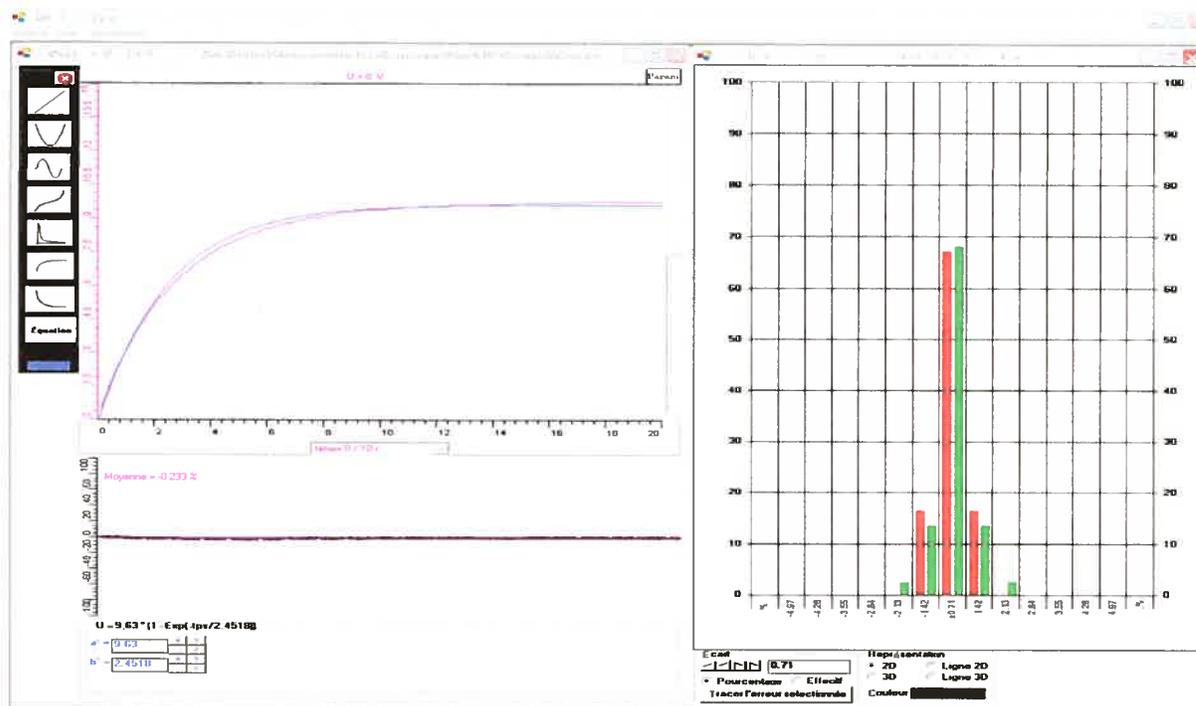


Figure 71 : Modélisation algébrique des données du groupe 8 avec la méthode RGS

6.8.3 Tableau comparatif de la modélisation algébrique du groupe et du chercheur

	Modélisation effectuée par le groupe 8	Modélisation effectuée par le chercheur
Équation	$U = 9.583 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 3.026))$	$U = 9.583 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 3.026))$
Incertitude	$0.71 * 3 = 2.23 \%$ de l'échelle (0à 15V)	$0.71 * 3 = 2.23 \%$ de l'échelle (0à 15V)
Distribution	Normale	Normale

Tableau 17: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 8

6.8.4 Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 8

Étapes du processus de modélisation algébrique	Résultats
1 - Utilisation du graphique	Réussi
2 - Utilisation de la fenêtre des écarts	Réussi
3 - Utilisation de la fenêtre de la distribution des écarts	Réussi
4 - Tenu compte du 68%	Réussi
5 - Tenu compte de la distribution symétrique	Réussi
6 - Tenu compte de la distribution normale	Réussi
7 - Choix de l'incertitude	Réussi

Tableau 18: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 8

6.9 Analyse des données du groupe 9

6.9.1 Modélisation des données du groupe 9 effectuée par le chercheur

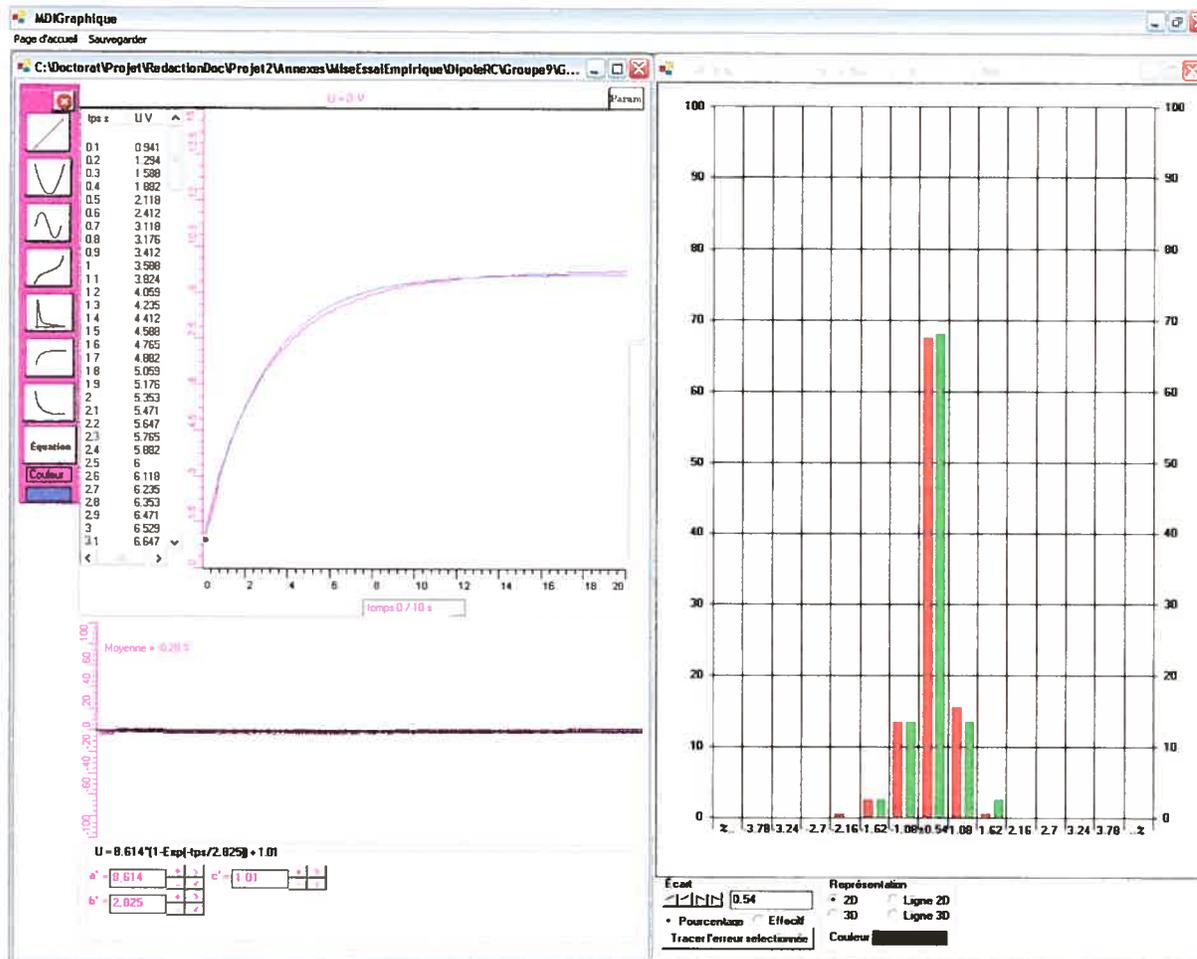


Figure 72 : Modélisation des données du groupe 9 effectuée par le chercheur

6.9.2 Modélisation algébrique du groupe 9 avec la méthode RGS

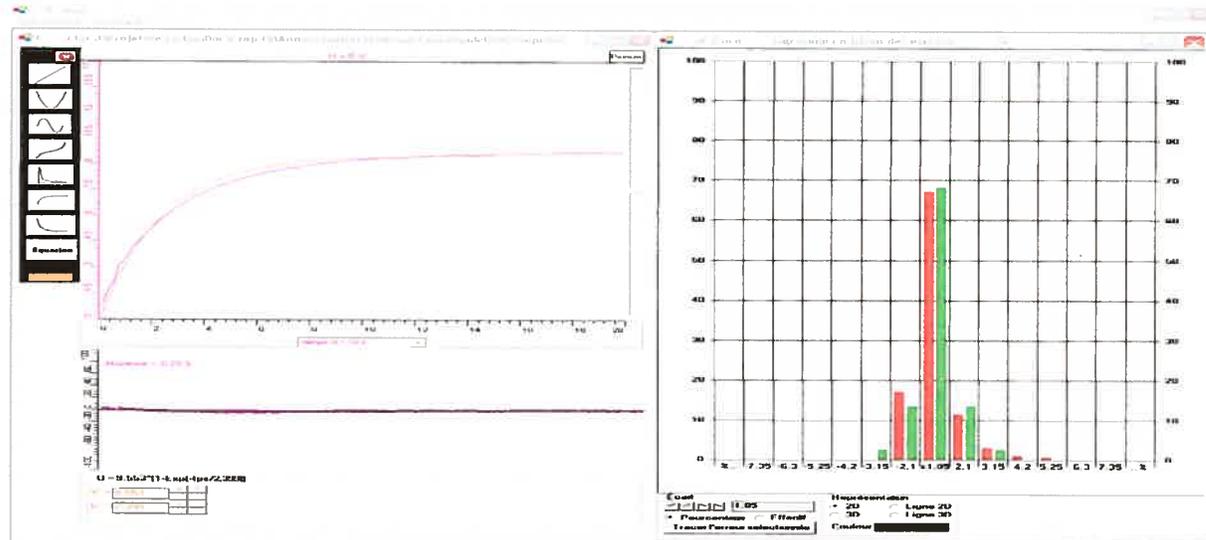


Figure 73 : Modélisation algébrique du groupe 9 avec la méthode RGS

6.9.3 Tableau comparatif de la modélisation algébrique du groupe 9 et du chercheur

	Modélisation effectuée par le groupe 9	Modélisation effectuée par le chercheur
Équation	$U = 9.553 \cdot (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 2.399))$	$U = 8.614 \cdot (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 2.825)) + 1.01$
Incertitude	$1.05 \cdot 3 = 3.15$ % de l'échelle (0 à 15V)	$0.54 \cdot 3 = 1.62$ % de l'échelle (0 à 15V)
Distribution	Symétrique ¹⁵	Symétrique

Tableau 19: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 9

6.9.4 Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 9

Étapes du processus de modélisation algébrique	Résultats
1 - Utilisation du graphique	Réussi
2 - Utilisation de la fenêtre des écarts	Réussi
3 - Utilisation de la fenêtre de la distribution des écarts	Réussi
4 - Tenu compte du 68%	Réussi
5 - Tenu compte de la distribution symétrique	Réussi
7 - Tenu compte de la distribution normale	Non réussi
8- Choix de l'incertitude	Non Réussi

Tableau 20: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 9

¹⁵ Comme dans le groupe 7, il est impossible de distribuer les écarts symétriquement et normalement parce que le graphique ne commence pas à l'origine. Le groupe n'a pas synchronisé l'acquisition des données sur le début du phénomène. Nous allons revenir sur ce cas un peu plus loin dans l'interprétation des résultats des données.

6.10 Analyse des données du groupe 10

6.10.1 Modélisation des données du groupe 10 effectuée par le chercheur

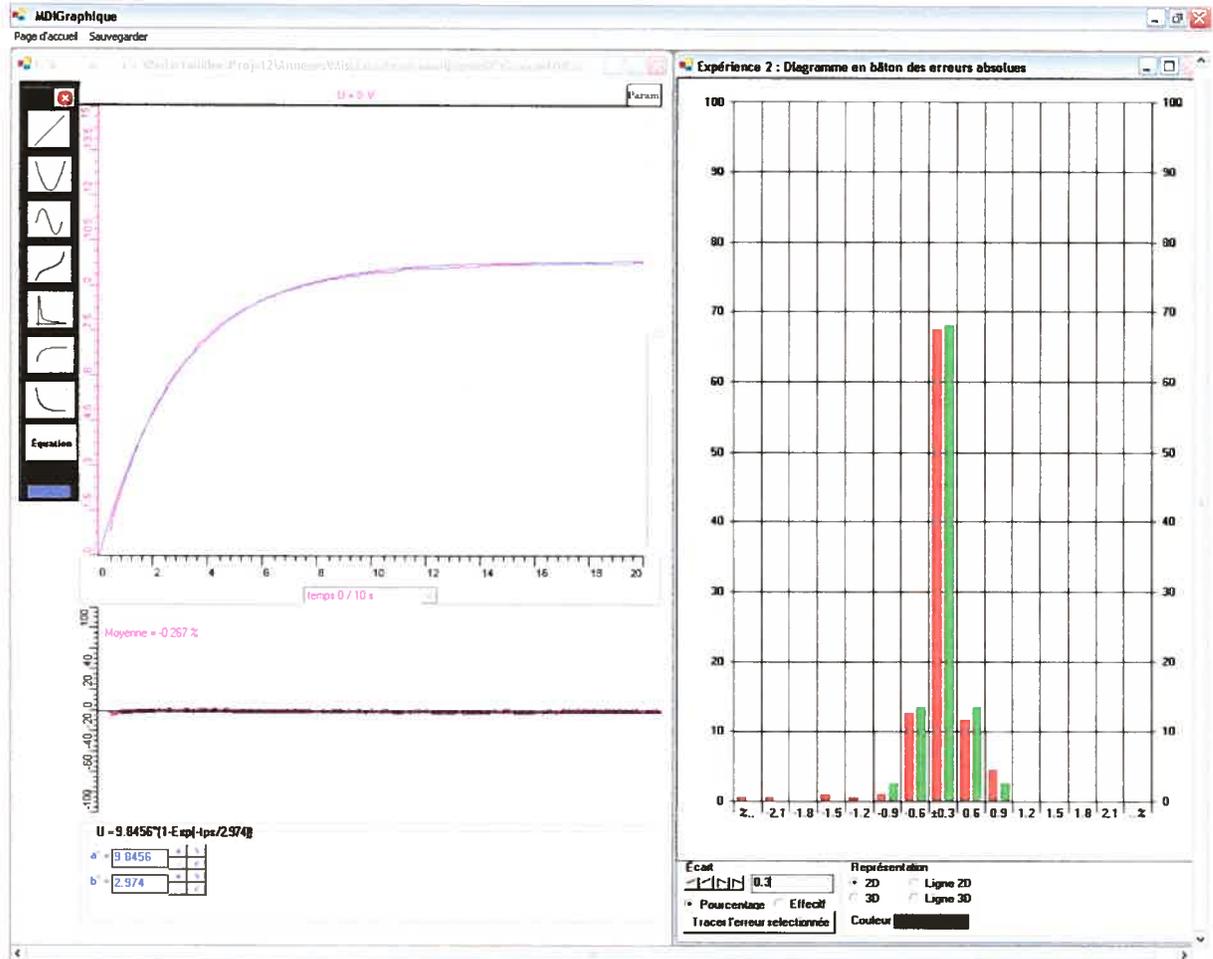


Figure 74 : Modélisation des données du groupe 10 effectuée par le chercheur

6.10.2 Modélisation algébrique du groupe 10 avec la méthode RGS

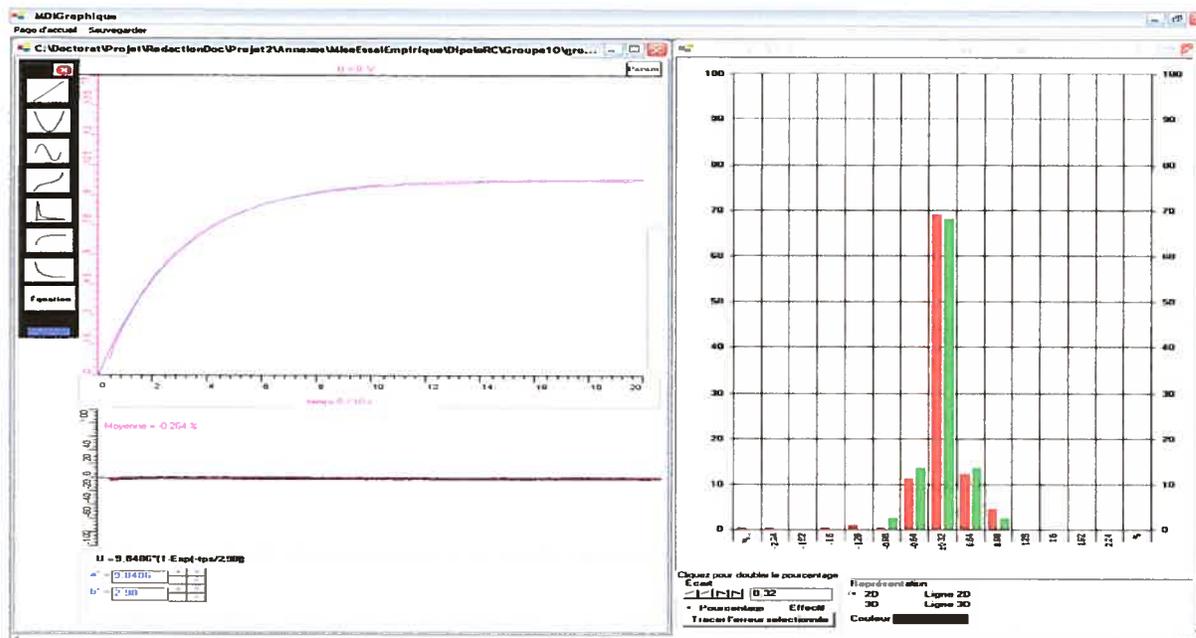


Figure 75: Modélisation algébrique du groupe 10 avec la méthode RGS

6.10.3 Tableau comparatif de la modélisation algébrique du groupe 10 et du chercheur

	Modélisation effectuée par le groupe 10	Modélisation effectuée par le chercheur
Équation	$U = 9.8486 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 2.98))$	$U = 9.8456 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 2.974))$
Incertitude	$0.32 * 3 = 0.96\%$ de l'échelle (0 à 15V)	$0.3 * 3 = 0.9\%$ de l'échelle (0 à 15V)
Distribution	Normale	Normale

Tableau 21: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 10

6.10.4 Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 10

Étapes du processus de modélisation algébrique	Résultats
1 - Utilisation du graphique	Réussi
2 - Utilisation de la fenêtre des écarts	Réussi
3 - Utilisation de la fenêtre de la distribution des écarts	Réussi
4 - Tenu compte du 68%	Réussi
5 - Tenu compte de la distribution symétrique	Réussi
6 - Tenu compte de la distribution normale	Réussi
7 - Choix de l'incertitude	Réussi

Tableau 22: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 10

6.11 Analyse des données du groupe 11

6.11.1 Modélisation des données du groupe 11 effectuée par le chercheur

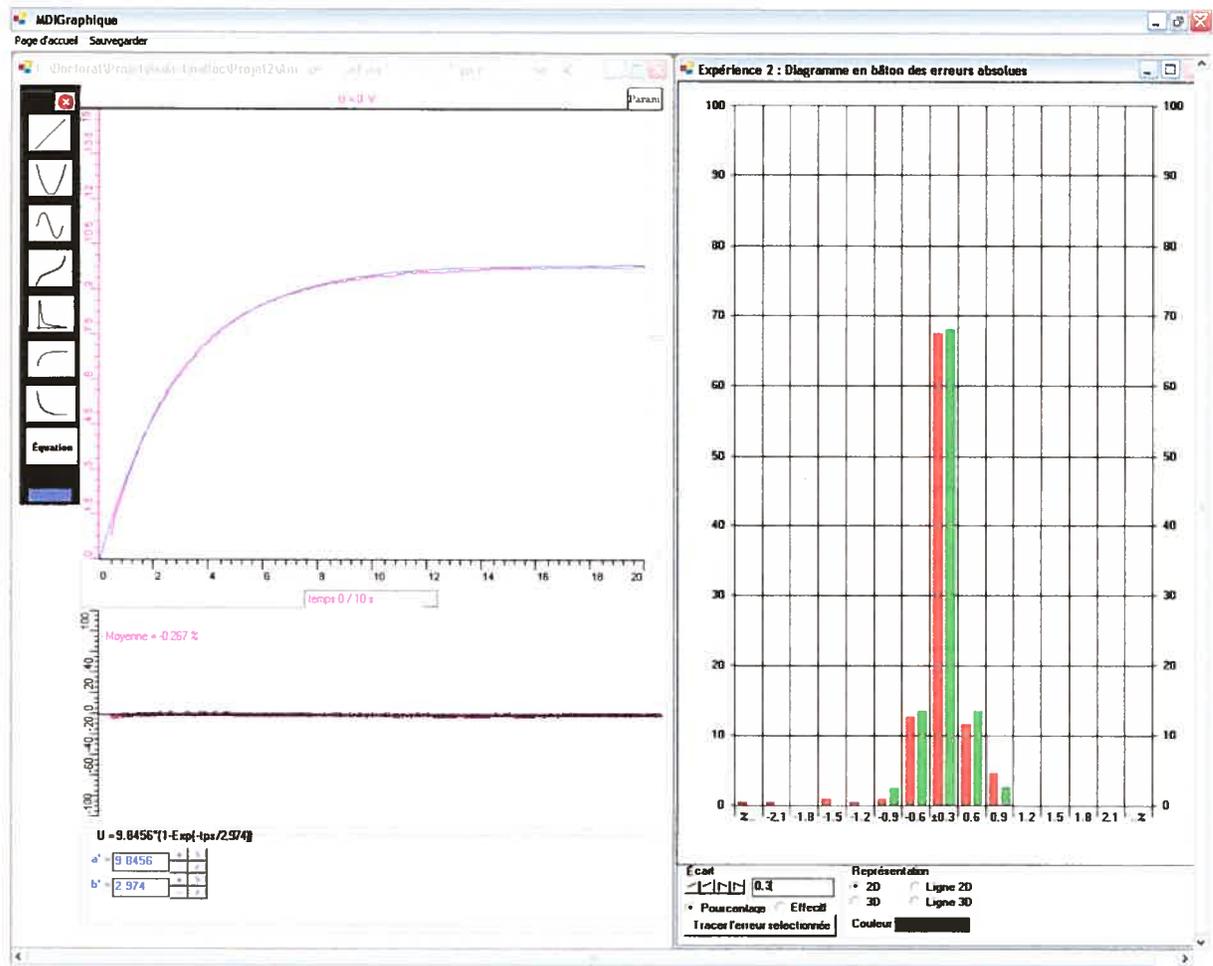


Figure 76 : Modélisation des données du groupe 11 effectuée par le chercheur

6.11.2 Modélisation algébrique des données du groupe 11

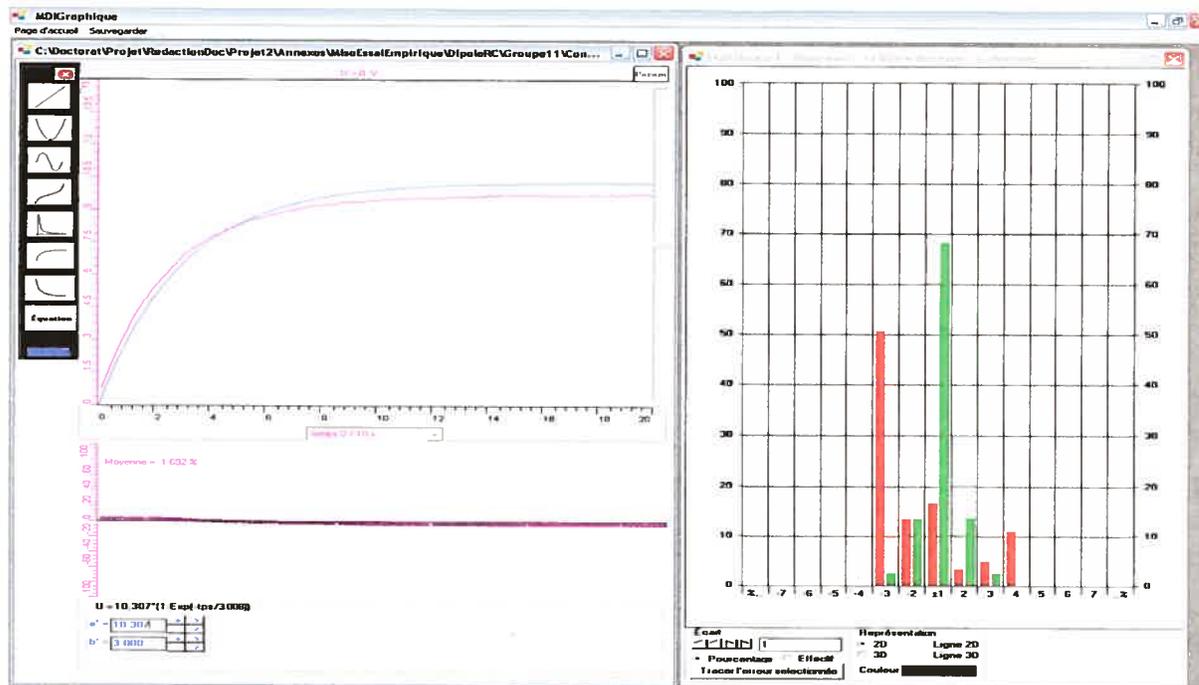


Figure 77 : Modélisation algébrique des données du groupe 11

6.11.3 Tableau comparatif de la modélisation algébrique du groupe 11 et du chercheur

	Modélisation effectuée par le groupe 11	Modélisation effectuée par le chercheur
Équation	$U = 10.307 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 3.008))$	$U = 9.8456 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 2.974))$
Incertitude	$1 * 3 = 3\%$ de l'échelle (0 à 15V)	$0.3 * 3 = 0.9\%$ de l'échelle (0 à 15V)
Distribution	Non Symétrique	Normale

Tableau 23: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 11

6.11.4 Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 11

Étapes du processus de modélisation algébrique	Résultats
1 - Utilisation du graphique	Non Réussi
2 - Utilisation de la fenêtre des écarts	Non Réussi
3 - Utilisation de la fenêtre de la distribution des écarts	Non Réussi
4 - Tenu compte du 68%	Non Réussi
5 - Tenu compte de la distribution symétrique	Non Réussi
6 - Tenu compte de la distribution normale	Non Réussi
7 - Choix de l'incertitude	Non Réussi

Tableau 24: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 11

6.12 Analyse des données du groupe 12

6.12.1 Modélisation algébrique des données du groupe 12 effectuée par le chercheur

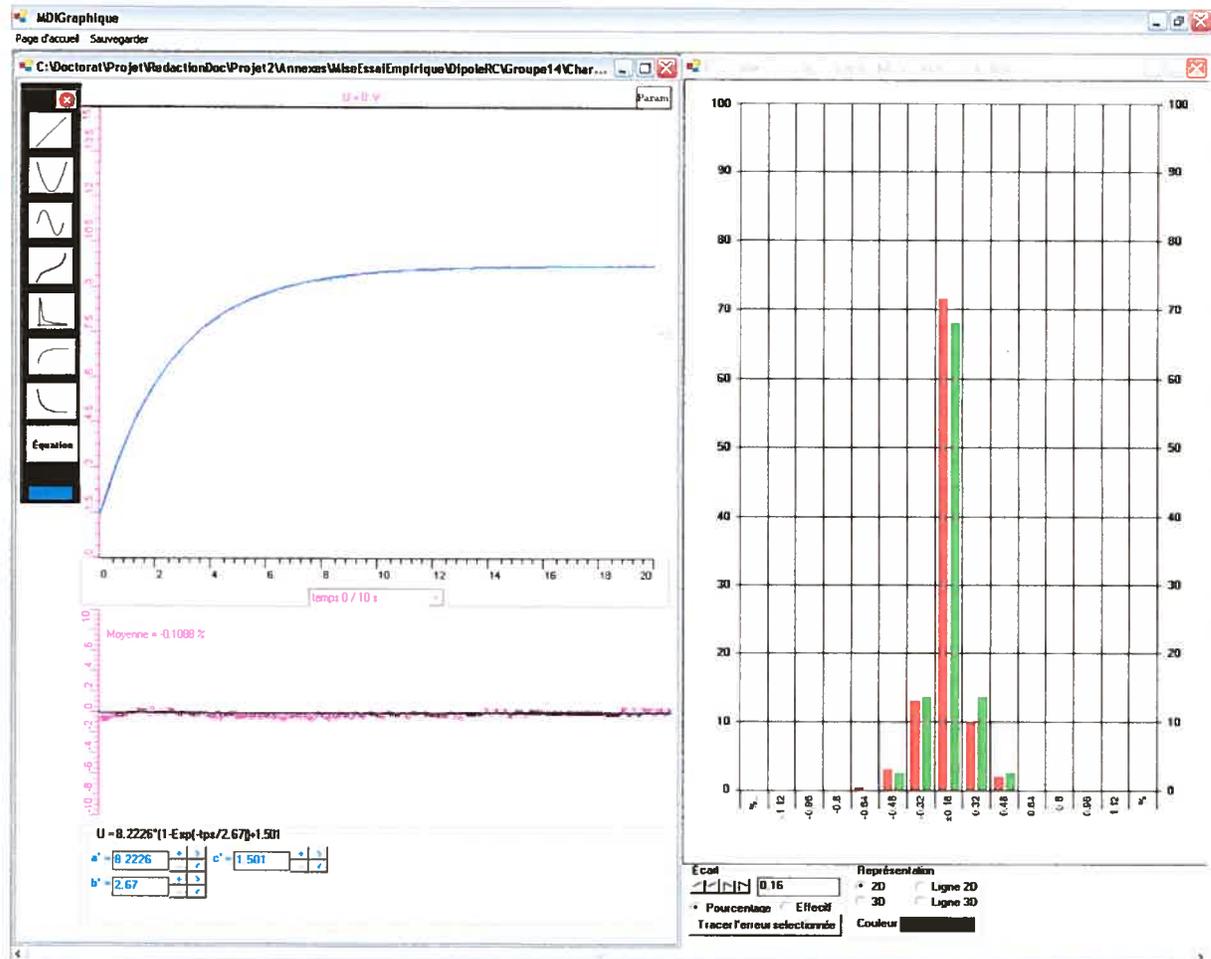


Figure 78 : Modélisation algébrique des données du groupe 12 effectuée par le chercheur

6.12.2 Modélisation algébrique du groupe 12 avec la méthode RGS

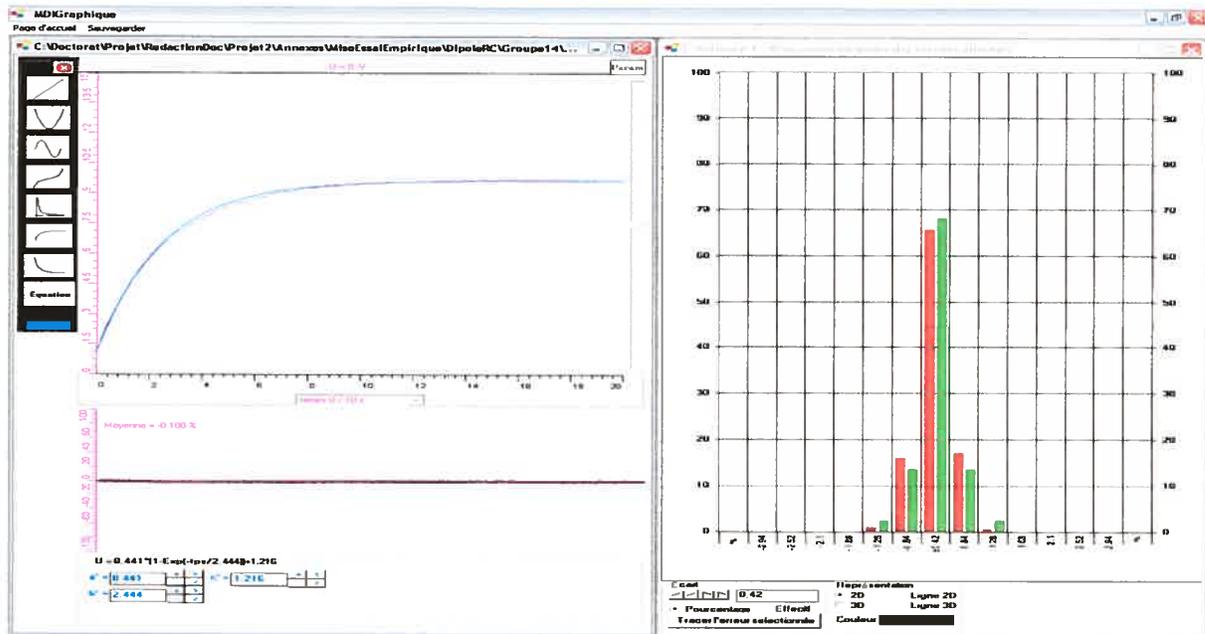


Figure 79 : Modélisation algébrique du groupe 12 avec la méthode RGS

6.12.3 Tableau comparatif de la modélisation algébrique du groupe 12 et du chercheur

	Modélisation effectuée par le groupe 12	Modélisation effectuée par le chercheur
Équation	$U = 8.441 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 2.444)) + 1.216$	$U = 8.2226 * (1 - \text{Exp}(-\text{tps} / 2.67)) + 1.501$
Incertitude	$0.42 * 3 = 1.26\%$ de l'échelle (0 à 15V)	$0.16 * 3 = 0.58\%$ de l'échelle (0 à 15V)
Distribution	Normale	Normale

Tableau 25: Tableau comparatif de la modélisation algébrique du chercheur et du groupe 12

6.12.4 Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 12

Étapes du processus de modélisation algébrique	Résultats
1 - Utilisation du graphique	Réussi
2 - Utilisation de la fenêtre des écarts	Réussi
3 - Utilisation de la fenêtre de la distribution des écarts	Réussi
4 - Tenu compte du 68%	Réussi
5 - Tenu compte de la distribution symétrique	Réussi
6 - Tenu compte de la distribution normale	Réussi
7 - Choix de l'incertitude	Non Réussi

Tableau 26: Tableau synthèse des étapes du processus de modélisation algébrique du groupe 12

ANNEXE 7: Commentaires des groupes

Groupe 1

« Le programme est assez facile à gérer. Il est clair et on s'y retrouve bien, même mieux qu'avec Régressi. Par contre, le fait qu'on doive manuellement chercher la meilleure équation passant par tous les points n'est pas très approprié aux T.P. Certes il est intéressant de trouver cette équation par nous même, mais il me semble que ce n'est pas le but premier des différents T.P. fait en classe. De ce point de vue Régressi se trouve "meilleur" comme programme. Lors des séances de T.P. en classe on regarde, par exemple, si on peut faire un lien linéaire entre deux mesures (par exemple entre l'absorbance et la concentration), et on regarde l'écart relatif pour savoir si le lien peut être fait. On s'intéresse moins à comment cette équation est tracée, et plus à ce qu'il en résulte. Autrement dit, ce nouveau programme est beaucoup plus clair que Régressi mais on aurait besoin d'une façon plus rapide à avoir accès aux différentes équations pour par la suite avoir accès à l'écart relatif »

Groupe 2

« J'ai trouvé le logiciel assez facile d'utilisation. Mettre en route l'expérience et obtenir de bons résultats était très facile et clair. Le fait qu'on puisse visualiser était intéressant pour l'élève, de ce côté il n'y a pas de problème. Cependant, la modélisation était un peu difficile à effectuer, c'était surtout le moment où il fallait jongler avec les différentes colonnes qui étaient dur et on avait du mal aussi à vraiment comprendre leur signification »

Groupe 3

« Il faudrait par contre réussir à mettre le chiffre d'une autre couleur quand l'on change les a' et b' de l'équation de la droite car on a du mal à s'y retrouver. Tout ce qui concerne l'approximation de la courbe, avec les points en dessous et au dessus, etc... est bien conçu, le seul problème est le graphique des écarts-type qui me semble un peu compliqué. À part ça, il faudrait qu'on s'en réserve pour mieux comprendre son fonctionnement »

Groupe 4

« Ce logiciel est très facile à comprendre et donc, facile à utiliser. Je pense sincèrement qu'il devrait remplacer le logiciel actuellement en vigueur dans les lycées et dans les cégeps. Le fait de pouvoir concevoir nous-mêmes une courbe très précise, correspondant à un ensemble de données expérimentales, avec la plus petite erreur relative possible, est une liberté qui n'avait encore jamais été atteinte. Cela permettra à la fois de contribuer au développement des capacités mathématiques des élèves et de devenir par le fait même un nouveau critère d'évaluation. »

Groupe 5

« J'ai trouvé la modélisation algébrique en utilisant le logiciel MicrolabExAO difficile. Par contre, puisque c'était ma première fois à utiliser ce logiciel, je pense que la manipulation et la compréhension de celui-ci se facilitera sûrement avec l'expérience.

Ce que j'ai apprécié:

- La manipulation itérative qui diffère de celle de Régressi.

Celle-ci nous donne la chance de mieux comprendre l'influence des paramètres d'une équation sur la courbe.

- Le fait qu'il y avait plus qu'un support pour nous aider à approcher la courbe expérimentale à une courbe théorique (distance des points à la courbe et le graphique)
- Le graphique. Le concept de diviser la proximité de la localisation des points à la courbe en pourcentages fixes (68% et des % symétriques) est intéressant.

Ce que je n'ai pas apprécié:

- Le temps qu'il faut pour trouver l'équation comparé aux autres logiciels

Suggestions: pour la première manipulation par élèves, commencé avec une équation standard, connue »

Groupe 6

Bonjour Monsieur,

A propos du logiciel, je l'ai trouvé facile d'utilisation et commode pour les possibilités qu'il nous permettait. Les seules difficultés que j'ai rencontrées ont concerné le choix de l'écart relatif pour les valeurs choisies, de sa précision, lorsque j'ai changé sa valeur de 0.01, tous mes écarts ont été modifiés. Je comprends son utilité mais cela m'a posé quelques problèmes. Dans son ensemble j'ai trouvé le logiciel bien et j'estime que notre aisance viendra avec le temps. Merci, bonsoir.

Groupe 7

« J'ai bien aimé l'idée de base de ce logiciel, qui est qu'on comprend mieux d'où viennent les modélisations qu'on obtient. Cependant, je trouve qu'on pourrait reprocher à ce programme d'être difficile de manipulation: on a d'ailleurs eu besoin d'une heure d'explication pour le comprendre. Par exemple, certaines fenêtres ne se ferment qu'à l'aide du "x" en haut à droite, et dans d'autres cas, on perd toutes les données si on procède ainsi. Ensuite, les méthodes de modélisation sont très complexes, et là encore, j'ai eu encore un peu l'impression d'appliquer des méthodes que je ne comprenais pas vraiment, comme celle des "68,5%" pour le diagramme en bâtons. Malgré tout, je préfère ce logiciel à Régressi.»

Groupe 8

Le logiciel est effectivement intéressant puisque la modélisation est faite par l'utilisateur lui-même et non automatiquement. Cela permet de comprendre pourquoi telle modélisation est meilleure qu'une autre. Néanmoins le fonctionnement du logiciel, si laissé sans aucune notice ni explication, est assez difficile à comprendre (en particulier le diagramme de pourcentages, on ne comprend pas très bien ce qu'il représente). En 2 ou 3 séances il doit être possible de se familiariser avec le logiciel et pouvoir l'utiliser avec efficacité.

Alors, mes impressions sur le programme ExAO que l'on a utilisé vendredi sont plutôt positives. J'ai trouvé que c'était simple de l'utiliser et de comprendre comment il fonctionnait. Et c'est intéressant de voir comment modéliser des courbes, contrairement à Régressi ou on nous donne une équation qui tombe du ciel. Donc j'encourage Georges à continuer à améliorer son programme, et je pense que tous les élèves ont aimé.

Groupe 9

« Pour ce qui est de l'utilisation du logiciel EXAO, la prise en main est rapide et les fonctions sont faciles à comprendre et à maîtriser. L'ergonomie du logiciel est parfaite et la fonction du tableur intégré au module de mesure expérimental permet de gagner du temps et d'éviter les erreurs de recopiage. Par contre il faut beaucoup jouer avec les différentes combinaisons de valeurs (valeurs des variables, écart.) pour trouver la meilleure équation pour la modélisation des résultats de l'expérience. J'ai apprécié ce logiciel et d'après la question posée à la fin de la feuille du TP (Étude de la charge et la décharge d'un condensateur), je classerais la modélisation algébrique en utilisant le logiciel MicrolabEXAO de facile d'utilisation. La modélisation est simple, et facile d'utilisation malgré quelques difficultés à trouver la bonne équation (les bonnes valeurs)»

Groupe 10

« J'ai trouvé que le nouveau logiciel de modélisation est beaucoup plus efficace que Régressi pour plusieurs raisons:

1- Il comporte le modèle du Vumètre qui permet la visualisation de la valeur relevée par le capteur branché sur l'interface Orphy, fonction qui n'apparaît pas dans le logiciel Régressi.

2- Il permet un meilleur ajustement du modèle d'une courbe à la courbe qu'on obtient expérimentalement.

3- Il permet, grâce au diagramme en bâtons des erreurs absolues, la visualisation de l'écart entre les résultats théoriques et les résultats expérimentaux, ce que ne permet pas le logiciel Régressi. Cependant, l'utilisation de ce logiciel, quoiqu'efficace, est plus compliquée que celle de Régressi. Mais je crois qu'une utilisation plus massive du nouveau programme nous permettra de mieux le maîtriser.

Quoiqu'il en soit la séance de travaux pratiques a été très instructive car elle nous a permis de voir que la modélisation pouvait se faire de toutes sortes de manières, certaines, pourtant plus précises que d'autres.»

Groupe 11

Pas de commentaires

Groupe 12

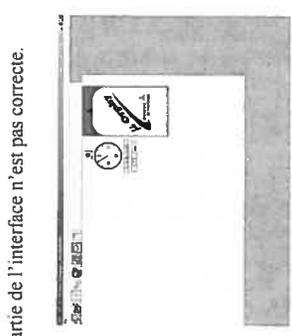
« Lorsque l'on joue sur les paramètres de la courbe, il devrait y avoir un indicateur de l'unité que l'on influence, car il arrivait qu'on se perde, il faudrait aussi pouvoir simplement taper un nombre directement et aller cliquer l'unité que l'on veut influencer.

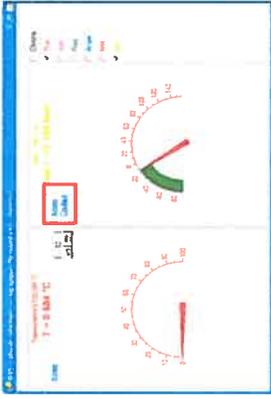
-Lorsqu'il y a plusieurs courbes, elles devraient avoir des couleurs différentes automatiquement

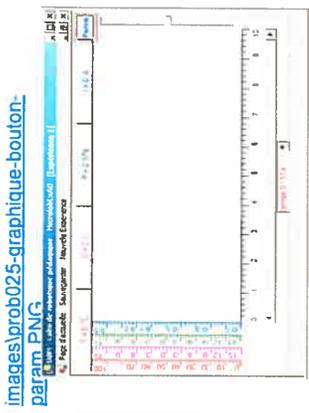
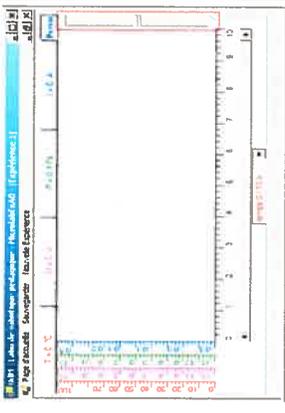
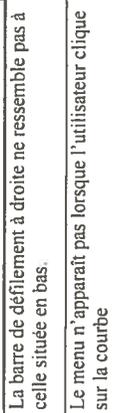
-lorsqu'on veut élargir l'échelle des écarts, le bogue de lorsqu'on gardait le bouton appuyé. Au lieu de cliquer deux fois, ce serait plus naturel de garder le bouton appuyé et le relâcher (avec une droite qui indique le zoom que l'on fait, comme dans les jeux vidéos de stratégies style Warcraft ou Age of Empires pour sélectionner plusieurs unités). Un truc "drag and drop", quoi.

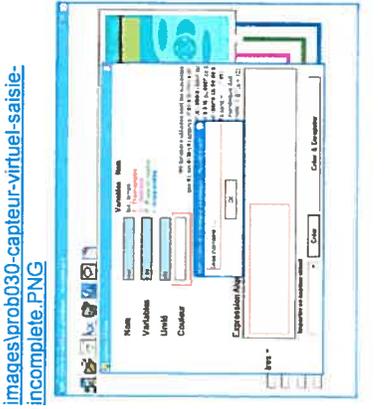
-la synchronisation de la prise de mesure avec le début de l'expérience
Sinon, le programme est très efficace et facile à utiliser, bravo! »

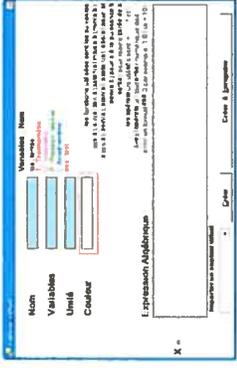
ANNEXE 8: Mise à l'essai fonctionnelle (Étudiant de deuxième année en génie logiciel)

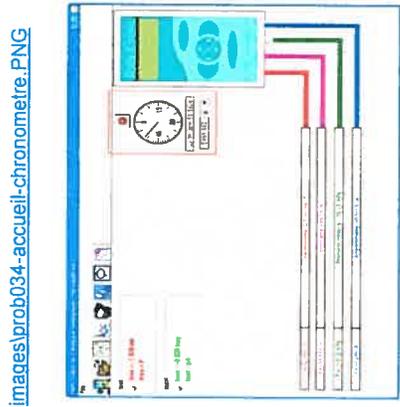
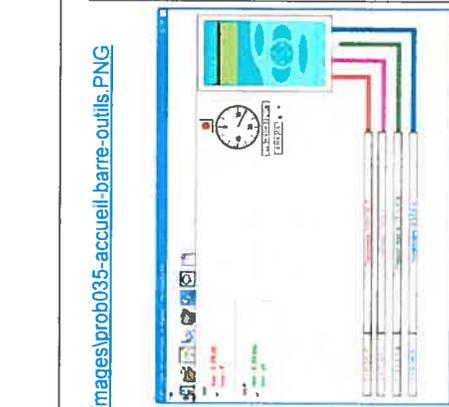
Mode simulation	Module	Action	Résultat	Problème	+(1) degré d'importance – (5)					Solutions suggérées			
					1	2	3	4	5				
prob001	Accueil	Lancer le logiciel	Affichage de l'accueil	Le menu « File » devrait se nommer « Fichier »					5	Renommer le nom du menu	Corrigé	Correction d'ordre ergonomique	
prob002	Accueil	Changer d'unité de temps lorsque le chronomètre est arrêté	Aucun	La valeur en bas du chronomètre ne change pas lorsque nous changeons d'unité.				4		Rafraichir le chronomètre après le changement d'unité	Corrigé	Erreur de programmation	
prob003	Accueil	Agrandir la fenêtre.		Une partie de l'interface n'est pas correcte.						4	Agrandir les contrôles après l'agrandissement de la fenêtre.	Corrigé	Correction d'ordre ergonomique
prob004	Graphique	Sauvegarder l'expérience et retourner à l'accueil	Un dialogue apparaît demandant la sauvegarde de l'expérience	L'expérience a déjà été sauvegardée. Donc, la boîte de dialogue ne devrait pas apparaître.			3			Garder le statut de sauvegarde de l'expérience.	Non Corrigé	Manque du temps	
prob005	Graphique	Ouvrir une expérience et retourner à l'accueil.	Un dialogue apparaît demandant la sauvegarde de l'expérience	L'expérience a déjà été sauvegardée. Donc, la boîte de dialogue ne devrait pas apparaître.			3			Garder le statut de sauvegarde de l'expérience.	Non Corrigé	Manque du temps	
prob006	Accueil	Appuyer sur le bouton « Aide » de la barre d'outils.	Aucun	L'aide ne s'affiche pas.				4		<ul style="list-style-type: none"> Afficher l'aide ou afficher un message informant l'utilisateur qu'il n'y a pas d'aide disponible pour l'instant. 	Corrigé	Correction d'ordre ergonomique	

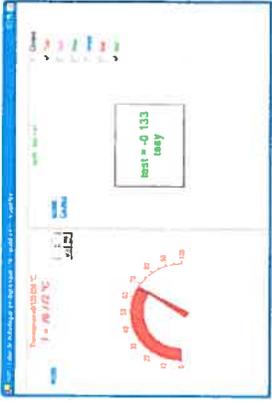
prob020	Capteur virtuel	Entrez une variable qui n'existe pas dans l'expression algébrique.	Le programme envoie un message	Le message d'erreur n'est pas clair. Aussi, tous les champs de la fenêtre sont effacés.	3			Le message doit informer l'utilisateur qu'il a saisi une variable qui n'existe pas. Les champs ne doivent pas être effacés.	Corrigé	Correction d'ordre ergonomique
prob021	Graphique	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cliquer sur « Entrée manuelle » 2. Entrez des données 3. Changer le type de courbe pour une ligne ou ligne et points 4. Entrer des nouvelles valeurs 		Le type de courbe change automatique vers points	2			Le graphique doit conserver le type de courbe.	Non Corrigé	Dans le mode manuel, l'affichage doit être en point pour pouvoir modéliser les données de l'expérience
prob022	Vumètre			<p>images\prob024-vumetre-bouton-echelle.png</p> <p>Le bouton échelle et le bouton couleur n'est pas très visible</p> 	5		Changer pour un vrai bouton au lieu d'un hyperlien.	Corrigé	On a augmenté la police du texte. (ergonomique)	

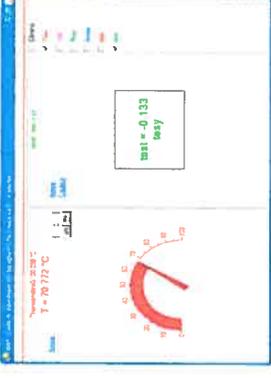
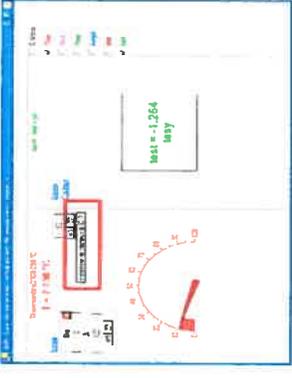
prob023	Graphique	 <p>images/prob025-graphique-bouton-param.PNG</p>	<p>Le bouton « Param » n'est pas très visible</p>	<p>5</p>	<p>Changer pour un bouton normal.</p>	<p>Non Corrigé</p>	<p>Manque du temps</p>
prob024	Graphique	 <p>images/prob026-graphique-barre-defilement-droite.PNG</p>	<p>La barre de défilement à droite ne ressemble pas à celle située en bas.</p>	<p>4</p>	<p>Changer soit la barre de défilement en bas pour une comme celle de droite ou l'inverse. La barre de défilement qui ressemble le plus à celle utiliser par le système d'environnement est la meilleure.</p>	<p>Corrigé</p>	<p>On a enlevé la barre. L'étudiant pourra changer l'échelle en cliquant sur l'échelle de l'abscisse. Correction d'ordre ergonomique</p>
prob025	Graphique	 <p>images/prob025-graphique-bouton-param.PNG</p>	<p>Le menu n'apparaît pas lorsque l'utilisateur clique sur la courbe</p>	<p>3</p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>

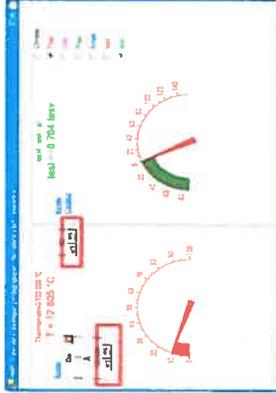
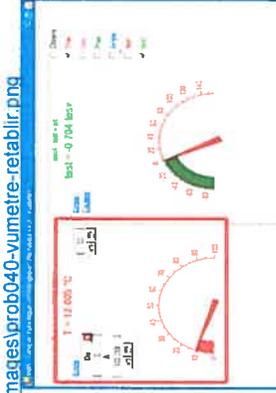
<p>prob028</p>	<p>Capteur virtuel et autre fenêtre de saisie</p>	<p>Omettre une valeur obligatoire et appuyer sur « OK »</p>	<p>Message d'avertissement</p>	<p>images/prob030-capteur-virtuel-saisie-incomplete.PNG</p>  <p>Le message est peu informatif sur les raisons de l'avertissement.</p>	<p>2</p>	<p>Rendre le message plus informatif. Par exemple, si l'utilisateur oublie de choisir une couleur et de saisir une expression algébrique dans la fenêtre « Capteur virtuel », le message devrait être semblable à ceci : « Vous n'avez pas choisi de couleur et l'expression algébrique ne doit pas être vide ».</p>	<p>Corrigé</p>	<p>Correction d'ordre ergonomique. On a clarifié le message tel que demandé par l'expert</p>
						<p>et/ou</p>		
						<p>Mettre l'étiquette des champs en rouge</p>		
<p>prob029</p>	<p>Accueil, vumètre</p>			<p>Le message est peu informatif sur les raisons de l'avertissement.</p> <p>Les valeurs des capteurs changent trop rapidement. Il est difficile de lire la valeur. Même chose pour le chronomètre de l'accueil.</p>	<p>3</p>	<p>Mettre un délai pour le rafraîchissement des capteurs. Les valeurs ne changent qu'à toutes les secondes ou demi-secondes.</p>	<p>Corrigé</p>	<p>On a ajouté un chronomètre dans la fenêtre d'accueil. L'étudiant peut arrêter l'acquisition pour regarder les Valeurs. Il faut noter que l'acquisition n'est pas trop vite dans le cas où un microcontrôleur est branché à l'ordinateur</p>

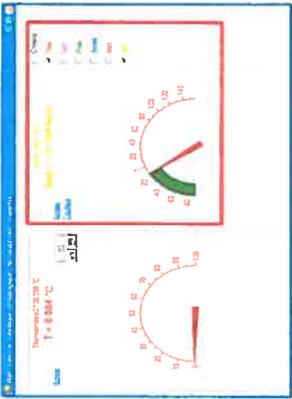
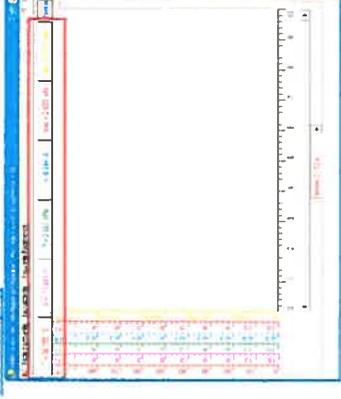
<p>prob030</p>	<p>Capteur virtuel, Définition d'une variable</p>			<p>images/prob032-capteur-virtuel-bouton-couleur.PNG</p>  <p>Les boutons pour les couleurs sont difficiles d'utilisations</p>	<p>4</p>	<ul style="list-style-type: none"> Il devrait ressembler à un vrai bouton 	<p>Corrigé</p>	<p>Correction d'ordre ergonomique. On a Clarifié le message tel que demandé par l'expert</p>
<p>prob031</p>	<p>Définition d'une variable</p>		<p>Deux variables peuvent avoir la même couleur</p>	<p>2</p>	<ul style="list-style-type: none"> Il doit pouvoir prendre le focus. <p>Garder une liste de toutes les couleurs utilisées et avertir l'utilisateur qu'il ne peut utiliser deux fois la même couleur.</p>	<p>Non Corrigé</p>	<p>Les couleurs des variables sont affichées dans la fenêtre d'accueil. L'utilisateur pourra les regarder facilement</p>	

<p>prob032</p>	<p>Accueil</p>		 <p>images\prob034-accueil-chronometre.PNG</p>	<p>5</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ajouter une étiquette « Chronomètre » en haut du chronomètre 	<p>Corrigé</p>	<p>Correction d'ordre ergonomique</p>
			<p>Le chronomètre manque d'esthétisme.</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Enlever les bordures autour des étiquettes affichant le temps écoulés. 		
<p>prob033</p>	<p>Accueil</p>		 <p>images\prob035-accueil-barre-outils.PNG</p>	<p>5</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ajuster les bordures pour qu'elle ne soit pas une par-dessus l'autre. • Descendre le centre de la fenêtre de quelques pixels 	<p>Corrigé</p>	<p>Correction d'ordre ergonomique</p>

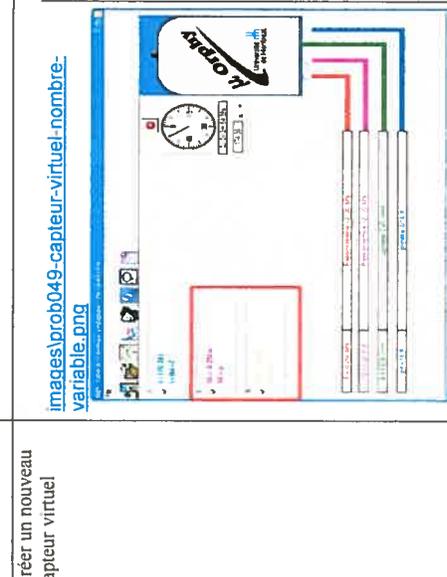
prob034	Vumètre	<p>Le centre de la fenêtre piétine la barre d'outils</p> <p>images/prob036-vumetre-visibility-captur.PNG</p>  <p>Il est difficile pour l'utilisateur de comprendre l'utilité des cases à cocher situées à droite des vumètres</p>	5	<ul style="list-style-type: none"> Ajouter une étiquette au dessus de la liste des capteurs contenant le texte : « Visibilité ». <p>ou</p> <ul style="list-style-type: none"> Afficher une info bulle lorsque le pointeur de la souris. L'info bulle informera l'utilisateur qu'il peut cacher le vumètre d'un des capteurs en décochant la case. 	Non Corrigé	<p>Par ce qu'on voit bien que les variables cochées correspondent bien aux capteurs affichés</p>
---------	---------	--	---	---	-------------	--

<p>prob035</p>	<p>Vumètre</p>		<p>images\prob037-vumetre-bordure-haut.PNG</p>  <p>La bordure en haut de la fenêtre est inutile.</p>	<p>5</p> <p>Enlever la bordure</p>	<p>Corrigé</p>	<p>Correction d'ordre ergonomique</p>
<p>prob036</p>	<p>Vumètre</p>		<p>images\prob038-vumetre-info-bulle.png</p>  <p>Les infos bulles sont des questions.</p> <p>images\prob039-vumetre-boutons.png</p> <p>L'arrière-plan des icônes n'est pas le même que celui du bouton</p>	<p>5</p> <p>Remplacer les questions par des phrases affirmatives. Les infos bulles doivent donner de l'information.</p>	<p>Non Corrigé</p>	
<p>prob037</p>	<p>Vumètre</p>			<p>5</p> <p>Remplacer les icônes</p> <p>ou</p>	<p>Non Corrigé</p>	

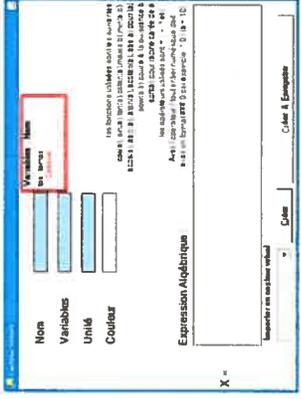
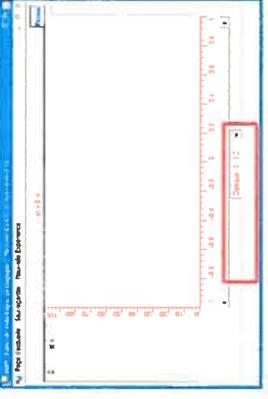
prop038	Vumètre	<p>1. Initialiser un capteur à une valeur quelconque.</p>				<p>1. Rendre l'arrière-plan des icônes transparent.</p>		
	<p>2. Rétablir le capteur</p>		 <p>images/prob040-vumetre-retablir.png</p> <p>La valeur dans le champ n'est pas rétablie à 0.</p>	3	<p>Rétablir la valeur du champ à zéro.</p>	Corrigé	Erreur de programmation	

prop039	Vumètre	Changer la couleur d'un capteur virtuel	 <p>images\prob04 1-vumetre-couleur.png</p>	3	Changer la couleur du graphique.	Corrigé	Erreur de programmation
prop040	Graphique	1. Faire une expérience.	<p>La couleur du graphique ne change pas.</p>	4	Remettre la valeur des boutons à zéro.	Corrigé	Correction d'ordre ergonomique
		2. Fermer l'expérience lorsqu'elle est finie	 <p>images\prob042-graphique-boutons-courbes.png</p>				
		Exporter un graphique avec des capteurs dont le nom contient un ou plusieurs accents.	<p>Les boutons gardes les dernières valeurs de la dernière expérience.</p> <p>Les titres des colonnes dont le nom du capteur contient un ou plusieurs accents affichés des caractères illisibles</p> <p>test-exporter-toutes-les-courbes.xls</p>	3	Utiliser un jeu de caractère compatible avec Excel.		
prop041	Graphique						

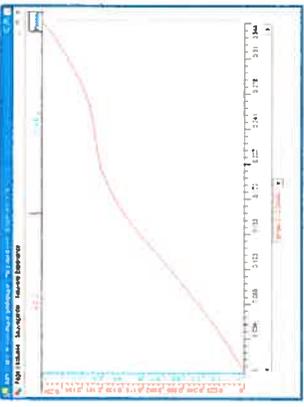
prob042	Capteur virtuel	1. Ecrire une expression algébrique contenant tps ou t et une autre variable.	<p>images/prob044-capteur-virtuel-erreur-capteur.png</p>	1				Corrigé	Erreur de programmation. Le logiciel plante quand l'expression contenait quatre variables.
prob043	Accueil	1. Créer un capteur virtuel 2. Appuyer sur le bouton « Détection de l'interface »	<p>Une erreur se produit lorsque l'utilisateur clique sur « Créer ».</p> <p>Le capteur créé disparaît</p>	1				Corrigé	Le capteur doit être supprimé seulement si un des capteurs que le capteur virtuel utilise est retiré.
prob044	Capteur virtuel	1. Créer un capteur de cumulation pur un capteur				3		Corrigé	Faute de Frappe
prob045	Accueil	1. Créer 5 capteurs virtuels ou plus.	<p>images/prob047-accueil-capteurs-virtuels.png</p> <p>Certain capteur virtuel sont caché sous les autres capteurs virtuels.</p>	2				Corrigé	Erreur de programmation

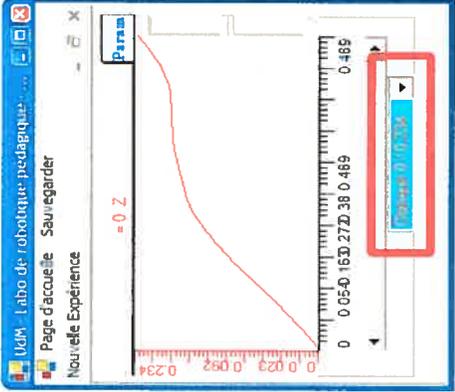
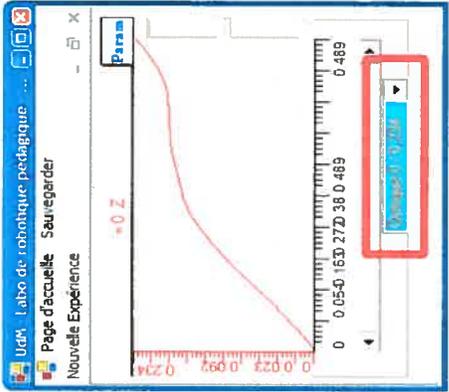
prob046	Graphique	<ol style="list-style-type: none"> 1. Brancher et créer des capteurs afin qu'il y est plus de 6 capteurs 2. Appuyer sur « Module Graphique » dans la barre d'outils 	Affiche la fenêtre Graphique	Le graphique n'affiche que 6 capteurs.	4	Envoyer un message à l'utilisateur l'informant qu'il ne peut afficher que 6 capteurs en même temps.	Non Corrigé	Le logiciel envoie déjà un message lorsque l'utilisateur tente à afficher plus que 6 variables en même temps
prob047	Capteur	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tapez un nombre dans les champs variables. 2. Appuyer sur « Créer » 	Créer un nouveau capteur virtuel	<p>images/prob049-capteur-virtuel-nombre-variable.png</p>  <p>La variable du capteur virtuel est un nombre</p>	2	Effectuer une validation de la variable. La validation doit s'assurer que la variable ne commence pas par un chiffre. Elle doit s'assurer que la variable n'est pas une des fonctions permises.	Corrigé	Erreur de programmation

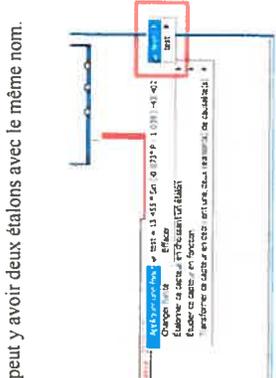
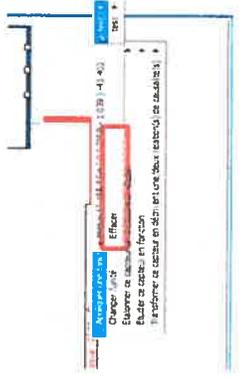
prob048	Graphique	<ol style="list-style-type: none"> Créer un capteur avec une division d'un nombre entier sur un nombre à virgule (ex 1/3.3) Acquérir les données 		Une erreur se produit (Over flow)				5	Empêcher l'utilisateur	Corrigé	Erreur de programmation. L'utilisateur maintenant peut créer une variable constante sans faire planter le logiciel
prob049	Accueil	Connecter 4 capteurs et cocher la case à cocher du deuxième capteur		Il est impossible de modifier l'amplificateur.	3				Faire de l'espace pour l'amplificateur.	Corrigé	Erreur de programmation
prob050	Accueil	Connecter un pH-mètre ou un luxmètre dans le deuxième ou troisième connecteur de l'interface.		Il n'y a pas de case à cocher pour l'amplificateur comme dans le premier ou quatrième connecteur.	2					Corrigé	Erreur de programmation
prob051	Capteur virtuel	E		Il n'y a pas de bouton "Annuler"				5			
prob052	Graphique	<ol style="list-style-type: none"> Acquérir des données. Cliquez sur le bouton d'une courbe. Choisir une des trois options de "Outils mathématique" - "Surface" 	Affiche la surface sous la courbe	Quelques fois, il faut seulement un clic de souris mais l'utilisateur peut cliquer jusqu'à 3 fois avant que la surface sous la courbe s'affiche. De plus, il n'y a pas d'explication sur la procédure à suivre pour faire afficher la surface.	2				Ajouter une barre d'état à la fenêtre et afficher des instructions pour l'utilisateur. Par exemple : "Cliquez sur un point de la courbe" pour l'option du menu "Entre deux abscisses et un point sur la courbe"	Non Corrigé	Manque du temps
prob053	Graphique	<ol style="list-style-type: none"> Connecter une fourchette optique double. Faire une expérience en effectuant aller-retour avec la règle. Faire une nouvelle expérience dans le même graphique en laissant la règle tomber. Cliquez sur le bouton de la courbe et afficher le modéliseur à l'aide du menu. 		<u>Une erreur se produit.</u>	1					Corrigée	Erreur de programmation

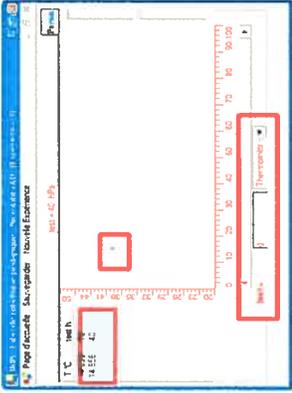
<p>prob054</p>	<p>Capteur virtuel</p>	<p>1. Connecter une fourchette optique double. 2. Cliquer sur "Capteur virtuel".</p>	<p>La fenêtre capteur virtuel s'affiche</p>	<p>Il n'y a pas de variable pour la fourchette optique même si son nom apparaît dans la liste.</p> 	<p>2</p>	<p>Corrigée</p>	<p>Erreur de programmation</p>
<p>prob055</p>	<p>Graphique</p>	<p>1. Connecter une fourchette optique double. 2. Cliquer sur le capteur dans la fenêtre d'Accueil. 3. Choisir "Étalonner" - "Extérieur à Orphy"</p>	<p>La fenêtre graphique s'affiche.</p>	<p>Il manque une boîte de texte pour entrer la valeur de l'étalon.</p> 	<p>2</p>	<p>Corrigé</p>	<p>Erreur de programmation</p>

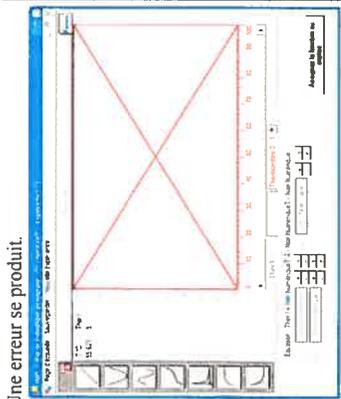
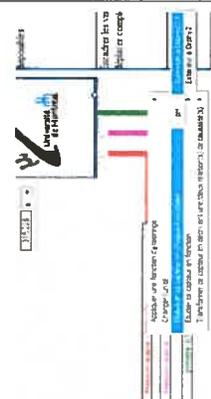
Enlever la fonction « étalonner » du menu pour une fourchette optique.

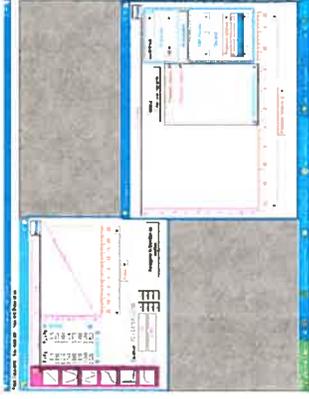
<p>prob056</p>	<p>Graphique</p>	<p>1. Installer une fourchette optique. 2. Effectuer une expérience en faisant des allers-retours avec la règle.</p>	<p>Une courbe est dessinée dans le graphique.</p>	<p>La courbe ne tient pas compte du sens du mouvement.</p> 	<p>1</p>	<p>Corriger la courbe.</p>	<p>Erreur de programmation</p>
<p>prob057</p>	<p>Graphique</p>			<p>Le menu "Page d'accueil" contient une faute.</p> 	<p>3</p>	<p>Le menu doit s'écrire "Page d'Accueil" Voir www.granddictionnaire.com</p>	<p>Faute de Frappe</p>

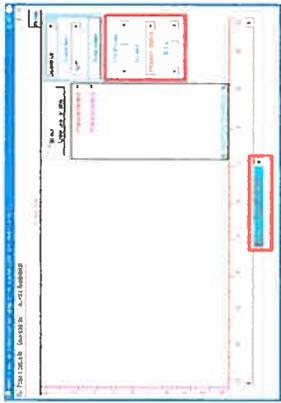
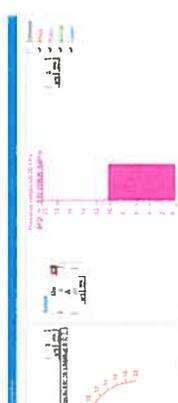
<p>prob058</p>	<p>Graphique</p>	<p>1. Connecter une fourchette optique. 2. Changer la valeur de la liste déroulante du bas de l'écran.</p>	<p>Le changement n'a aucun effet.</p> 	<p>3</p>	<p>Non Corrigé</p>	<p>Dans ce module, l'étudiant pourra créer des capteurs virtuels comme la vitesse. Il sera important de voir la vitesse en fonction de la position.</p>
<p>prob059</p>	<p>Graphique</p>	<p>IL manque une étiquette sur la liste déroulante</p>		<p>5</p>	<p>Non effectué</p>	<p>Manque du temps</p>

<p>prob060</p>	<p>Accueil</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Créer un nouvel étalonnage 2. Entrez une valeur quelconque pour une valeur quelconque d'un capteur. 3. Modéliser une fonction. 4. Appuyer sur "Assigner la fonction au capteur". 5. Modifier la fonction modélé. 6. Appuyer sur "Assigner la fonction au capteur". 	<p>Ajoute l'étalonnage au capteur.</p>	<p>Il peut y avoir deux étalons avec le même nom.</p> 	<p>2</p>	<p>Vérifier aussi, s'il existe un étalon avec le même nom.</p>	<p>Non Corrigé</p>	<p>On peut étalonner un capteur avec plusieurs étalons. Il nous semble pertinent de garder les mêmes noms. Le logiciel est conçu pour accepter plusieurs variables en même temps sans qu'il se plante</p>
<p>prob061</p>	<p>Accueil</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Créer un étalonnage. 2. Appuyer sur le menu effacer de l'étalonnage 		<p>Le bouton "Effacer" n'a aucun effet.</p> 	<p>2</p>		<p>Corrigée</p>	<p>Erreur de programmation</p>

prob062	Graphique	<p>1. Créer un nouvel étalonnage. Avec un minimum différent de 0. 2. Dans la fenêtre, entrer une valeur pour l'étalonnage.</p>	Ajoute un point sur le graphique.	<p>Les valeurs entrées sont décalées. Par exemple, si l'échelle de l'étalonnage est de 20 à 50. Lorsque l'utilisateur entre la valeur 0 dans la zone de texte, il apparaît 40 dans la table de valeurs et du graphique.</p> 	Corrigé	Erreur de programmation	
prob063	Dans toutes les barres de titres des fenêtres			<p>Le mot pédagogique n'existe pas.</p> 	4	Il faut remplacer pédagogique par pédagogique.	Faute de Frappe

prob064	Graphique	<ol style="list-style-type: none"> 1. Acquérir des données. 2. Cliquez sur le bouton d'une courbe. 3. Choisir "Outils mathématiques" - "Modéliseur". 4. Choisir la parabole ou l'équation du troisième degré. 5. Superposé des points de façon à obtenir un nombre non-numérique dans l'équation. 6. Agrandir la fenêtre graphique. 	 <p>Une erreur se produit.</p>	Empêcher l'utilisateur de superposer deux points de la courbe du modèle.	Corrigé	Erreur de programmation
prob065	Graphique	<ol style="list-style-type: none"> 1. Acquérir des données 2. Cliquez sur le bouton d'une courbe. 3. Choisir "Outils mathématique" - "Surface" - "Entre deux abscisses et une ordonnées d'un point de la courbe". 	<p>Il est difficile de cliquer sur la courbe.</p>	5	Non Corrigé	Manque du temps
prob066	Accueil	<ol style="list-style-type: none"> 1. Connecter au moins 3 capteurs. 2. Cliquer sur un capteur. 3. Choisissez "Étalonner ce capteur en choisissant un étalon" - "Connecté à Orphy". 	 <p>Il n'y a qu'un choix de capteur alors qu'il n'y a deux de disponible.</p>	Afficher tous les capteurs disponibles.	Corrigé	Erreur de programmation

prob067	Capteur virtuel			Les variables sont trop près des champs de gauche. L'utilisateur à l'impression qu'il y a un lien entre les variables et les champs de gauche.	5	Encadrer les variables et les déplacer complètement à droite	Corrigé	Correction d'ordre ergonomique
prob068	Graphique	<ol style="list-style-type: none"> 1. Brancher deux capteurs de pression. 2. Étalonner un des capteurs avec le deuxième. 3. Modéliser la fonction. 4. Assigner la fonction au capteur. 5. Cliquer sur "Nouvelle expérience" - "Standard" 	<p>Une nouvelle sous fenêtre graphique apparaît.</p> 	<p>Il est impossible de changer pour une expérience selon le temps.</p>			Corrigé	Erreur de programmation

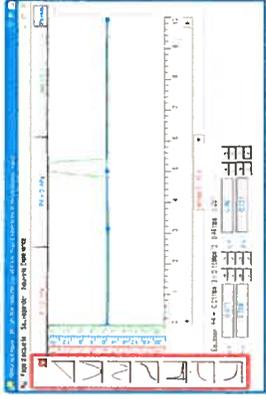
prob071	Graphique	<ol style="list-style-type: none"> 1. Brancher au moins deux capteurs. 2. Cliquer sur "Module graphique" dans la barre d'outils. 3. Changer l'abscisse avec la liste déroulante du bas de la fenêtre. 4. Appuyer sur "Acquisition". 	Le graphique affiche les valeurs de l'expérience.	<p>Le graphique arrête selon le temps et non selon la valeur d'un des capteurs.</p> 	2		Changer la valeur du "Quand" quand l'utilisateur change l'abscisse avec la liste déroulante du bas de la fenêtre.	Corrigé	Erreur de programmation
prob072	Vumètre	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cliquer sur le bouton "Vumètre". 2. Changer le minimum de l'échelle d'un vumètre 	L'échelle du vumètre a changée.	<p>La valeur du vumètres n'est pas zéro même si le capteur donne une valeur de zéro</p> 	2			Corrigé	Erreur de programmation
prob073	Amplificateur programmable	<ol style="list-style-type: none"> 1. Changer le maximum afin qu'il soit plus petit que le minimum 2. Appuyer sur "Valider" 		Le maximum peut être plus petit que le minimum	2		Faire une validation	Corrigé	Erreur de programmation
prob074	Amplificateur programmable	<ol style="list-style-type: none"> 1. Changer le maximum et le minimum pour qu'ils soient égaux. 2. Appuyer sur "Valider" 		Le maximum peut être égal au minimum	2			Corrigé	Erreur de programmation

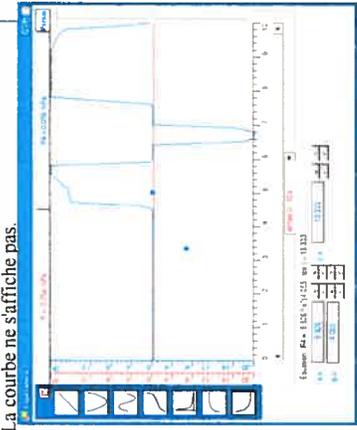
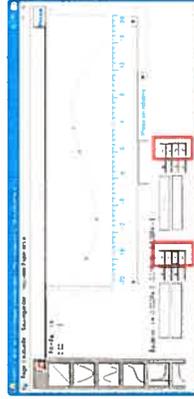
prob075	Vumètre	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cliquer sur échelle. 2. Changer le maximum et le minimum afin qu'ils soient identiques. 	L'échelle du vumètre a changée	L'échelle est du minimum jusqu'à minimum +1	2		Effectuer une validation	Corrigé	Erreur de programmation
prob076	Vumètre	<ol style="list-style-type: none"> 1. Créer un capteur avec une expression algébrique qui est constante. Par exemple, 2+2 2. Cliquer sur "Module vumètre". 	La fenêtre Vumètre s'affiche	<u>Une erreur se produit</u>	1			Corrigé	Erreur de programmation
prob077	Vumètre	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ajouter un capteur de pression dans le connecteur #4. 2. Ajouter un amplificateur programmable au capteur. 		La valeur du capteur est maintenant de -2 au lieu de 0	2			Corrigé	Erreur de programmation
prob078	Vumètre	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ajouter un capteur de pression. 2. Cliquer sur "Module vumètre". 3. Cliquer sur "Amplifier". 4. Changer le max et le min pour qu'ils deviennent identiques 	Le vumètre change d'échelle.	Il est possible que le maximum et le minimum soit égaux. De plus le vumètre est maintenant brisé. Il est impossible d'obtenir des valeurs sensées suite à ces actions.	3		Valider les champs.	Corrigé	Erreur de programmation
prob079	Vumètre	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ajouter un amplificateur programmable à un capteur. 2. Afficher la fenêtre vumètre. 3. Appuyer sur le bouton "Restaurer" à la droite du vumètre de l'amplificateur. 	L'échelle de l'amplificateur change	L'échelle de l'amplificateur ne devrait pas changer.	3			Corrigé	L'ampli devait être restauré aussi en même temps que le capteur. Or, L'ampli n'été pas restauré ce qui a mis l'expert dans une situation de confusion. Erreur de programmation

prob080	Accueil	1. Débrancher tous les capteurs 2. Appuyer sur le bouton "Module graphique" de la barre d'outils.		<u>Le programme lance une erreur.</u>	1			Empêcher l'utilisateur d'ouvrir le module graphique s'il n'y pas de connecteur de brancher.	Corrigé	Erreur de programmation
prob081	Graphique	1. Créer deux transformations ayant le même nom.		Il peut y avoir deux transformations avec le même nom.	4				Non Corrigé	Deux variables peuvent avoir le même nom mais elles ne peuvent pas avoir la même variable
prob082	Accueil	1. Connecter un capteur. 2. Cliquer sur le capteur. 3 Choisir "Transformer ce capteur avec une/deux relation(s) de causalité(s)" - "avec deux variables connecté à Orphy".	Rien	Le menu ne fonctionne pas.	4				Corrigé	Erreur de programmation
prob083	Définition d'une variable	1. Modifier le min et le max afin qu'ils soient identiques.	Une nouvelle variable est créée	Il est possible que le maximum et le minimum soit égaux. De plus, cela peut générer des erreurs dans le module graphique lorsque l'utilisateur étalonne avec cette variable et entre une valeur.	2				Corrigé	Erreur de programmation

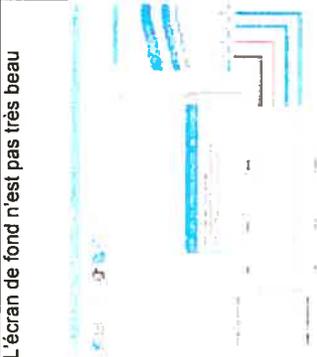


prob084	Définition de deux variables	1. Tapez deux noms identiques.			Il est possible de que les 2 noms soient identiques.			3	Faire une validation.	Non Corrigé	Deux variables peuvent avoir le même nom mais elles ne peuvent pas avoir la même variable
prob085	Graphique	1. Exporter une courbe vers Régressi			<u>Le programme lance une erreur.</u>		1			Corrigé	Erreur de programmation
prob086	Graphique	1. Cliquer sur l'échelle d'une courbe. 2. Choisir "Amplifier ce capteur"			Le menu n'a pas d'effet.		3			Corrigé	Erreur de programmation
prob087	Accueil				Il n'y a pas de menu "Expérience" dans la fenêtre d'Accueil			5	Ajouter un menu "Expérience" semblable à celui de la fenêtre graphique. L'ajout de ce menu facilitera l'utilisation du logiciel.	Non Corrigé	Manque du temps
prob088	Graphique	1. Acquérir des données. 2. Modéliser une des courbes. 3. Cliquer sur le bouton d'une des courbes. 4. Sélectionner "Copier dans le presse-papier" dans le menu.			La courbe du modéliseur ne fait pas partie de l'image			3	Copier la courbe du modéliseur.	Non Corrigé	Manque du temps. Par contre, l'utilisateur peut prendre une copie d'écran et la copier dans un éditeur de photo ou Word. Ensuite, il pourra l'imprimer.

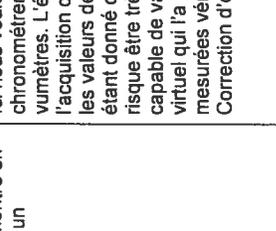
prob089	Graphique	<ol style="list-style-type: none"> 1. Acquérir des données. 2. Modéliser une des courbes. 3. Sauvegarder l'expérience. 4. Retourner à l'Accueil. 5. Ouvrir l'expérience qui a été sauvegardée. 	<p>La fenêtre graphique s'ouvre avec l'expérience et le modéliseur.</p>	<p>L'arrière-plan du modéliseur n'est pas de la même couleur que la courbe.</p> 	4	Changer l'arrière-plan du modéliseur à la suite de l'ouverture du fichier.	Corrigée	Correction d'ordre ergonomique
prob090	Capteur virtuel, Définition d'une variable			<p>La couleur de l'arrière-plan, des boutons et des étiquettes ne sont pas les mêmes que celles du système d'exploitation.</p>	5	Changer pour les couleurs du système car, l'utilisateur peut modifier ces couleurs pour améliorer le contraste s'il a des problèmes de vision. Changer la couleur de l'arrière-plan ou du texte seulement quand cela facilite l'indentification. Par exemple, l'arrière-plan du modéliseur peut nous donner une indication sur la courbe qui est modélisée.	Non corrigé	Manque du temps
prob091	Capteur virtuel	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cliquer sur "Module graphique" de la page d'accueil. 2. Appuyer sur "Acquérir des données". 3. Appuyer sur "Créer une variable" dans la zone "Param" pendant que l'expérience est en cours. 4. Créer une nouvelle variable. 	<p>La fenêtre "Capteur virtuel" s'affiche.</p>	<p>La saisie des données provenant de l'interface est interrompue jusqu'à ce que l'utilisateur ferme la fenêtre "Capteur virtuel".</p> <p>De plus, ce problème se produit pour n'importe quel fenêtre apparaissant pendant l'acquisition.</p>	3	Empêcher la création d'une nouvelle variable lorsque l'acquisition des données est en cours.	Corrigé	Erreur de programmation

prob092	Graphique	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ouvrir le module graphique. 2. Ouvrir le modèleur. 3. Cliquer sur le bouton "a*e (b/var) +c". 	Les points de la courbe s'affichent	<p>La courbe ne s'affiche pas.</p> 	3		Corrigé	Erreur de programmation
prob093	Graphique	<ol style="list-style-type: none"> 1. Créer un capteur virtuel contenant une division par zéro. 2. Afficher le module graphique. 3. Appuyer sur le bouton "Acquisition". 		<p>Une erreur se produit</p>	2		Corrigé	Erreur de programmation
prob094	Capteur virtuel	<ol style="list-style-type: none"> 1. Créer un capteur virtuel 2. Appuyer sur "Créer et enregistrer" 3. Fermer la fenêtre. 4. Appuyer sur "Capteur virtuel" de la page d'accueil. 5. Importer le capteur créé. 6. Appuyer sur "Créer et enregistrer". 		<p>Une erreur se produit</p> 	1		Corrigée	Erreur de programmation

ANNEXE 9: Mise à l'essai fonctionnelle : Experte en technologie éducationnelle

Résultat	Problème	degré d'importance					Solution suggérée	Correction du concepteur	Remarque du concepteur
		1	2	3	4	5			
Fenêtre d'avertissement de non détection d'interface	L'écran de fond n'est pas très beau 				4	Amélioration de la présentation	Amélioration de l'affichage de la fenêtre d'accueil	Correction d'ordre ergonomique	
	Pas d'identification écrite du module en passant la souris dessus			3		Identifier les modules	Identification de chaque module en passant par la souris en dessus de chaque icône.	Correction d'ordre ergonomique	
La grande fenêtre graphique (MDI/Graphique s'ouvre)	Difficile de savoir quoi faire intuitivement pour revenir à la page d'accueil : rien ne nous indique que la page d'accueil est derrière cette page graphique vide	1				Revenir à la page d'accueil	Correction de l'action annulée en revenant à la page d'accueil au lieu de passer au module graphique	Correction d'ordre ergonomique	
Fenêtre graphique s'ouvre avec les 4 capteurs	On ne se sait pas faire dans ce module qui devrait nous inciter à travailler en mode simulation. On ne sait pas comment quitter le module	1				Revenir à la page d'accueil	Ajout du menu retour à la page d'accueil dans le module graphique	Ici nous avons décidé de rentrer directement dans le mode d'expérimentation, le mode observation avec quatre capteurs en même temps semble n'est pas pertinent alors que dans le mode expérience le professeur pourra choisir la ou les variables à observer en conjonction avec les vumètres. Correction d'ordre ergonomique	

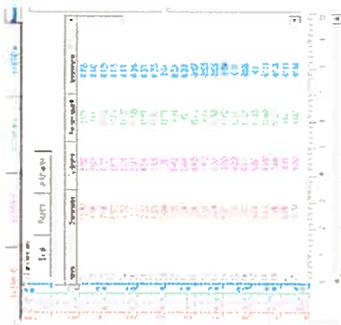
Message : « afficher la partie de la courbe ... etc.	Pas très pertinent car il n'y a pas de courbe							Corrigée et remplacée par « Sélectionner une partie de l'échelle à affiché »	Ici, nous voulons permettre à l'élève de changer l'échelle avant d'entreprendre une nouvelle acquisition de données. Ceci est très utile lorsqu'on veut mesurer des mesures qui sont très faibles par rapport à l'échelle par défaut du capteur. Correction d'ordre ergonomique
Une bande rouge apparaît à gauche de l'écran	Je ne sais pas pourquoi elle monte et descend quand je clique dessus	1						Corrigé. La bande ne bouge plus en cliquant dessus	Erreur de programmation du concepteur qui a mis l'expert dans une situation de confusion
Ok, la fenêtre apparaît avec tableur et graphique sans données	Impossible de quitter le mode isoler la courbe et revenir à toutes les courbes	1						Non corrigé. Rendre consistant le choix de sélectionner une courbe plutôt qu'offrir le choix d'isoler cette courbe	Ici nous voulons permettre à l'élève d'analyser soit une seule courbe à la fois, deux courbes ou soit plusieurs courbes en même temps. L'élève peut à tout moment cocher au plus 6 les courbes pour les afficher tous ensemble
Ok	Le carré n'est pas très intéressant		4					Corrigé	Correction d'ordre ergonomique
	Impossible d'effacer le texte et son carré	1						Corrigé	Erreur de programmation du concepteur

<p>Grande fenêtre grise</p>	<p>Difficile de savoir quoi faire intuitivement pour revenir à la page d'accueil</p>	<p>2</p>			<p>Corrigé. Ajout du menu retour à la page d'accueil dans le mode graphique</p>	<p>Correction d'ordre ergonomique</p>
	<p>La seule valeur qui me paraît significative est celle des secondes, encore qu'il ait peut-être trop de décimale après le chiffre. Le format des heures et des jours est impossible à interpréter. By the way, à quoi sert cette montre ?</p>	<p>2</p>			<p>Correction de la montre en la transformant à un chronomètre.</p>	<p>Ici nous voulons permettre de chronométrer la page d'accueil et les vumètres. L'élève pourra arrêter l'acquisition de données pour pouvoir lire les valeurs des capteurs et de la montre étant donné que l'acquisition de donnée risque être très vite. Aussi l'élève sera capable de valider l'équation du capteur virtuel qui l'a crée en vérifiant si les valeurs mesurées vérifient cette équation. Correction d'ordre ergonomique</p>
	<p>Fautes d'orthographe</p>		<p>5</p>	<p>Étalonner ce capteur en choisissant un étalon</p>	<p>Erreur corrigée</p>	<p>Faute de frappe</p>
<p>J'ai tenté d'ouvrir un fichier jpeg, le logiciel m'a donné un message d'erreur et représenté le choix, j'ai cliqué sur annuler et le programme a sauté</p>			<p>4</p>		<p>Correction de l'erreur</p>	<p>Erreur de programmation. Le logiciel renvoi maintenant un message à l'utilisateur l'informant de choisir un fichier dont l'extension est xao</p>
<p>Clic sur l'icône flèche</p>	<p>Améliorer la présentation (ex : échelle)</p>		<p>4</p>			<p>Correction d'ordre ergonomique</p>
	<p>Changer le titre de la page : frmVumeter</p>		<p>4</p>		<p>Correction du changement du titre de la page vumètre</p>	<p>Correction d'ordre ergonomique</p>

	<p>A quoi servent les icônes</p> 	3	Identification des icônes	Ajout d'un texte expliquant le rôle de chaque icône. Le texte apparaîtra à chaque fois que la souris passe dessus de chaque icône.	Correction d'ordre ergonomique
	<p>J'ai cliqué une fois sur la . l'échelle du capteur est passée à +/- 15hPa</p>	3		Correction du mode (retour) Correction du changement du mode de représentation des vumètres	Erreur de programmation
	<p>J'ai cliqué sur rien à droite en haut de l'écran et la représentation du vumètre a changé</p>	3	Ajouter les icônes de représentations du vumètre	Correction du mode (retour) Correction du changement du mode de représentation des vumètres	Correction d'ordre ergonomique
<p>Clic sur échelle</p>	<p>Je clique sur et l'échelle passe de -1 à +1. Je clique sur l'échelle et le nom de mon capteur change pour capteur optique et clique ensuite sur Et le capteur devient capteur cardiaque</p> 	1		Correction du mode (retour) Correction du changement du mode de représentation des vumètres	Erreur de programmation

	<p>En cliquant plusieurs fois sur la flèche le programme saute</p> 	1		<p>Conclusion : le module vumètre est assez instable</p>	<p>Correction du mode (retour) du mode de représentation des vumètres</p>	<p>Erreur de programmation</p>
<p>J'essai de cliquer pour imprimer sur l'écran la valeur du réticule, impossible il ne reste pas affiché</p>	<p>3</p>	3	<p>Il serait intéressant de pouvoir imprimer la valeur montrée par le réticule par un clic de souris</p>	<p>Ajout du texte dans le mode Réticule, le suiveur et le du taux de variation</p>	<p>Correction d'ordre sémiotique. Ici nous voulons aider l'élève à augmenter ses activités de coordinations entre le registre analytique, numérique et graphique.</p>	<p>idem à N24</p>
<p>ok</p>	<p>idem</p>	3	<p>idem</p>	<p>idem</p>	<p>idem</p>	<p>idem à N24</p>
<p>ok</p>	<p>Je n'ai pas trouve mon programme Excel. Le programme saute</p>	1		<p>Correction du mode transfert des courbes</p>	<p>Erreur de programmation</p>	<p>Erreur de programmation</p>
	<p>J'inscris un mot dans la boîte de texte, j'arrive plus à en sortir, même en cliquant à côté</p>	1		<p>Améliorer la sortie du mode texte, rendre plus intuitive (sur clic de souris en dehors de la boîte de texte par exemple)</p>	<p>Amélioration du mode « Ajouter un texte »</p>	<p>La manipulation du texte est devenue plus conviviale. Correction d'ordre ergonomique</p>

<p>ok</p>	<p>Je clique sur une valeur dans le tableau. Il ne se passe rien</p> <p>A quoi sert d'afficher les valeurs si on ne peut pas les représenter sur la courbe ? ou afficher la partie de la courbe correspondante aux valeurs sélectionnées dans le tableau ?</p>	<p>1</p>	<p>Faire le lien avec une valeur du tableau et son point sur la courbe.</p>	<p>Établir le lien entre le tableau et le graphique</p>	<p>Ici, nous voulons aider les élèves à augmenter leur activité de traitement, de conversion et de la coordination entre le registre analytique, numérique et graphique. Correction d'ordre sémiotique</p>
	<p>Quand je clique n'importe où sur le graphique, mon curseur revient toujours dans la boîte de texte (énervant)</p>	<p>2</p>		<p>Amélioration du mode « Ajouter un texte »</p>	<p>La manipulation du texte est devenue plus conviviale. Correction d'ordre ergonomique</p>
<p>Je peux faire bouger la bande en rouge comme je veux, ce qui m'amène à me demander à quoi elle sert</p>		<p>2</p>	<p>Bloquer ce choix quand on est en mode d'analyse de la courbe ?</p>	<p>Correction de la bande du vumètre</p>	<p>Erreur de programmation</p>
<p>Difficile de sortir du mode modéliseur rapidement sur clic de souris quand on est dans le mode, sans nécessairement revenir et désactiver dans outils mathématiques</p>		<p>2</p>	<p>Désactivement rapide dans le mode modéliseur important surtout quand le choix du mode modéliseur a été fait par erreur.</p>	<p>Ajout d'un bouton pour rendre la sortie du monde Modéliseur plus conviviale</p>	<p>Correction d'ordre ergonomique</p>

<p>L'option tableau vient se superposer à la courbe et se juxtapose au tableau déjà sélectionné</p>	<p>Cette option devient assez redondante quand on a déjà choisi de l'afficher par le biais des choix offerts dans la variable</p> 	<p>2</p>	<p>Sortir de cette option sans passer par paramètres</p>	<p>Non corrigé. Par contre, on a ajouté un bouton pour rendre la fermeture du tableau plus conviviale</p>	<p>Ici, nous voulons permettre aux professeurs et aux élèves de travailler de façon essentiellement numérique. Par exemple, ceci est utile pour montrer que l'ordonnée d'un sommet est zéro et que les ordonnées des points autour du sommet change de signe.</p>
<p>Bugée</p>	<p>Dès que j'y touche, je perds la courbe</p> 	<p>1</p>		<p>Correction de la barre de défilement</p>	<p>Erreur de programmation</p>
<p>Pas d'option de sauvegarde de l'expérience</p>	<p>1</p>			<p>Ajout du menu pour sauvegarder l'expérience</p>	<p>Correction d'ordre ergonomique</p>



Erreur dans le contenu du message	Quelle différence y a t il entre afficher la partie de la courbe etc. » et « amplifier ce capteur ? »	1			Correction de la phrase	Correction d'ordre ergonomique
Ne tient pas compte d'Enter			5	Au lieu d'ordonnée on devrait lire abscisse	Correction de l'erreur	Erreur de programmation
			4	Pouvoir valider avec ok ou enter au clavier	Corriger	Correction d'ordre ergonomique

ANNEXE 10: PROTOCOLE DE LA LOI D'OHM POUR LES ÉTUDIANTS DU SECONDAIRE 5

1ère Étape

- Brancher le circuit
- Brancher le système ExAO à l'Ordinateur.

1) Allez dans le graphique

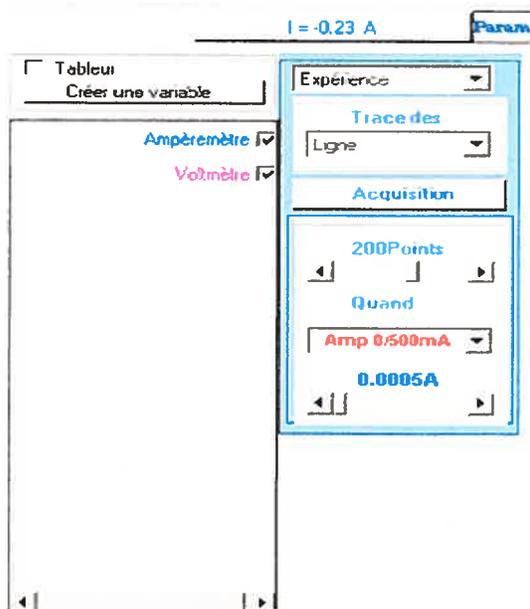


Graphique

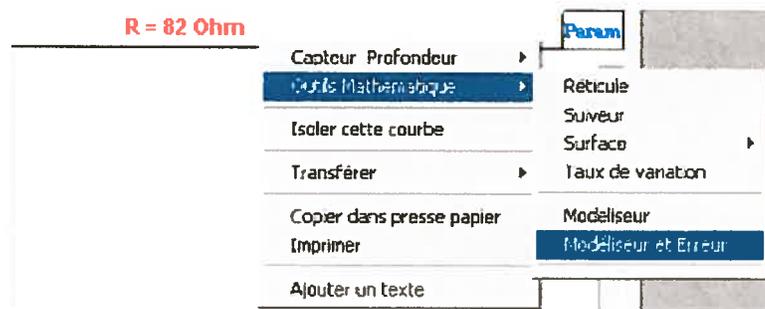
Assurez-vous que le Voltage est à Zéro.

2) Cliquez sur param.

- Choisissez maintenant le mode Expérience (Cliquez sur Observation et choisissez ensuite Expérience)
- Paramétrer une expérience
 - i. Prenez 200 points au lieu de 100 points.
 - ii. Mettez le courant en abscisse (Cliquez, juste en dessous de l'étiquette « Quand », sur le temps et choisissez après le courant ou l'ampèremètre).
 - iii. En dessous de l'étiquette « varie », Déplacer le curseur complètement à gauche pour choisir la valeur minimale)



- 3) Assurez-vous que le voltage est à Zéro
- 4) Cliquez sur Acquisition
- 5) Varier, **dans le même sens et doucement**, le voltage et observer la variation du voltage en fonction du courant sur le graphique. **Ne dépasser pas 15 Volts**
- 6) Avec le module Modéliseur et Erreur



- a. Modéliser la droite du voltage en fonction du courant
- b. Sauvegarder l'expérience (Fichier: LoiOhmModélisation1)

ANNEXE 11: Réponses et résultat du premier élève Du secondaire 5

De façon générale, comment classez-vous la facilité de l'utilisation du logiciel?

- A) Utilisation très facile;
- B) *Utilisation facile;*
- C) Utilisation difficile;
- D) Utilisation très difficile.

De façon générale, comment classez-vous la facilité de l'utilisation du mode graphique (Pour démarrer une expérience et afficher sur un graphique la relation de la loi d'Ohm entre le courant et le voltage)?

- A) *Utilisation très facile;*
- B) Utilisation facile;
- C) Utilisation difficile;
- D) Utilisation très difficile.

Avec le logiciel MicrolabExAO, vous avez utilisé une nouvelle méthode pour trouver la meilleure droite qui passe par un nuage de point. Avez-vous eu des difficultés à comprendre cette nouvelle méthode?

- A) Je n'ai pas eu des difficultés à la comprendre et je l'ai facilement comprise;
- B) *Je n'ai pas eu des difficultés. À la comprendre et je l'ai très facilement comprise;*
- C) J'ai eu des difficultés à la comprendre, mais je l'ai plus ou moins comprise à la fin;
- D) J'ai eu des difficultés à la comprendre, mais je l'ai comprise à la fin;
- E) J'ai eu beaucoup de difficultés à la comprendre, mais je l'ai comprise à la fin;
- F) Je n'ai pas compris la méthode car elle est très difficile.

Comment avez-vous trouvé l'application de cette méthode de modélisation (qui consiste à trouver la meilleure droite qui passe par un ensemble de points expérimentaux) avec le logiciel MicrolabExAO?

- A) Méthode très facile;
- B) Méthode facile à appliquer;
- C) *Méthode plus ou moins facile à appliquer;*
- D) Méthode difficile à appliquer;
- E) Méthode très difficile à appliquer

Résultat de la modélisation algébrique du premier élève du secondaire 5

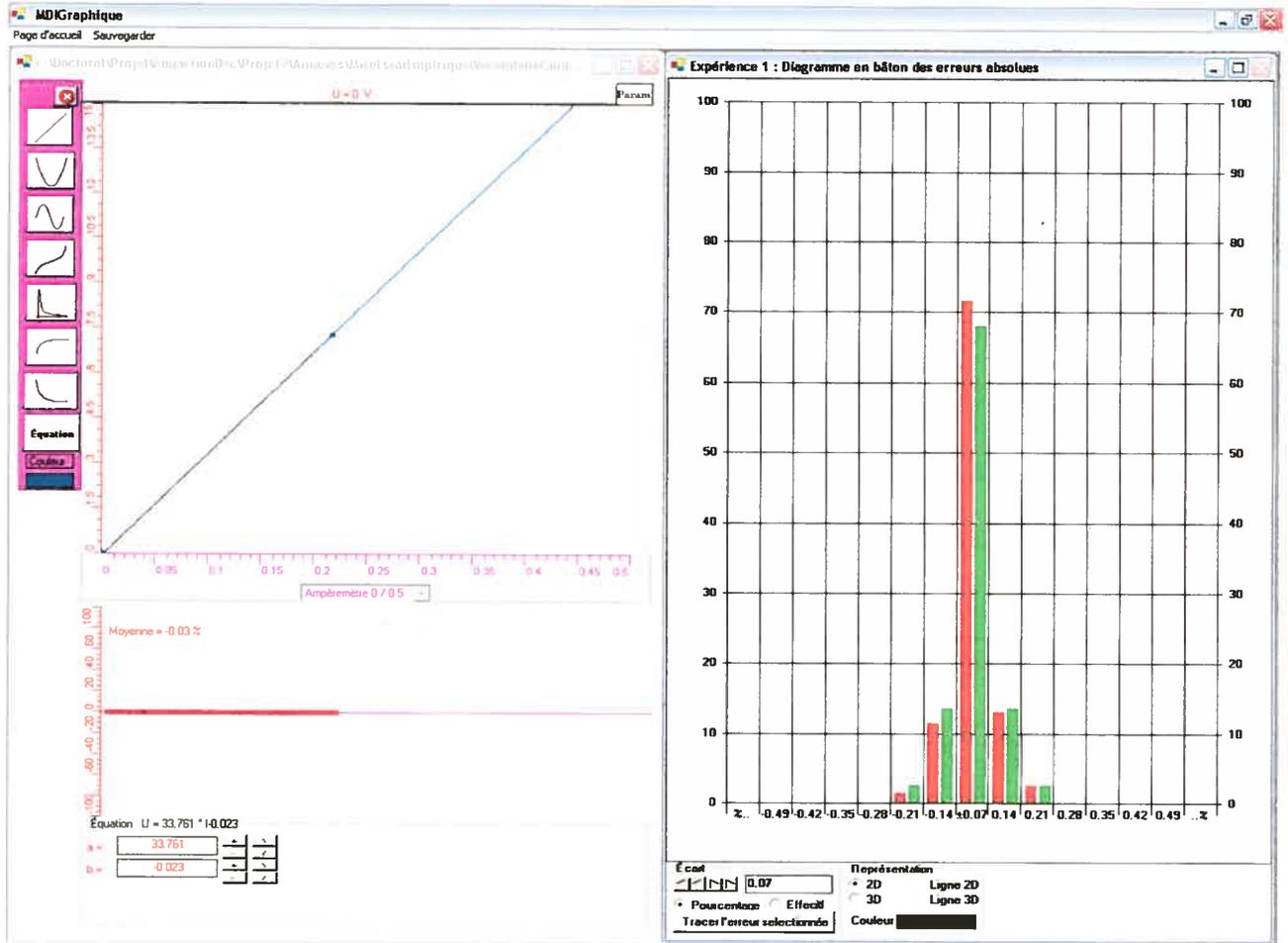


Figure 80: Résultat de la modélisation algébrique du premier élève au secondaire 5

ANNEXE 12: Réponses et résultat du Deuxième élève du secondaire 5

De façon générale, comment classez-vous la facilité de l'utilisation du logiciel?

- E) Utilisation très facile;
- F) *Utilisation facile;*
- G) Utilisation difficile;
- H) Utilisation très difficile.

De façon générale, comment classez-vous la facilité de l'utilisation du mode graphique (Pour démarrer une expérience et afficher sur un graphique la relation de la loi d'Ohm entre le courant et le voltage)?

- A) Utilisation très facile;
- B) *Utilisation facile;***
- C) Utilisation difficile;
- D) Utilisation très difficile.

Avec le logiciel MicrolabExAO, vous avez utilisé une nouvelle méthode pour trouver la meilleure droite qui passe par un nuage de point. Avez-vous eu des difficultés à comprendre cette nouvelle méthode?

- A) Je n'ai pas eu des difficultés à la comprendre et je l'ai facilement comprise;
- B) Je n'ai pas eu des difficultés. À la comprendre et je l'ai très facilement comprise;
- C) J'ai eu des difficultés à la comprendre, mais je l'ai plus ou moins comprise à la fin;
- D)-J'ai eu des difficultés à la comprendre, mais je l'ai comprise à la fin;
- E)- *'ai eu beaucoup de difficultés à la comprendre, mais je l'ai comprise à la fin;***
- F)-Je n'ai pas compris la méthode car elle est très difficile.

Comment avez-vous trouvé l'application de cette méthode de modélisation (qui consiste à trouver la meilleure droite qui passe par un ensemble de points expérimentaux) avec le logiciel MicrolabExAO?

- A) Méthode très facile;
- B) *Méthode facile à appliquer;***
- C) Méthode plus ou moins facile à appliquer;
- D) Méthode difficile à appliquer;
- E) Méthode très difficile à appliquer.

Résultat de la modélisation algébrique du deuxième élève du secondaire 5

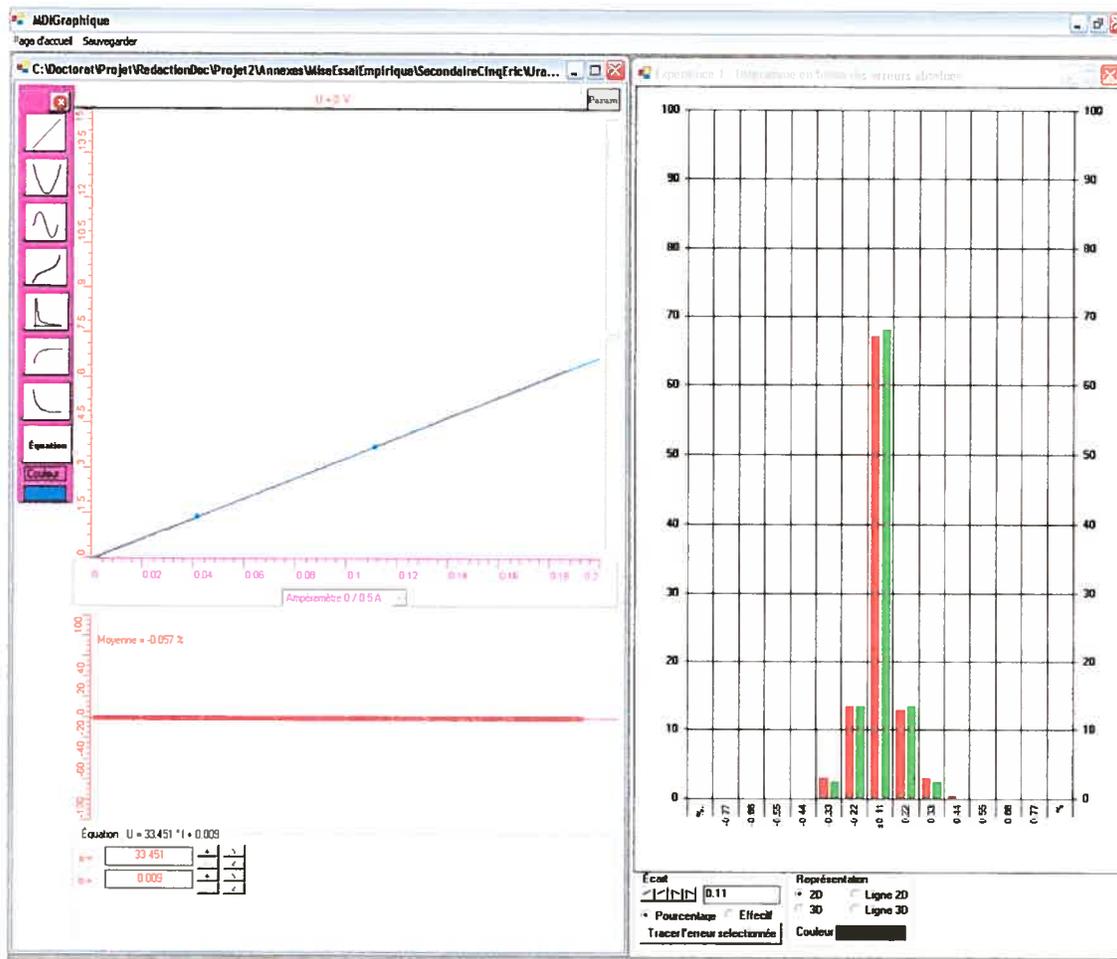


Figure 81: Résultat de la modélisation algébrique du deuxième élève au secondaire 5

ANNEXE 13: Réponses et résultat du troisième élève du secondaire 5

De façon générale, comment classez-vous la facilité de l'utilisation du logiciel?

- A) Utilisation très facile;
- B) *Utilisation facile;***
- C) Utilisation difficile;
- D) Utilisation très difficile.

De façon générale, comment classez-vous la facilité de l'utilisation du mode graphique (Pour démarrer une expérience et afficher sur un graphique la relation de la loi d'Ohm entre le courant et le voltage)?

- A) Utilisation très facile;
- B) *Utilisation facile;***
- C) Utilisation difficile;
- D) Utilisation très difficile.

Avec le logiciel MicrolabExAO, vous avez utilisé une nouvelle méthode pour trouver la meilleure droite qui passe par un nuage de point. Avez-vous eu des difficultés à comprendre cette nouvelle méthode?

- A) Je n'ai pas eu des difficultés à la comprendre et je l'ai facilement comprise;
- B) Je n'ai pas eu des difficultés à la comprendre et je l'ai très facilement comprise;
- C) J'ai eu des difficultés à la comprendre, mais je l'ai plus ou moins comprise à la fin;
- D) *J'ai eu des difficultés à la comprendre, mais je l'ai comprise à la fin;***
- E) J'ai eu beaucoup de difficultés à la comprendre, mais je l'ai comprise à la fin;
- F) Je n'ai pas compris la méthode car elle est très difficile.

Comment avez-vous trouvé l'application de cette méthode de modélisation (qui consiste à trouver la meilleure droite qui passe par un ensemble de points expérimentaux) avec le logiciel MicrolabExAO?

- A) Méthode très facile;
- B) *Méthode facile à appliquer;***
- C) Méthode plus ou moins facile à appliquer;
- D) Méthode difficile à appliquer;
- E) Méthode très difficile à appliquer.

Résultat de la modélisation algébrique du troisième élève du secondaire 5

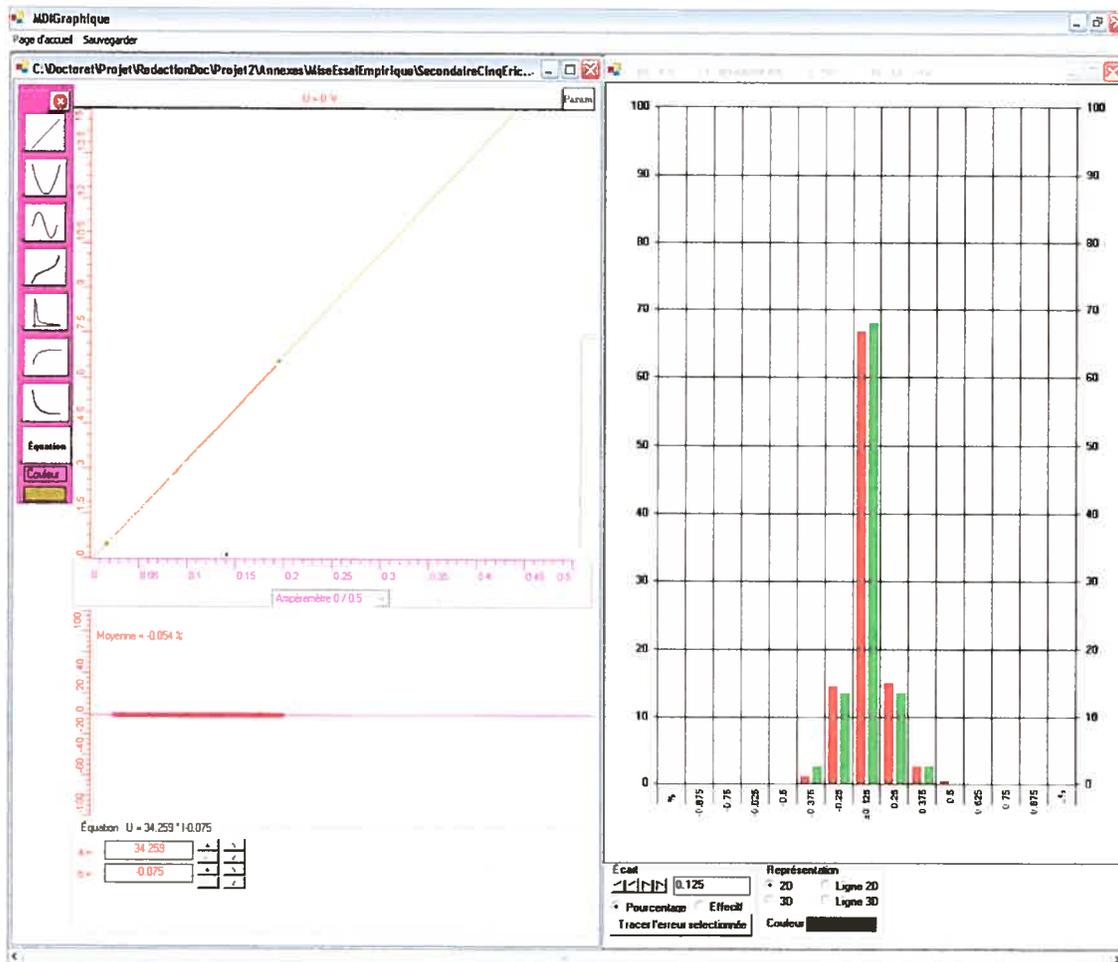


Figure 82: Résultat de la modélisation algébrique du troisième élève au secondaire 5

ANNEXE 14: Données brutes du phénomène de la pression de l'eau

profondeur 0 / 200 mm	Pression relative -20 / 20 Pa
9	1.15347018572825
18	2.05278592375367
27	2.99120234604106
36	3.69501466275660
45	4.82893450635386
54	5.72825024437928
63	6.43206256109482
72	7.40957966764418
81	8.46529814271750
90	9.44281524926686
99	10.42033235581620
108	11.39784946236560
117	12.33626588465300
126	13.39198435972630
135	14.48680351906160
144	15.38611925708700
153	16.24633431085040