HAL
archives-ouvertes.fr

Stratégie de résolution d'exercice en mécanique du point matériel Stratégie des enseignants et difficultés des étudiants de la première année universitaire Exemple du problème de la machine d'Atwood

Ahmet Yavuz

▶ **To cite this version:**

Ahmet Yavuz. Stratégie de résolution d'exercice en mécanique du point matériel Stratégie des enseignants et difficultés des étudiants de la première année universitaire Exemple du problème de la machine d'Atwood. Physique [physics]. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2007. Français. tel-00174030

HAL Id: tel-00174030
https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00174030

Submitted on 21 Sep 2007

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

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

UNIVERSITE JOSEPH FOURIER – GRENOBLE 1

THESE
Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER

Ecole doctorale de Mathématique, Sciences et Technologie de l'Information, Informatique

Spécialité : DIDACTIQUE DE LA PHYSIQUE

Présentée et soutenue publiquement par

Ahmet YAVUZ
Le 29 juin 2007

Stratégie de résolution d'exercice en mécanique du point matériel

Stratégie des enseignants et difficultés des étudiants de la première année universitaire Exemple du problème de la machine d'Atwood

Composition du jury :

Rapporteurs	:	M. Jacques TOUSSAINT M. Serge PELISSIER
Examinateurs	:	M. Christian BUTY Mme. Claudine KAHANE
Directeurs	:	M. Jean DUFAYARD M. Daniel LACROIX Mme. Claire WAJEMAN

Thèse préparée au sein de l'équipe
METAH, Laboratoire d'Informatique de Grenoble – LIG

TABLE DES MATIÈRES

Introduction 18

Chapitre I Synthèse bibliographique sur les difficultés des étudiants et les aides proposées..... 24

1Quelques repères sur le « problème » et la « résolution de problèmes » 24
1.1Problème.....24
1.1.1Définitions générales.....24
1.1.2Problèmes en physique.....25
1.2Résolution de problème.....26
1.2.1Caractérisation de la résolution de problème.....26
1.2.2Résolution de problème en physique.....28
1.2.2.1Deux champs distincts 28
1.2.2.2Faits bruts et Faits scientifiques 29
1.2.2.3Usages des langages 30

2Synthèse bibliographique : comment les étudiants résolvent-ils les problèmes ? Quelles sont les difficultés récurrentes? 32
2.1Différences entre expert et novice.....32
2.2Difficultés des étudiants.....33
2.2.1 Difficultés d'ordre méthodologique.....33
2.2.2Difficultés d'ordre conceptuel.....35
2.3Quels sont les besoins des étudiants ? 36

3Revue des travaux sur les stratégies de résolution.....37

4Conclusion du chapitre 41

Chapitre II Rapport de l'expert à la résolution de problème de dynamique du point : Construction d'une grille d'analyse..... 46

1Problème de la machine d'Atwood et sa résolution.....46
1.1Présentation du problème de la machine d'Atwood.....46
1.2Choix et contraintes pour construire la résolution de référence 47

2Résumé de la résolution du problème de la machine d'Atwood.....48
2.1Approche qualitative.....49
2.2Résolution quantitative.....49
2.2.1Discussion des conditions d'application du PFD.....49
2.2.2Etude de la masse M par l'utilisation du PFD.....49
2.2.3Etude des autres systèmes par le PFD.....50
2.2.4Etude de la rotation de la poulie.....50
2.2.5Conservation de la longueur de la corde.....50
2.3Contrôle des résultats 51

3Description primitive de la résolution en vue des analyses didactiques 51

41e Analyse : Description et analyse générale de la résolution de l'Expert de Référence :

Son intention et sa stratégie 54
4.1Stratégie 54
4.2Intention.....54
52e analyse : Description et analyse didactique de la stratégie de l'Expert de Référence – Organisations praxéologiques 56
5.1Présentation de la théorie anthropologique de savoir 56
5.1.1Objet, Personnes et Institution 57
5.1.2Analyse écologique.....58
5.1.3Analyse praxéologique 59
5.2Organisation praxéologique pour la résolution de l'Expert de Référence.....60
5.2.1Organisation praxéologique de l'étape 1 (Analyse qualitative).....60
5.2.2Organisations praxéologiques de l'étape 2 (Résolution « quantitative » du problème).....61
5.2.2.11e Organisation praxéologique dans l'étape 2: Utilisation du PFD.....63
5.2.2.22e Organisation praxéologique dans l'étape 2 : Utilisation du théorème du moment cinétique 64
5.2.2.33e Organisation praxéologique dans l'étape 2 : Etude de la conservation de la longueur de la corde 65
5.2.3Organisation praxéologique de l' étape 3 (Contrôle des résultats).....65
5.3Conclusion pour l'analyse praxéologique.....66
63e analyse : Analyse détaillée de l'accomplissement des tâches à l'aide de l'outil de modélisation MOT (Modélisation par des Objets Typés).....67
6.1Présentation théorique de l'outil de modélisation MOT.....67
6.2Intrants et produits des tâches dans la technique d'utilisation du PFD.....67
6.2.1Mobilisation des connaissances théoriques 68
6.2.2Prise en compte des faits de l'énoncé 68
6.2.3Réutilisation d'un produit d'une tâche comme intrant d'une autre tâche 69
6.2.4Côté registres sémiotiques.....69
6.3Exemples d'analyse de l'accomplissement de tâches.....69
6.3.1Tâche 5 « faire le bilan de force ».....69
6.3.2Analyse de l'établissement de la relation entre les forces de tension dans la résolution de l'Expert de Référence.....72
6.4Conclusion pour la modélisation MOT.....73
7Conclusion.....73
7.1Outils pour décrire un rapport au savoir dans la résolution d'un problème de mécanique 73
7.2Résolution de l'Expert de Référence.....74
7.3Exploitation ultérieure de la grille d'analyse 74
Chapitre III Evolution du rapport institutionnel des enseignants à l'objet de savoir « résolution du problème de la machine d'Atwood » depuis 1782.....78
1Méthodologie d'analyse 78
2«Enseignant» au moment de la création du dispositif de la machine d'Atwood.....79
2.1Intentions de l'enseignant.....79
2.2Stratégie de l'enseignant de 1784 80
2.3Organisations praxéologiques.....81

2.3.1Etape 1 : Reproduire le dispositif expérimental permettant de ralentir le mouvement de masses dans le champ du pesanteur....81
2.3.2Etape 2 : Modélisation du dispositif expérimental....83
2.3.3Etape 3 : Calcul du taux de ralentissement du mouvement....83
2.3.4Etape 4 : Prédictions sur le mouvement et vérifications expérimentales....85
2.4Conclusion pour le manuel de 1784....87
3L'enseignant un siècle après la création du dispositif....89
3.1Intention de l'enseignant et sa stratégie....89
3.2Organisation praxéologique liée à la résolution du problème de la machine d'Atwood (1880)....90
3.3Conclusion pour le manuel de 1880....92
4Conclusion....94
Chapitre IV Résolution du problème de la machine d'Atwood par les enseignants.... ..100
1Etude a priori de la résolution du problème de la machine d'Atwood par un enseignant actuel....101
1.1Raccourcis possibles des enseignants....102
1.1.11er raccourci : « centration » sur la résolution quantitative du problème....102
1.1.22e raccourci : Réduction du nombre de systèmes à étudier....103
1.1.33e raccourci : Argumenter ou démontrer (ou ni l'un ni l'autre)....104
1.1.44e raccourci : Accomplissement (exécution) automatique des tâches....105
1.2En résumé....107
2Présentation et analyse des résolutions des enseignants....107
2.1Résolution R1....108
2.1.1Raccourcis dans la résolution R1....109
2.1.2Cohérence de la résolution R1....109
2.1.2.1Première hypothèse sur la résolution R1....109
2.1.2.2Deuxième hypothèse sur la résolution R1....110
2.1.2.3Troisième hypothèse sur la résolution R1....111
2.1.3Conclusion -R1....111
2.2Résolution R2....112
2.2.1Raccourcis dans la résolution R2....112
2.2.2Conclusion -R2....113
2.3Résolution R3....113
2.3.1Raccourcis dans la résolution R3....114
2.3.2Conclusion -R3....115
2.4Résolution R4....115
2.4.1Raccourcis dans la résolution R4....115
2.4.2Conclusion -R4....116
2.5Résolution R5....117
2.5.1Raccourcis dans la résolution R5....119
2.5.2Relations entre les accélérations et les forces de tension....120
2.5.3Conclusion -R5....122
2.6Autres résolutions....122
3Conclusion....123

Chapitre V Rapport institutionnel des enseignants aux difficultés et aux besoins des étudiants..... 130

1Méthodes de résolution dans l'enseignement de la dynamique du point matériel 131
1.1Changement des noms de manuels 131
1.2S'agit-il du changement de la stratégie des enseignants dans les dernières décennies ? 131
1.3Présentation des méthodes de résolution.....133

2Analyse des méthodes de résolution 135
2.1Qu'est-ce qu'une méthode de résolution ? 135
2.1.1MR-Bréal 2003.....136
2.1.2MR-UJF.....137
2.2Comment les méthodes ont-elles été créées ? 137
2.3Pourquoi propose-t-on des méthodes ? 138
2.4Changement de la stratégie de résolution 139
2.5Contraintes et difficultés liées aux méthodes de résolution.....139

3Conclusion 140

Chapitre VI Rapport personnel des étudiants à la résolution du problème de la machine d'Atwood..... 144

1Analyse a priori pour la résolution du problème de la machine d'Atwood par les étudiants 146

2Analyse globale des résolutions des étudiants.....148
2.1Partie algorithmique dans la résolution des étudiants.....148
2.1.1Structure de la résolution des étudiants 148
2.1.2Difficultés des étudiants concernant les tâches 152
2.2Partie non algorithmique dans la résolution des étudiants.....154
2.3Conclusion 156

3Analyse détaillée de stratégies d'étudiants 157
3.1Catégories de stratégie 157
3.2Stratégie de résolution S1.....158
3.2.1Organisation des tâches dans la copie de l'étudiant E3.....159
3.2.2Difficultés de l'étudiant dans la partie algorithmique de la résolution.....160
3.2.3Conclusion pour la Stratégie de résolution S1.....161
3.3Stratégie de résolution S2.....161
3.4Stratégie de résolution S3.....163
3.4.1Analyse de la résolution de l'étudiant E9 164
3.4.2Analyse de la résolution de l'étudiant E15.....166
3.4.3Conclusion pour les résolutions des étudiants E9 et E15.....167
3.5Stratégie de résolution S4.....169
3.5.1Partie algorithmique dans les résolutions des étudiants E4 et E12.....170
3.5.2Partie non algorithmique dans les résolutions des étudiants E4 et E12.....171
3.5.3Conclusion pour les résolutions des étudiants E4 et E12.....174
3.6Conclusion sur les stratégies des étudiants et leur difficultés.....176

4Conclusion.....176

Chapitre VII Proposition d'une stratégie de résolution aux étudiants et Analyse des données 182

1Quelle stratégie proposer pour aider les étudiants à résoudre qualitativement le problème ?.....183
1.1Stratégies proposées dans l'étude bibliographique 183
1.2Stratégie de résolution proposées aux étudiants.....184

2Présentation et analyse d'un problème conçu.....185
2.1Etape 1 : «Etude qualitative » 187
2.1.1Analyses des affirmations 187
2.2Etape 2 : Etude quantitative (Résolution quantitative du problème).....189
2.2.1Présentation de la résolution quantitative et ses difficultés 189
2.2.2Liens entre l'étude qualitative et quantitative.....190
2.3Etape 3 : Contrôle des résultats.....190
2.4Stratégie de l'étudiant attendue par l'enseignant 190

3Méthodologie d'analyse pour les copies d'étudiants 191

4Accomplissement des tâches par les étudiants.....192
4.1Etape 1 : «Etude qualitative ».....192
4.2Etape 2 : Etude quantitative (Résolution quantitative du problème) 195
4.3Etape 3 : Contrôle des résultats.....195

5Analyse des stratégies de résolution des étudiants.....198
5.11e groupe d'étudiants.....199
5.1.1Analyse de la copie de l'étudiant e10.....199
5.1.1.1Cohérence dans l'étude qualitative.....199
5.1.1.2Transfert de la relation entre les tensions 202
5.1.1.3Cohérence dans la partie algorithmique de la résolution quantitative 202
5.1.1.4Contrôle des résultats 202
5.1.1.5Recherche de la cohérence.....202
5.1.2Analyse de la copie de l'étudiant e21.....203
5.1.2.1Cohérence dans l'étude qualitative.....203
5.1.2.2Etude quantitative du dispositif 2 par une analogie.....204
5.1.2.3Contrôle de l'analogie et des résultats 204
5.1.2.4Comparaison de l'étude quantitative avec l'étude qualitative.....206
5.1.2.5Conclusion pour l'analyse de la copie de l'étudiant e21.....207
5.1.3Conclusion pour les étudiants du 1e groupe.....207
5.22e groupe d'étudiants.....207
5.2.1Analyse de la copie de l'étudiant e7.....208
5.2.1.1Analyse qualitative de l'égalité des tensions.....208
5.2.1.2Transfert de l'égalité des tensions de l'étude qualitative à l'étude quantitative.....209
5.2.1.3Difficultés dans la partie algorithmique de la résolution quantitative.....210
5.2.1.4Contrôle des résultats.....211
5.2.1.5Conclusion pour l'analyse de la copie de l'étudiant e7.....211

6Conclusion.....212

Conclusion..... 216

INDEX DES FIGURES

Figure 1: Organisation du chapitre 1.....19

Figure 2: Schématisation de la résolution d'un problème d'après Reif [7].....22

Figure 3: Allers-retours entre le monde des théories-modèles et le monde des objets-événements-faits selon Gaidoz, Vince et Tiberghien [4].....24

Figure 4: Faits bruts et faits scientifiques d'après Guillaud [13].....25

Figure 5: Notion de système en dynamique du point matériel d'après Reif [7].....30

Figure 6: Principales étapes de la résolution de l'Expert de Référence.....44

Figure 7: Caractérisation de la résolution du problème en dynamique 47

Figure 8: Diagramme représentant les analyses à faire pour la description de la résolution de l'Expert de Référence 48

Figure 9: Stratégie de résolution suivie par l'Expert de Référence. Les numéros au-dessus des figures correspondent à ceux des paragraphes dans la résolution de l'Expert de Référence présentée en Annexe A. 50

Figure 10: Résolution « quantitative » de l'Expert de Référence en termes des organisations praxéologiques.....57

Figure 11: Analyse à effectuer (MOT) pour rendre compte de l'accomplissement de la tâche 5 « faire le bilan de forces ».....65

Figure 12: Réseau conceptuel nécessaire pour accomplir la tâche 5 « faire le bilan de forces » pour l'Expert de Référence. L'Expert de Référence possède une base de connaissance adéquate, complète, organisée et fortement hiérarchisée (cf paragraphe 2 Chapitre 1).....66

Figure 13: Etablissement de la relation entre les forces de tension par l'Expert de Référence.68

Figure 14: Stratégie de l'enseignant de 1784.....75

Figure 15: Représentation du dispositif de la machine d'Atwood dans le manuel de 1784.....77

Figure 16: Ralentissement du mouvement dans le manuel 1784 et notre représentation du dispositif expérimenté en 1784. L'enseignant préfère utiliser l'unité de mesure « m » qui correspond à un quart d'once, à savoir 7,08 grammes. 80

Figure 17: Premier problème posé sur la machine d'Atwood -Manuel 1784 81

Figure 18: Figure du dispositif de la machine d'Atwood retrouvé dans le manuel de 1880. Elle est proche de celle qu'on utilise actuellement pour représenter le dispositif. 85

Figure 19: Organisation du chapitre 4.....95

Figure 20: Résolution quantitative du problème de la machine d'Atwood par l'Expert de Référence.....98

Figure 21: Etablissement de la relation entre les forces de tension par l'Expert de Référence 100

Figure 22: Résolution R1.....103

Figure 23: Définition du système et identification des forces extérieures d'après la première hypothèse.....105

Figure 24: Analogie avec une autre situation 106

Figure 25: Résolution du problème de la machine d'Atwood trouvée sur le site internet Hyperphysics de l'université de Georgia State (protocole d'enseignement à distance aux Etats-Unis).....107

Figure 26: Résolution R3.....109

Figure 27: Solution du problème de la machine d'Atwood sur le site de l'Université En Ligne (UEL). A noter qu'il y a des erreurs de frappes sur l'écriture de l'accélération dans les équations du PFD. Le « g » dans le membre droite des équations doit être considéré comme γ. On ne sait pas si « » est la force de tension appliquée à la masse ou . Mais au-delà de ces erreurs de frappe, il y a en plus une erreur de signe dans l'une des équations du PFD, ce qui rend une résolution fausse. La résolution des équations donnera 111

Figure 28: Résolution R5.....113

Figure 29: Suite de la résolution R5.....114

Figure 30: Stratégie de résolution adaptée aux étudiants pour la résolution du problème de la machine d'Atwood.....120

Figure 31: Résolution du problème « plan incliné » tirée du manuel Bréal 1985 [65].....126

Figure 32: Résolution du problème du plan incliné dans le manuel Bréal 2003 [67].....127

Figure 33: Méthode de résolution proposée dans le manuel Bréal 2003 [67].....128

Figure 34: Méthode de résolution utilisée à l'UJF.....128

Figure 35: Organisation du Chapitre 6.....139

Figure 36: Extrait de la copie de l'étudiant E12. 144

Figure 37: Reconstitution de la figure de l'étudiant E12 afin de mettre en évidence l'algorithme constitué par l'accomplissement d'une série de tâches. L'étudiant construit le dessin en cinq étapes en partant du dessin initial donné dans l'énoncé du problème.....144

Figure 38: Extrait de la copie de l'étudiant E8.....145

Figure 39: Extrait de la copie de l'étudiant E13.....145

Figure 40: 2 extraits de la copie d'étudiant afin de montrer les difficultés liées à la tâche 7 (projeter les équations vectorielles). 147

Figure 41: Stratégie de résolution S1. 152

Figure 42: Extrait de la résolution de l'étudiant E3. Les rectangles numérotés montrent les

difficultés de l'étudiant et sont expliquées dans le tableau 153

Figure 43: Stratégie de résolution S2. Dans cette stratégie de résolution, la résolution du problème est constituée uniquement de la partie algorithmique. La partie grisée de la figure signifie l'absence de la partie non algorithmique (l'absence de la discussion des propositions des relations entre les tensions et les accélérations). 156

Figure 44: Résolution de l'étudiant E10.....157

Figure 45: Stratégie de résolution S3. Les étudiants étudient deux systèmes (la masse M, la masse m) et ils n'ont pas de difficulté, en général, dans la partie algorithmique de la résolution. La partie non algorithmique est absente dans leur résolution. Par conséquent, on constate le blocage des étudiants dans leur résolution qui entraîne l'absence d'aboutissement à une solution. 157

Figure 46: Extrait de la copie de l'étudiant E9 158

Figure 47: Extrait de la copie de l'étudiant E9. L'étudiant E9 d'abord d'utiliser le PFD pour la masse M et la masse m.....159

Figure 48: Etude du système (M+m) par l'étudiant E9 160

Figure 49: Copie de l'étudiant E15. Sa résolution commence, comme celle de l'étudiant E9, par le dessin et le rappel des faits explicités dans l'énoncé du problème. Comme l'étudiant E9, il n'en fait aucun usage. Il cherche à résoudre le problème en utilisant uniquement le PFD..161

Figure 50: Stratégie de l'étudiant E9.....162

Figure 51: Stratégie de l'étudiant E15.....162

Figure 52: Stratégie de résolution S4. La résolution du problème est constitué de deux parties : la partie algorithmique concernant l'utilisation du PFD pour les deux masses et la partie non algorithmique concernant la proposition des relations entre les tensions et/ou les accélérations. Les étudiants pourraient avoir des difficultés dans la partie algorithmique lors de l'accomplissement de certaines tâches ou bien dans la partie non algorithmique (par exemple la proposition des relations non attendues), ce qui pourrait entraîner différents résultats dans les résolutions. C'est la raison pour laquelle nous écrivons la « solution » au lieu d'écrire l'expression algébrique des accélérations des masses. 164

Figure 53: Dessins qui se trouvent tout au début des copies des étudiants E4 et E12. Leurs dessins traduisent l'accomplissement des tâches 2.2 (définir le système), 2.4 (choisir les axes du repère), tâche 5 (faire le bilan de forces appliquées aux systèmes. Dans le dessin de l'étudiant E12, on voit de plus l'accomplissement de la tâche 3 (écrire l'accélération des systèmes). Cet étudiant entoure aussi les masses pour désigner les systèmes à étudier. 165

Figure 54: Extrait de la résolution de l'étudiant E4. L'étudiant accomplit de manière explicite toutes les tâches.....166

Figure 55: Proposition de la relation pour la force de tension par l'étudiant E4.....167

Figure 56: L'étudiant E12 vérifie la cohérence du résultat obtenu : il compare l'accélération des masses avec l'accélération gravitationnelle. 168

Figure 57: Stratégie de l'étudiant E4.....169

Figure 58: Stratégie de l'étudiant E12.....169

Figure 59: Organisation du chapitre 7.....176

Figure 60: Présentation de la stratégie proposée aux étudiants. Etant donné que la partie « résolution quantitative » correspond à la tâche habituelle, nous l'avons montrée sur la figure par des traits en gris.....179

Figure 61: Feuille du devoir donné aux étudiants.....180

Figure 62: Difficultés possibles des étudiants lors de la résolution quantitative du problème 183

Figure 63: Stratégie attendue des étudiants.....185

Figure 64: Analyse dimensionnelle effectuée par l'étudiant e4.....190

Figure 65: Etude de cas limites de l'étudiant e19.
« Le cas limite pour le dispositif 2 est atteint lorsque la masse m se coince dans la poulie. On a alors une accélération de . On retrouve ce résultat avec l'expression trouvée pour car lorsque m est coincé dans la poulie tout se passe comme si m=0. Donc, ».....191

Figure 66: Comparaison de l'étude quantitative avec l'étude qualitative. 191

Figure 67: Deux stratégies pour l'ensemble de la résolution du problème. La stratégie S1 représente la stratégie souhaitée. Dans la stratégie S2, les liens entre différentes parties de la résolution ne sont pas bien établies, d'où les flèches en traits. Dans cette stratégie S2, le contrôle de résultats est souvent absent ou contractuel, d'où nous avons représenté cette étape par un rectangle rempli. 192

Figure 68: Caractéristiques de la résolution de l'étudiant e10.....193

Figure 69: Etude quantitative du dispositif 2 par l'étudiant e10 et sa conclusion.....195

Figure 70: Caractéristiques de la résolution de l'étudiant e21.....197

Figure 71: Extrait de la résolution quantitative de l'étudiant e21 : Calcul de l'accélération des masses et des forces de tension.....199

Figure 72: Extrait de la conclusion de l'étudiant e21 -comparaison des modules des forces de tension.....200

Figure 73: Etude du cas limite M=m et la conclusion de l'étudiant e21.....201

Figure 74: Caractéristiques de la résolution de l'étudiant e7.....202

Figure 75: Etude quantitative du dispositif 2 par l'étudiant e7 et sa conclusion.....204

INDEX DES TABLES

Tableau 1: Organisation de l'enseignement « Mécanique du point matériel » en première année à l'Université Joseph Fourier en 2003. Les « Ateliers » et la « Formation En Ligne » sont des activités liées à la résolution de problèmes.....14

Tableau 2: Notions primitives de la théorie anthropologique du savoir et correspondances de ces notions dans le cadre de notre travail.....53

Tableau 3: Technique associée au type de tâche « utiliser le PFD ».....60

Tableau 4: Notions principales en jeu pour chacune des sous tâches de « utiliser le PFD 64

Tableau 5: Les faits que l'on peut extraire du dessin du dispositif donné dans l'énoncé, et qui jouent un rôle pour l'accomplissement d'une tâche de bilan de forces.....67

Tableau 6: Tableau comparatif des deux rapports institutionnels 92

Tableau 7: Résolution des enseignants à analyser dans le chapitre 4.....104

Tableau 8: Accomplissement de certaines tâches pour la première hypothèse.....106

Tableau 9: Comparaison de la résolution de l'Expert de Référence avec la résolution R5 : Etablissement des relations entre les accélérations des masses.....117

Tableau 10: Comparaison de la résolution de l'Expert de Référence avec la résolution R5 : Etablissement des relations entre les tensions. 118

Tableau 11: Identification des tâches conseillées dans les méthodes de résolution. Les tâches de la technique de l'utilisation du PFD sont données au paragraphe 5.2.2.1 du chapitre 2. . .131

Tableau 12: Tâches explicitement accomplies de la technique de l'utilisation du PFD par les étudiants (au total 16) 144

Tableau 13: Référentiels utilisés par les étudiants.....147

Tableau 14: Arguments utilisés par les étudiants pour proposer une relation entre les accélérations des masses.....149

Tableau 15: Arguments utilisées par les étudiants pour proposer une relation entre les forces de tension.....149

Tableau 16: Catégorie de stratégies identifiées à travers l'analyse des productions des étudiants.....153

Tableau 17: Copies d'étudiant analysées dans le paragraphe 3 et les objectifs principaux lors de l'analyse des copies. 153

Tableau 18: L'étudiant E12 se réfère aux faits explicités dans l'énoncé du problème afin de postuler les relations algébriques. 169

Tableau 19: Conceptions susceptibles d'être repérées dans les résolutions des étudiants.....183

Tableau 20: Vue globale sur la discussion des affirmations.....188

Tableau 21: Exemples de discours dans lesquels on repère les conceptions.....189
Tableau 22: Contrôles de résultats effectués dans la partie « Conclusion » du problème.....191
Tableau 23: Discussion des affirmations par l'étudiant e10.....195
Tableau 24: Discussion des affirmations par l'étudiant e21.....199
Tableau 25: Discussion des affirmations par l'étudiant e7.....204

A MA FEMME
YASEMİN

ET

A MA FILLE
BEGÜM

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier particulièrement à Jean DUFAYARD, Daniel Lacroix et Claire Wajeman qui ont accepté de diriger cette thèse et qui ont pu me supporter pendant ces cinq années. Ils m'ont beaucoup aidé pendant la rédaction de la thèse. Je n'oublierai jamais les longues discussions que j'ai faites avec Daniel. Je pense que ses conseils et ses idées vont me permettre d'avancer dans mes recherches professionnelles à l'avenir.
Merci à Claire Wajeman. J'ai beaucoup apprécié sa manière de travailler, sa façon d'organiser la vie professionnelle. Elle a beaucoup contribué à ce travail de thèse tant au niveau de la réalisation de l'expérimentation qu'au niveau de la rédaction de la thèse.

Je remercie M. Jacques Toussaint et M. Serge Pelissier de s'être rendus disponibles en acceptant d'être rapporteurs de ma thèse. Je remercie également Mme. Claudine Kahane et M. Christian Buty d'avoir accepté de faire partie du jury.

Je tiens à remercier à l'Ambassade de Turquie à Paris au nom du Ministère de l'Education Nationale Turque pour la possibilité qu'ils m'ont offert de venir faire mes études en France. Ce travail n'aurait jamais pu aboutir sans l'aide financière du Ministère de l'Education Nationale Turque.

Je tiens aussi mes remerciements à tous les membres de l'équipe METAH : Cedric D'ham, Isabelle Girault, Patricia Marzin, Muriel Ney, Je pense aussi aux personnes de l'IUFM de Grenoble pour leurs accueils : Jean-Claude Guillot qui était mon responsable de DEA, Eric Triquet, Chantale … Merci également aux stagiaires et doctorants de l'équipe METAH : François, Clément, Ha, ...

Je remercie toutes les personnes du laboratoire LIG, particulièrement Jacky et Henri pour les nombreux services qui m'ont rendus.

J'adresse également mes remerciements à tous les membres de l'Association démocratiques idéalistes turques à Grenoble, en particulier à M. Osman Darıcı et à sa famille qui étaient toujours à côté de nous.

A mes parents et à toute ma famille en Turquie qui ont tout fait pour que je puisse terminer ce travail.

Enfin, un grand merci à deux filles de ma vie : ma femme, Yasemin, et ma fille, Begüm. Ma femme était la témoigne de toutes les difficultés que j'ai rencontrées dans ces cinq années. Elle a sacrifié sa vie pour que je puisse arriver à la fin de ce travail de thèse. Sans l'aide, le soutien et l'affection de ma femme, je ne crois pas que j'aurai pu terminer ce travail. Je pense qu'elle ne veut plus entendre le nom de la « machine d'Atwood ».
Ma fille était présente dans les deux dernières années de la thèse. Elle a vu toujours son père travailler devant l'ordinateur pendant des heures. Elle sait déjà comment taper sur les touches du clavier et comment utiliser la souris de l'ordinateur.

INTRODUCTION

Quel que soit le niveau d'étude, collège, lycée ou université, pendant la durée de l'enseignement de la physique, quel que soit le domaine de la physique, l'apprenant est toujours confronté à la résolution de problèmes, dit problèmes scolaires ou exercices. L'apprentissage des concepts et des principes de la physique et l'évaluation des apprenants sont deux finalités incontournables des activités de résolution d'exercices[1].
Au niveau de l'enseignement de la mécanique du point matériel en première année d'université, les activités liées à la résolution d'exercices constituent environ la moitié des activités, ce qui montre l'importance de cette activité. Le tableau 1 ci-dessous donne un exemple de la répartition, en heures et pourcentages, des différentes parties de l'enseignement de la Mécanique du point matériel dans un enseignement universitaire de première année en France.

Activité	Heures	%
Cours Magistral (CM)	15	25%
Travaux Dirigés (TD)	18	30%
Travaux Pratiques (TP)	17,5	29%
Ateliers	6	10%
Formation En Ligne (FEL)	3,5	6%
Total	60	100%

Tableau 1: Organisation de l'enseignement « Mécanique du point matériel » en première année à l'Université Joseph Fourier en 2003. Les « Ateliers » et la « Formation En Ligne » sont des activités liées à la résolution de problèmes

Les étudiants, en cours d'acquisition des connaissances de base de physique, face à cette tâche de résolution d'exercices peuvent se heurter à diverses difficultés telles que :

- ne pas savoir comment utiliser les principes de la physique pour résoudre les problèmes
- résoudre un problème par un chemin qui n'est pas cohérent avec les principes de la physique en jeu
- ne pas arriver à comprendre les résolutions des enseignants ou des manuels qui lui servent de référence
- …

Ainsi, dès le début de notre travail trois aspects nous ont paru importants :

- identifier les difficultés des étudiants à organiser leurs connaissances, à les mobiliser lors de la résolution d'un exercice
- chercher les origines de leurs difficultés
- dégager la nature des aides proposées aux étudiants ou les aides à leur proposer dans l'activité de résolution de problèmes.

La plupart des travaux sur la résolution de problèmes de physique concernent la mécanique du

1 Dumas-Carré A., Goffard M.(1997), *Rénover les activités de résolution de problèmes en physique*, Armand Colin/Masson, Paris, ISBN : 2-200-01600-X

point matériel. Notre travail de thèse s'intéressera, lui aussi, à la résolution d'un problème de la mécanique du point matériel proposée en première année d'université.
Dans cette perspective, nous avons observé pendant deux années les séances des travaux dirigés du module de la mécanique du point matériel en première année d'une université française. Nous avons recueilli plusieurs ensembles de données, essentiellement sous la forme de productions d'étudiants lors de la résolution de divers exercices proposés dans la feuille de Travaux Dirigés de ce module.
Parmi les problèmes proposés, l'étude de la résolution d'un problème nous a paru que celle des autres problèmes afin de souligner d'une part les ambiguïté des résolutions proposées par les enseignants et d'autre part les difficultés que rencontrent les étudiants lors de la résolution de ce problème : la résolution du problème du problème de la machine d'Atwood.

C'est l'étude de ce dispositif mis au point par Atwood qui servira de toile de fond pour mener notre travail de thèse :

- c'est un problème classique dont on peut trouver de nombreuses résolutions dans les manuels actuels ou sur les sites internet des universités de divers pays.
- c'est un problème dont l'étude a été proposée aux étudiants de manière assez systématique depuis sa création en 1782.
- c'est un problème dont la résolution pose de nombreuses difficultés aux étudiants
- c'est un problème complexe qui nécessite d'utiliser à plusieurs reprises le principe fondamental de la dynamique. Sa résolution a aussi recours à d'autres principes physiques
- c'est un problème pour lequel l'exposé de la résolution par les enseignants revêt fréquemment une forme ambiguë
- c'est une situation ancienne dont on peut tracer l'apparition et l'évolution au cours du temps
- …

Les principales étapes de notre travail
Notre travail sera subdivisé en trois parties.

La première partie de la thèse (Chapitres 1 et 2) est centrée sur une étude bibliographique et sur la construction d'une grille d'analyse permettant d'analyser diverses résolutions du problème de la machine d'Atwood.

Cette étude bibliographique nous permettra de faire une synthèse d'études antérieures (francophones et anglosaxones) sur les difficultés des étudiants et sur les aides proposées par les chercheurs en didactique de la physique.
Nous présenterons ensuite une résolution exhaustive du problème de la machine d'Atwood qui nous servira de référence tout le long de notre travail sous le nom de « résolution de *l'Expert de Référence* ». Nous décrirons et analyserons cette résolution à différentes niveaux en s'appuyant sur l'étude bibliographique du chapitre 1, sur une analyse praxéologique (théorie du didactique de Chevallard, 1995) et sur un modèle de connaissances (Modèle MOT de Paquet 1997). Cette analyse de la résolution du problème de la machine d'Atwood nous permettra d'élaborer une grille d'analyse didactique que nous exploiterons ensuite dans les chapitres suivants.

Dans la deuxième partie, nous nous intéresserons à la résolution du problème de la machine

d'Atwood par les enseignants, anciens et actuels.
Nous ferons d'abord une étude historique de la machine d'Atwood depuis sa création jusqu'à la fin de XIXe siècle (Chapitre 3). Nous chercherons à dégager les évolutions éventuelles de la résolution du problème, mais aussi de la forme prise par ce problème et des intentions scientifiques et pédagogiques associées.
Nous analyserons ensuite dans le chapitre 4 diverses résolutions du problème de la machine d'Atwood par des enseignants actuels. Nous examinerons les résolutions proposées dans différents contextes tels que les sites internet, les manuels de mécanique du point matériel, les polycopiés des Travaux Dirigés de l'université dans laquelle nous avons recueilli des productions d'étudiants, … Lors de ces analyses, nous mettrons en avant les différences (écarts) qui existent entre la résolution exhaustive du problème présenté au chapitre 2 (résolution de l'expert de référence) et les résolutions proposées par les enseignants. (Les écarts mis en évidence permettront d'envisager *a priori* les difficultés possibles des étudiants dans la résolution de ce problème à la fin de cette partie).
Pour terminer l'étude des résolutions des enseignants, nous chercherons et analyserons dans le chapitre 5, les aides méthodologiques éventuelles proposées par les enseignants.
Ces trois chapitres nous permettront de conclure par une étude a priori sur les difficultés que pourraient rencontrer les étudiants lors de la résolution du problème de la machine d'Atwood.

La troisième partie de notre thèse (chapitres 6 et 7) est consacrée à l'analyse des résolutions des étudiants recueillies au cours des séances de Travaux Dirigés en première année universitaire.
Dans un premier temps (Chapitre 6), nous analyserons les productions des étudiants confrontés à l'énoncé du problème de la machine d'Atwood tel qu'il est proposé par l'équipe enseignante dans la feuille d'exercice du TD.
Dans un deuxième temps (Chapitre 7), nous analyserons les productions des étudiants confrontés à l'énoncé modifié du même problème.

Chapitre I

Synthèse bibliographique sur les difficultés des étudiants et les aides proposées

Chapitre I Synthèse bibliographique sur les difficultés des étudiants et les aides proposées

La problématique dans la thèse s'articule autour de deux aspects :

- les difficultés des étudiants pour résoudre un problème
- les aides à leur fournir pour qu'ils surmontent ces difficultés.

Faisons le point dans ce chapitre. Nous définirons tout d'abord ce que l'on entend par « problème » et par « résolution de problème ». Ensuite, nous rechercherons dans les travaux des chercheurs en didactique les difficultés des étudiants liées à l'activité de résolution de problèmes. Nous ferons ensuite quelques propositions pour contourner ces difficultés. Ce dernier point apportera des éléments permettant ultérieurement de construire les aides à proposer aux étudiants.

L'organisation du chapitre 1 est présentée par le diagramme ci-dessous (Figure 1).

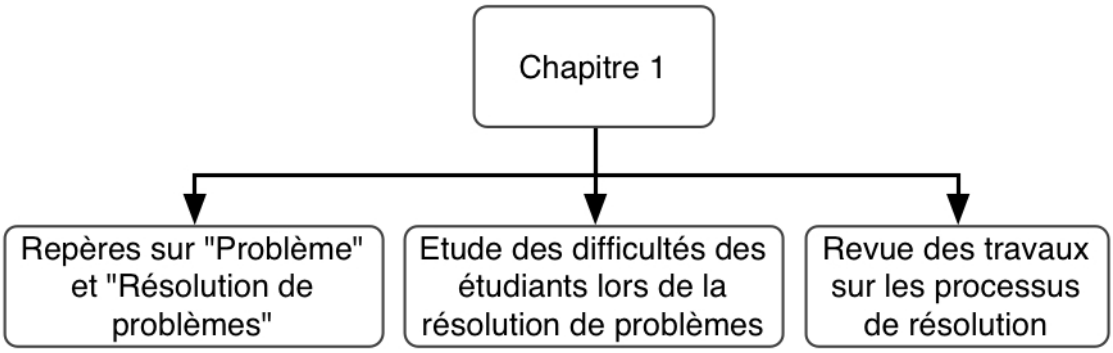


Figure 1: Organisation du chapitre 1

1 Quelques repères sur le « problème » et la « résolution de problèmes »

1.1 Problème

1.1.1 Définitions générales

Dans le dictionnaire « Le Petit Robert » [1], nous trouvons la définition du problème comme « *question à résoudre qui prête à discussion dans une science,[…] difficulté qu'il faut résoudre pour obtenir un certain résultat* ». Dans l'Encyclopædia Universalis[2], le mot « problème » signifie aussi « exercice scolaire ».

2 http://www.universalis.fr/test_lexique.php?mots=probl%E8me

Dumas-Carré et Goffard [2] insistent sur l'idée d'une interaction : interaction avec la tâche à réaliser et interaction avec autrui. D'après Fabre [3], le problème est caractérisé par un état initial et un état final. Il précise « *qu'il n'y a pourtant pas de solution immédiate pour passer de l'état initial à l'état final. D'où l'idée de difficulté*. »

Nous retenons ainsi les diverses dimensions de la notion du problème :

- la difficulté (lorsque la solution est triviale)
- l'interaction avec autrui
- l'interaction avec les connaissances en jeu
- l'idée d'un cheminement

On peut distinguer plusieurs types de problèmes :

- les problèmes rencontrés habituellement dans la vie de tous les jours
- les problèmes que rencontre un chercheur
- les problèmes ou exercices scolaires.

Notre travail se limitera au domaine de la résolution de problèmes scolaires de mécanique du point matériel. Nous nous intéresserons aux caractéristiques des problèmes que l'on rencontre habituellement dans un module d'enseignement tant au niveau de lycée que de l'université. Ceci nous amène auparavant à définir les problèmes en physique.

1.1.2 Problèmes en physique

La définition de problèmes en physique est rarement précisée dans les travaux de didactique sur la résolution de problèmes. Nous avons cependant trouvé quelques éléments intéressants.

Gaidioz, Vince et Tiberghien [4] s'intéressent au fonctionnement de la physique :

> « *L'une des caractéristiques essentielles de la physique est de proposer des théories et des modèles qui permettent d'analyser ou d'interpréter des situations matérielles qui constituent leur champ de validité ; dans certains cas ils permettent aussi de faire des prévisions de certains événements* ».

Ils indiquent qu'une situation en physique est simplifiée, idéalisée et modélisée par le physicien pour qu'il parvienne à analyser des situations matérielles, à anticiper et prévoir certains événements de la situation.

Joshua et Dupin [5] donnent des éléments sur la nature d'un problème scientifique :

> *« Un problème scientifique est ouvert par définition. On ne connaît pas la solution, on ne sait même pas si elle existe ; on ne sait pas formuler la question, autrement dit, on ne sait pas définir exactement la situation initiale ; on ne dispose pas des opérateurs qui seraient éventuellement nécessaires. Ce sont des problèmes très riches en contenus et très peu structurés ».*

Dumas-Carré et Goffard [2] disent que les problèmes scolaires en physique sont également simplifiés, idéalisés, modélisés, et ajoutent que :

- les conditions de fonctionnement (initiales et aux limites) sont données. La question est posée en termes de grandeurs physiques à déterminer, ou en termes de relation à établir entre des grandeurs physiques nommées, mais rarement en termes de

phénomènes
- le chemin de résolution est unique
- les données sont justes nécessaires et suffisantes pour la résolution, mais ne permettent pas toujours la compréhension.
- la solution est en général unique et sans ambiguïté[3].

Les quelques citations ci-dessus permettent d'appréhender des similitudes mais aussi des différences fondamentales entre le problème scolaire et le problème scientifique. Tous les deux subissent une simplification par rapport à la situation réelle mais l'un est fortement contraint alors que l'autre est intrinsèquement ouvert. Cependant, devant la résolution d'un problème, un étudiant est considéré comme un novice alors que le chercheur est dans la position d'un expert (Reif [6]).

1.2 Résolution de problème

Nous allons d'abord explorer ce que la recherche en didactique entend généralement par le terme « résolution de problèmes » et ensuite nous rechercherons ce qui est plus spécifique à la « résolution de problèmes en physique ». Cependant, dans les travaux de didactique de la physique sur la résolution de problème, en particulier dans les travaux américains, les chercheurs s'intéressent la plupart du temps à la résolution de problèmes en général et laissent souvent de côté les particularités de la résolution de problèmes en physique.

1.2.1 Caractérisation de la résolution de problème

Les chercheurs cités ci-dessous proposent de caractériser la résolution de problèmes par deux aspects:

- un cheminement à suivre en fonction d'un but
- une mobilisation et une organisation des connaissances déjà acquises, qui sont de différentes natures (connaissances déclaratives et procédurales).

Reif [7] insiste sur le cheminement de la pensée lors de la résolution de problèmes. Il y a l'état initial et l'état final du problème, c'est-à-dire le but à atteindre par la résolution du problème. Il schématise la résolution d'un problème sur la figure 2 où le point A représente la situation initiale et le point G, le but à atteindre. On peut définir la résolution d'un problème comme un ensemble des actions permettant d'arriver au point G en partant du point A, représenté par une ligne brisée comme sur la figure 2.

3Comme nous allons voir dans les parties suivantes (B et C), les problèmes qui seront l'objet de notre étude correspondent à ces caractéristiques.

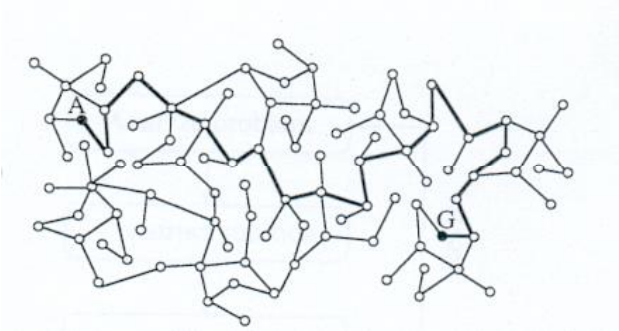


Figure 2: Schématisation de la résolution d'un problème d'après Reif [7]

Dumas-Carré et Goffard [2] insistent sur la mobilisation des connaissances antérieures pour l'élaboration des raisonnements permettant de passer de la question à la réponse *« La résolution du problème consiste à élaborer un raisonnement qui conduit de la question à la réponse, en utilisant des connaissances déjà acquises ».*

Cependant des connaissances déjà acquises ne garantissent pas la bonne résolution du problème. Il faut s'interroger sur la nature de ces connaissances et sur l'organisation de celles-ci chez l'apprenant : « *Les concepts et principes d'un domaine particulier de connaissances doivent être disponibles dans une forme fonctionnelle et utilisable*[4]*. Le savoir de quelqu'un qui veut résoudre des problèmes doit effectivement être organisé pour s'assurer que ce savoir puisse être facilement mémorisé et efficacement rappelé de manière à faciliter la recherche de solution de problèmes.* » Reif [6]

Cette forme fonctionnelle des connaissances nous amène à poser la question de la nature des connaissances. En psychologie cognitive les connaissances sont regroupées en connaissances déclaratives et connaissances procédurales (Fabre [3]):

- **les connaissances déclaratives** s'expriment sous forme de règles et sont isolées de leur mode d'emploi, il s'agit d'un « ***savoir que*** » et ***non d'un « savoir comment »***.
- **les connaissances procédurales** correspondent à ***une procédure***, à l'application de règles et détaille de manière séquentielle, pas à pas, ***tout ce qu'il faut faire pour mettre en oeuvre des règles***.

Nous voyons donc ici que la procédure de résolution d'un problème peut avoir le statut d'une connaissance. D'après Fabre, « *la règle vient soit avant soit après l'action dans le traitement d'un problème »* et cela relève de l'articulation entre déclaratif et procédural. Nous verrons l'importance de cette question lorsque nous poserons dans la suite la question d'une méthodologie de résolution et la question de l'introduction de cette méthodologie à des étudiants en tant qu'aide à la résolution de problème.

Certains chercheurs pensent d'autre part que la résolution de problèmes ne peut se limiter à des connaissances déclaratives et procédurales. Par exemple, Leonard [8] précise les connaissances nécessaires (qui jouent un rôle important dans la résolution des étudiants) ; il regroupe ces connaissances en trois catégories : Conceptual Knowledge, Operational and Procedural Knowledge, and Problem-State Knowledge. Cette dernière catégorie désigne l'ensemble des problèmes connus par la personne. Ceci renvoie à la question de l'expérience et des positions de novice et d'expert pour l'étudiant et pour le physicien.

4 D'où la nécessité des connaissances procédurales.

1.2.2 Résolution de problème en physique

Après nous être intéressés à la résolution de problèmes en général, nous allons tenter de préciser le cas de la résolution de problèmes en physique. Il n'existe pas de travaux de didactique qui traitent spécifiquement ce point. Pour traiter cette question, nous nous sommes centrés sur les travaux de didactique de la physique traitant de la résolution de problème. Nous n'avons pas non plus recherché des travaux qui comparent les différentes approches en fonction de la discipline scientifique, et ce n'est pas notre objet. Dans la suite, nous allons donc tenter de caractériser la résolution d'un problème de physique sans chercher à dégager les caractères distinctifs de cette activité en comparaison avec les autres sciences. En conséquence il se peut très bien que ces caractères soient partagés avec une autre discipline.

On a cité précédemment « *une caractéristique essentielle de la physique [qui] est de proposer des théories et des modèles qui permettent d'analyser ou d'interpréter des situations matérielles* » [4] (paragraphe 1.1.2, pp. 26). Pour Reif [7] l'objectif scientifique de la résolution d'un problème concerne l'explication ou la prédiction de phénomènes. On peut ainsi définir un des objectifs propre à la physique : la résolution de problèmes en physique permet d'expliquer (donner du sens) et de prévoir certains événements de la situation en jeu. Par exemple en mécanique on étudiera des mouvements : sans faire l'expérience on peut anticiper le mouvement dans une situation donnée dont on connaît les conditions, ou encore trouver les caractéristiques de la force qui explique un mouvement observé, ...

Dans les paragraphes suivant, nous posons la question : comment, par quels moyens la physique permet-elle d'expliquer ou de prévoir les événements d'une situation?
En nous référant aux travaux de Tiberghien, Guillaud et Duval, nous allons chercher à résumer le fonctionnement d'une activité en physique (que ce soit la résolution de problèmes ou autre). Nous nous référerons d'abord à la thèse de Guillaud, concernant la nature des faits, et ensuite aux travaux de Duval, concernant la notion de registre des représentations sémiotiques.

1.2.2.1 Deux champs distincts

Dans leurs travaux en didactique de la physique, Gaidoz, Vince et Tiberghien [4] définissent deux champs distincts[5] pour montrer le fonctionnement de la physique : le champ des « théories-modèles » et le champ des « objets-événements ».

Selon Tiberghien [12], dans le champ de la théorie, on rencontre les principes et les lois. Le modèle est considéré comme un intermédiaire indispensable entre le niveau de la théorie et le niveau du champ expérimental. En physique, le modèle consiste en des formalismes et des mises en relation entre grandeurs. Le champ « objets-événements-faits » est le champ expérimental qui comprend les faits expérimentaux, les objets et les événements associés à des expériences et des prises de mesure[6] (Figure 3).

Dans le cadre de notre travail, nous nous plaçons dans le cadre de travaux dirigés (TD) et nous ne prenons pas en compte les aspects expérimentaux. Dans la suite nous serons

5 Ces champs sont aussi appelés dans le livre de Guillaud et Robardet [9]et dans la thèse de Viudez [10] comme « champ théorique » et « champ empirique » , ou bien dans la thèse de Séjourné [11]comme « monde des théories-modèles » et « monde des objets-événements ».

6 Les prises de mesure font partie des activités expérimentales et n'ont pas en général de place dans les activités de résolution de problèmes.

confrontés à des énoncés de problèmes de TD de physique, et nous désignerons plus simplement le champ conceptuel (théorie-modèle) sous le terme de « théorie », et les objets, les événements et les faits sous le terme de « faits » en référence au travail de thèse de Guillaud (cf 1.2.2.2).

Que fait-on lors de ces allers-retours entre ces deux champs ?

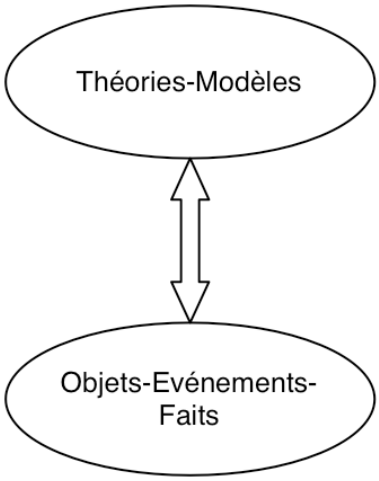


Figure 3: Allers-retours entre le monde des théories-modèles et le monde des objets-événements-faits selon Gaidoz, Vince et Tiberghien [4]

1.2.2.2 Faits bruts et Faits scientifiques

Dans sa thèse en didactique de la physique, Guillaud [13] fait référence à deux notions : faits bruts et faits scientifiques. Lors de la résolution d'un problème, il y a des allers-retours entre les deux champs, où l'on articule les faits bruts et les faits scientifiques.

Guillaud caractérise ainsi un fait brut :

- Un fait brut correspond à la donnée empirique, il est saisi et construit à partir de l'intuition sensible, en ayant comme référence implicite le cadre de la connaissance quotidienne.
- Un fait brut n'est rien d'autre qu'une simple constatation semblable à celles que peut faire chacun de nous à tout instant, dans la mesure où ce cadre est partagé par le plus grand nombre.

En ce qui concerne les caractéristiques des faits scientifiques, il retient les aspects ci-dessous:

- Le fait scientifique est élaboré, construit par la raison dans un cadre théorique scientifique explicite et non simplement constaté, vérifié, éventuellement mesuré et corrigé.
- Un fait scientifique n'est pas isolé ; il est relié à d'autres faits et à un réseau conceptuel.

- La construction du fait scientifique est manifeste. Elle suppose toujours une intention, un choix. Il n'est visible que pour celui qui, disposant au préalable d'éléments théoriques, est capable de poser des questions à la nature.
- Il ne trouve son sens que dans un programme de recherche, en fonction d'un problème, ou plus simplement d'une question.
- Un fait scientifique est contrôlable, vérifiable dans le cadre d'une théorie. La vérification d'un fait scientifique dépend d'une théorie explicite, ce qui impose que le fait vérifiable est alors supposé comme reproductible. »

Nous résumons les caractéristiques de ces deux types de faits par la figure 4.

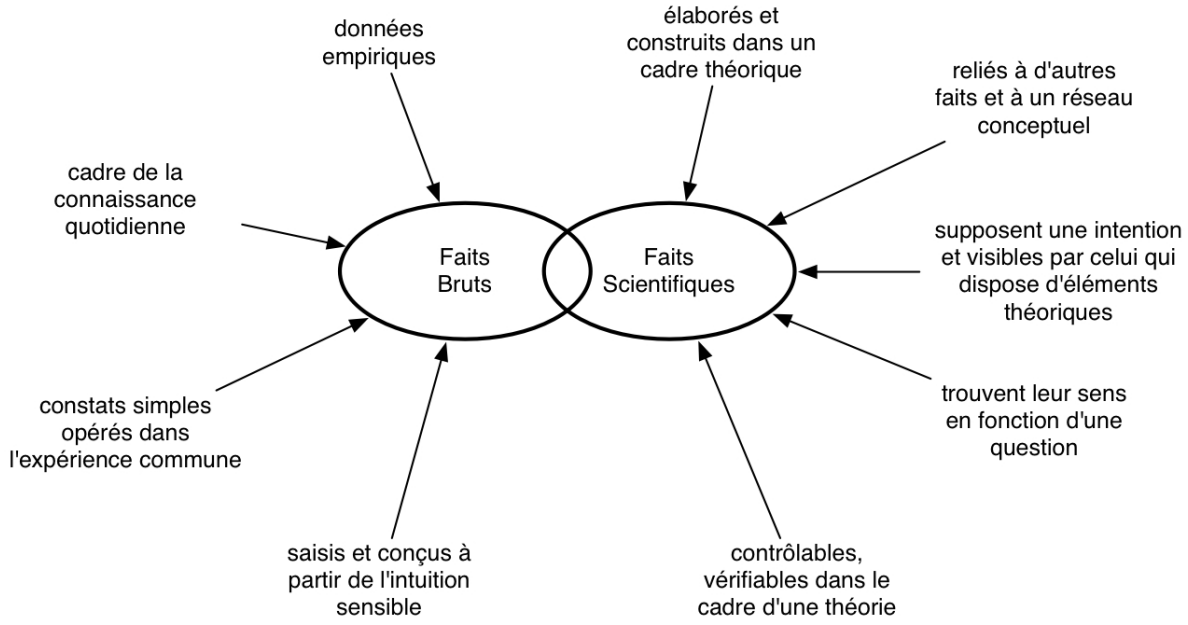


Figure 4: Faits bruts et faits scientifiques d'après Guillaud [13]

De ce point de vue, les énoncés de problèmes de mécanique comportent fréquemment des faits bruts qui font référence à des événements de la situation matérielle que l'on modélise. La résolution de problèmes demande alors le passage des faits bruts à des faits scientifiques. Ce passage mobilisera un réseau conceptuel, qui relie les concepts et les grandeurs physiques autour d'une théorie.

Les faits bruts sont souvent exprimés en langage naturel en tant que simples constats partagés dans le cadre de la connaissance quotidienne. Alors que les faits scientifiques sont élaborés, construits par la raison dans un cadre théorique. Les faits scientifiques eux, peuvent être exprimés dans divers langages, en particulier le langage algébrique très utilisé en physique. Ceci nous amène à poser la question des langages employés lors de la résolution de problèmes en physique.

1.2.2.3 Usages des langages

Pour aborder cette question du langage nous nous appuyons sur les travaux de Duval [14]sur les registres de représentations sémiotiques.

Selon Duval, les traitements intentionnels effectués sur une diversité de représentations sémiotiques ont un caractère fondamental et irréductible dans l'apprentissage humain aussi bien du point de vue individuel que du point de vue scientifique ou culturel. C'est la compréhension de l'ensemble des représentations qui permet de donner du sens au concept et qui garantit un bon apprentissage.

Nous présenterons plus particulièrement les activités que Duval définit pour les registres de représentations sémiotiques d'un concept : la formation de représentations dans un registre sémiotique, le traitement dans le même registre, la conversion entre deux registres différents.

La formation de représentations d'un concept dans un registre sémiotique particulier : les actes les plus élémentaires de formations sont, selon les registres, la désignation nominale des objets, la reproduction ou la modélisation du contour perçu de l'objet, le codage de certaines relations ou propriétés. Elle implique la sélection d'un certain nombre de caractères d'un contenu perçu, imaginé, ou déjà représenté en fonction des possibilités de représentation propre au registre choisi.

Le traitement apparaît[7] lorsqu'on produit une autre représentation d'un concept dans le même registre (transformation interne) : c'est une transformation de représentations, **interne** à un registre de représentation, « la transformation d'une représentation prise comme donnée initiale en une représentation considérée comme terminale par rapport à une question, à un problème ou un besoin, lesquelles fournissent le critère d'arrêt dans la suite des transformations effectuées »[14].

La conversion se produit lorsque la transformation produit une représentation du concept dans un autre registre que la représentation initiale ; c'est une transformation **externe** par rapport au registre de la représentation de départ. Cette transformation est souvent désignée par les termes de « traduction », « illustration », « transposition », « interprétation », « codage », etc. La conversion requiert que l'on perçoive la différence entre le contenu d'une représentation et ce qu'elle représente (entre le sens et la référence des signes) [14].

La résolution de problèmes de physique articule ces trois activités liées aux registres de représentations sémiotiques (voir par exemple Guillaud [13]). En physique, on retrouve de façon quasi systématiques trois registres dominants : celui de la langue naturelle, celui des représentations schématiques, celui du langage mathématique. Dans le domaine de la résolution de problème en mécanique du point matériel sur lequel repose notre travail, on utilise presque exclusivement ces trois registres. Parce qu'un énoncé de problème de physique comporte des faits bruts exprimés en langue naturelle, parce que l'on passe généralement par une phase de résolution algébrique, la résolution d'un problème de physique confronte nécessairement à des activités sémiotiques de conversion, de traitement et parfois de formation.

Nous avons ainsi dégagé certaines caractéristiques du problème de physique et de sa résolution au travers des publications en didactique de la physique qui nous seront utiles par la suite. Dans ce qui suit, nous étudierons les difficultés et besoins des étudiants lors de la

7 « *Le calcul et la paraphrase sont des exemples de traitements de représentations sémiotiques, le premier interne au registre d'une écriture symbolique de chiffres ou de lettres, le second interne au registre du discours de la langue naturelle.* » [14]

résolution de ces problèmes scolaires.

2 Synthèse bibliographique : comment les étudiants résolvent-ils les problèmes ? Quelles sont les difficultés récurrentes?

Depuis les années 70, la résolution de problèmes par les élèves a été longuement étudiée par des chercheurs en didactique de la physique en France et à l'étranger[8]. Dans tous ces travaux, les difficultés des étudiants sont exprimées en termes de différences entre la résolution d'un expert générique, le physicien, et celle des étudiants. Nous nous appuierons en particulier sur les travaux de Heuvelen[17],[18] Heller [19], Leonard [20], [21], [22], Reif [6], [7], [16], Dumas-Carré&Goffard [2],[23], McDermott [24], [25].

Dans les recherches citées ci-dessus, les différences entre la résolution de l'expert et la résolution du novice sont exprimées en termes de connaissances, de chemins de résolution et de cohérence dans la réponse. Nous développerons ces aspects ci-dessous.

2.1 Différences entre expert et novice

Bases de connaissances

Tout d'abord considérons le cas où ces différences sont exprimées en terme de base de connaissances du novice en comparaison avec celle de l'expert (synthèse des travaux des auteurs américains précédents sur la base du travail initial de Reif [16]) :

- En général, un expert a déjà construit une base de connaissances adéquate, ce qui n'est pas habituellement le cas pour le novice. La construction d'une telle base de connaissance est précisément l'enjeu de l'apprentissage.
- Que l'on soit expert ou novice, la base de connaissances n'est pas seulement quantitative, elle est surtout qualitative et le savoir n'est pas organisé de la même manière dans les deux cas. Le savoir de l'expert apparaît à la fois comme organisé, mis en structure, et fortement hiérarchisé.
- Dans une discipline, la supériorité des « experts » sur les novices peut aussi bien tenir à leur supériorité dans la mise en œuvre des méthodes générales qu'à la mise en œuvre de leur base de connaissances spécifiques.

Leonard [21] exprime également la base de connaissances de l'expert en termes des collections des problèmes, des équations, des procédures et des opérations connus seulement par l'expert. Tous ces aspects mettent en évidence la compétence de l'expert dans la résolution de problèmes.

Chemins de résolution

Si l'on exprime la différence entre la résolution de l'expert et celle du novice en terme de chemins de résolutions, on peut dire que le novice dispose d'un seul chemin [20] pour résoudre un problème donné. Les travaux de recherche montrent que la résolution du novice est avant tout basée sur la manipulation d'équations. Les experts, eux, peuvent proposer différentes méthodes de résolution, utiliser des analogies pour suivre un plan de résolution expliciter et arriver à la bonne réponse.

8 Par exemple Fauconnet [15] et Reif [16]

Cohérence
Cette différence entre la résolution de l'expert et celle du novice peut aussi être exprimée en termes de cohérence [20]. Les novices ne sont pas conscients des incohérences dans leur résolution. Ils ne sont pas capables de repérer des erreurs dans leurs raisonnements et dans l'expression de leur solution. Enfin, ils ne sont pas capables d'expliquer pourquoi la réponse pourrait être incorrecte (on reviendra sur cet aspect et on parlera des procédures de contrôle proposées par les chercheurs dans le paragraphe 3).

Conceptions
La base de connaissances qualitatives et quantitatives chez le novice nous renvoie aussi aux conceptions des élèves, non seulement concernant les concepts, mais aussi les connaissances procédurales (procédures de résolution, de contrôle, ...) relatives à la résolution de problème et qui sont moins étudiées. Dans la littérature anglo-saxonne, le terme de misconception renvoie aux erreurs commises par les élèves, identifiées lors une confrontation entre la connaissance scientifique reconnue, celle de l'expert, et les connaissances de l'étudiant. Concernant le sujet que nous traitons ici, les conceptions et misconceptions identifiées dans les travaux de didactique de la physique, concernent essentiellement les concepts de physique ; la procédure de résolution d'un problème n'est pas abordée en tant que connaissance. Dans la suite de ce travail, nous nous attacherons à identifier les procédures (stratégies) de résolution des étudiants en référence à celles d'experts (enseignants), ce qui nous permettra d'aborder cette question des conceptions des élèves vis à vis de cette connaissance procédurale.

2.2 Difficultés des étudiants

Dumas-Carré et Goffard [2] présentent les difficultés des étudiants lors de résolutions de problèmes, en deux catégories :

- Difficultés d'ordre méthodologique,
- Difficultés d'ordre conceptuel

Nous allons nous intéresser à présent à ces deux catégories de difficultés.

2.2.1 Difficultés d'ordre méthodologique

Ce sont des difficultés par rapport aux procédures mises en oeuvre lors de la résolution d'un problème de physique et que les étudiants peuvent rencontrer dans n'importe quel domaine de la physique. Nous présentons ci-dessous divers travaux ayant étudié ces difficultés d'ordre méthodologique.

Johsua et Dupin détectent des difficultés liées au raisonnement, à l'absence de stratégie, à la pratique de raccourcis non-contrôlés, à la maîtrise d'activités sémiotiques :

> *« peu d'erreurs ont pour cause un manque de connaissances (pris ici dans le sens de vocabulaire, définitions, théorèmes, formules, ...) mais tiennent plutôt à des erreurs de raisonnements : difficultés à organiser de manière systématique l'approche d'un problème, saut*[9] *rapide vers des conclusions non vérifiées ; difficulté à construire une représentation graphique d'un problème »* [5]

Stratégie de résolution

9 Cette notion de « saut », nous la reprendrons sous l'appellation plus générale de raccourcis.

On retrouve dans plusieurs travaux des difficultés concernant la stratégie de résolution.
Il y a un accord général sur le fait que les étudiants utilisent en général une stratégie de résolution centrée sur des formules ou des relations algébriques et que la tâche de l'étudiant consiste à déterminer la valeur d'une ou plusieurs inconnues [2], [6], [17], [19], [21].

Au niveau universitaire, les étudiants se montrent réticents quand on les pousse à utiliser une procédure de résolution, même si cette procédure de résolution est conseillée par l'institution [19]. Dans un autre travail de recherche [20], il est constaté que les étudiants qui ont fini la première année sont incapables de décrire et donc de mettre en œuvre une procédure de résolution.

Analyse qualitative
D'autres chercheurs ayant comparé la résolution de l'expert à celle de l'étudiant attirent l'attention sur l'existence d'autres étapes dans la résolution de l'expert que la manipulation d'équation. Ces étapes sont souvent associées à l'analyse initiale (préalable) de la situation.
Reif [6] précise à ce propos que les étudiants ont tendance à résoudre les problèmes sans faire l'analyse préalable de la situation [2],[17]. Un physicien résout un problème à l'aide d'une analyse qualitative et à l'aide de différents systèmes de représentations, tels que les dessins, les diagrammes de forces [6],[17].

Nous détaillerons cette question de l'analyse qualitative et celle de la stratégie dans le paragraphe 3 concernant les travaux sur les stratégies de résolution d'un problème de physique.

L'imitation du professeur par le novice
Nous terminerons cette partie sur les difficultés d'ordre méthodologique par un constat de Dumas-Carré et Goffard [2] qui affirment :

> *« Au cours de la résolution, l'élève essaie d'imiter le professeur, mais n'y arrive pas. Comment l'élève peut-il choisir le système qui lui permettra de résoudre le problème posé ? Il le choisit, parfois implicitement, avant toute étude de la question, sans rapport avec l'équilibre ou l'évolution, sans rapport avec le principe ou le théorème à appliquer. »*

Nous pouvons tirer de ce constat deux conclusions importantes pour notre travail.

- La première sera l'idée d' « ***imitation*** » du professeur par l'élève. Cette première conclusion est importante pour notre travail car elle contient des éléments du contrat didactique. Cette « imitation » peut avoir des effets positifs à la fois pour l'étudiant dans sa tâche et pour le chercheur, qui analyse les réponses des étudiants. Cependant Dumas-Carré et Goffard montrent que cela peut poser des difficultés pour l'élève. En analysant des résolutions d'enseignants, puis celles des étudiants, nous tenterons dans la suite de notre travail de dégager les difficultés que l'élève rencontre ou qu'il est susceptible de rencontrer lors de cet acte d'imitation.
- La deuxième conclusion concerne la notion de « ***système*** ». La difficulté évoquée du choix du système peut apparaître comme d'ordre conceptuel, mais nous verrons cependant qu'elle constitue une embûche sérieuse à la résolution d'un problème de mécanique. Elle sera traitée dans la partie suivante.

Pour le plan méthodologique, nous retiendrons les aspects suivants pour la résolution des

étudiants :

- avoir ou ne pas avoir de stratégie (une méthode)
- posséder une stratégie et ne pas l'utiliser
- faire des choix sans rapport avec le problème posé
- privilégier la solution (le but à atteindre) au détriment de sa pertinence (saut rapide, étape manquante, raccourcis divers)

2.2.2 Difficultés d'ordre conceptuel

Les difficultés d'ordre conceptuel dépendent des notions et des principes en jeu dans la résolution d'un problème. Puisque nous nous intéressons dans ce travail à la dynamique du point matériel, nous citerons ici l'exemple d'une difficulté récurrente des étudiants liée au Principe Fondamental de la Dynamique (PFD) et portant sur la notion de « système ».
Pour Reif [7] c'est une difficulté principale dans la résolution d'un problème de dynamique. Reif représente la place du « système » dans la mécanique newtonienne par le diagramme suivant (figure 5).

Reif précise qu'un système peut être défini à partir de concepts caractéristiques (masse, charge, moment d'inertie, …), le mouvement à partir des concepts cinématiques de base (position, vitesse, accélération) ou mécanique (quantité de mouvement, énergie cinétique, centre de masse, …). Les interactions sont définies en utilisant le concept de force, de moment, de travail, d'énergie potentielle. Ajoutons que les systèmes mécaniques sont représentables géométriquement par un ensemble de points de l'espace physique qui est décrit comme un espace euclidien à trois dimensions.

Une difficulté au niveau du choix du système entraînera aussi des difficultés dans la résolution au niveau du bilan des forces, c'est-à-dire au niveau « interaction », et aussi une difficulté au niveau de la description du mouvement et au niveau de l'instanciation des lois de la mécanique, en particulier du principe fondamental de la dynamique [7].

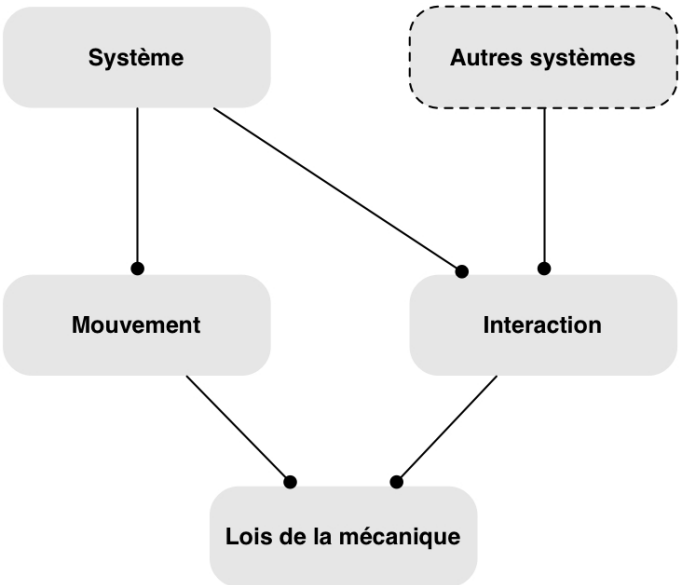


Figure 5: Notion de système en dynamique du point matériel d'après Reif [7]

Dans une étude concernant la machine d'Atwood, McDermott [24] précise que la plupart des difficultés en mécanique du point matériel proviennent du choix d'un système approprié et du fait que les étudiants savent rarement déterminer les forces, les masses et les accélérations de manière pertinente, c'est à dire relativement à un système correspondant. C'est contraire aux lois de la mécanique et de ce fait une utilisation automatique des lois de la mécanique devient cause de nombreuses erreurs et difficultés dans les résolutions d'étudiants.

Cet exemple du concept de système mécanique souligne le fait qu'un concept utilisé de manière pertinente dans la résolution d'un problème n'est jamais isolé mais appartient à un réseau de concepts interdépendants. Une difficulté concernant un concept peut donc affecter l'ensemble de la stratégie de résolution, devenant alors autant méthodologique que conceptuelle.

En résumé
Les experts (physiciens) et les étudiants ne résolvent pas de la même manière un même problème. Cette différence est interprétée dans les travaux en termes de difficultés. Les difficultés des étudiants peuvent être d'ordre méthodologique et/ou d'ordre conceptuel. L'étudiant veut tout de suite manipuler des équations alors que l'expert effectue d'abord d'autres étapes dans sa résolution avant de passer aux manipulations algébriques. Les difficultés d'ordre conceptuel dans la résolution de problème, comme celles associées à la notion de système en mécanique du point matériel, peuvent entraîner des difficultés d'ordre méthodologique.

2.3 Quels sont les besoins des étudiants ?

Nous pouvons supposer que les difficultés rencontrées par les étudiants peuvent être traduites en terme de besoins et inversement. Une étude réalisée par VanLehn [26] dégage quatre besoins des étudiants en vue de leur proposer des aides sans poser la question des difficultés[10]. De cette recherche nous retiendrons les aspects suivants :

- Les étudiants ont besoin d'être rassurés par l'enseignant. Ils ne sont pas souvent sûrs de leurs actions dans la résolution.
- Ils ont besoin d'indications au moment de la résolution, surtout d'indications sur ce qu'ils doivent faire à la prochaine étape de la résolution (ce que nous appellerons le « *quoi faire* » dans la résolution).
- Même s'ils savent « *quoi faire* », ils ne savent pas « *comment faire* ».

10 Voici ce qui est écrit par VanLehn :

- "Of the 73 helps request, 18 were simply request for immediate feedback. The student often just asked, "is that ok?" referring to their most recent entry.
- The most common help request (27 occurrences) was the student's indication, in various way, that they were lost and needed a hint about what to do next.
- The next common help request (14 occurrences) consisted of asking for help in achieving a specific goal. Some examples, …, are
  - How do I find the acceleration of block2?
  - How can I find out which direction that forces acts?
  - How do I convert kilograms to Newton?
  - How do I eliminate mass from that equation?
  - How do I solve that equation for acceleration?
- The remaining help request all revealed a conceptual understanding of some kind."

Cette recherche sur les besoins des étudiants lors des activités de résolution de problèmes nous montre que les étudiants ont en particulier besoin de l'explicitation du processus de résolution par les enseignants. Dans le paragraphe suivant nous ferons une revue de travaux de didactique sur les stratégies de résolution.

3 Revue des travaux sur les stratégies de résolution

Nous nous appuierons à nouveau sur les travaux cités dans le paragraphe 2. Les travaux exposant les difficultés des étudiants proposent également des aides à la résolution de problèmes de physique. Nous assimilerons ces propositions sur la manière de résoudre les problèmes de physique à des éléments d'aide.

Les chercheurs décomposent la résolution de problèmes de physique en étapes autre que la seule manipulation algébrique des équations. On retrouve dans tous les travaux une structure de base que nous résumerons en 3 étapes principales :

- une étape préliminaire à la résolution du problème, souvent qualifiée par le terme « qualitatif »
- une étape de construction et la mise en place de la procédure de la résolution c'est plutot une étape qui constitue le corps de la résolution à proprement parler qui comprend la mise en équations et la résolution algébrique
- une étape de vérification des résultats

Nous présenterons ci-dessous quelques travaux portant sur ce sujet.

Dumas-Carré et Goffard [23] critiquent les activités de résolution de problèmes en physique au niveau de l'enseignement secondaire. Ils précisent que les activités de résolution de problèmes sont loin d'une véritable activité scientifique et cherchent à rapprocher ces deux activités. Ils proposent une méthode qui s'appuie sur 7 étapes, la première étant de réorganiser les énoncés de problèmes scolaires en supprimant d'abord les données. Les autres étapes sont données ci-dessous :

- Commencer par une étude qualitative
- Émettre des hypothèses sur la situation
- Élaborer et expliciter des chemins de résolution
- Suivre complètement un chemin de résolution
- Analyser les résultats
- Envisager des prolongements possibles

L'étude qualitative est appelée « aide métacognitive » et se fait en termes de diverses représentations de la situation, telles que les représentations temporelles, représentations spatio-temporelles, analyse cinématique et représentations interactionnelles. La mise en place de ces conseils nécessite un travail de groupe dans lequel les élèves interagissent, émettent des hypothèses, élaborent et explicitent des chemins de résolution.

VanLehn[26], dans son travail centré sur l'enseignement de la mécanique au niveau de l'université, indique la nécessité d'une phase dans laquelle on n'utilise pas le formalisme mathématique. Cette phase ne doit pas nécessiter de manipulation algébrique. Rappelons que les résolutions des étudiants sont la plupart du temps centrées sur la manipulation algébrique de principes physiques en jeu. L'auteur précise que ce type de résolution est appelé "analyse

qualitative"[11] et comporte les étapes suivantes en mécanique du point :

- Déterminer les mouvements des objets en fonction du temps
- Faire un plan de la solution en choisissant les systèmes et en décidant quel est le principe à appliquer à chaque système.
- Identifier et exprimer des grandeurs mécaniques à utiliser dans la résolution du problème

La description du mouvement des objets par rapport au temps de VanLehn correspond aux représentations temporelle, spatio-temporelle et à l'analyse cinématique chez Dumas-Carré et Goffard [23].

Dans un autre travail centré sur la résolution de problème en mécanique du point matériel (niveau universitaire), **Leonard** [21] propose une méthode d'analyse de la situation en termes de stratégie qualitative. Il s'agit de verbaliser la résolution, c'est-à-dire d'écrire ce que l'on va faire lors de la résolution.

Cette méthode de résolution se décompose en 3 étapes [12].

- Déterminer le principe ou les concepts que l'on va appliquer pour résoudre le problème
- Justifier pourquoi on va appliquer tel principe et utiliser telles grandeurs physiques
- Construire une procédure de résolution dans laquelle on peut appliquer le principe pour arriver à la solution.

Heller [19] quant à lui, organise la résolution d'un problème de physique en 5 étapes :

- la visualisation du problème [13],
- la description en termes de physique [14],
- la construction du plan de la résolution [15],
- l'exécution du plan conçu [16],

---

11 « This type of problem solving involves no algebraic manipulation. Therefore it is called qualitative analysis in the physics education literature. It consists of 3 stages:

1.Determining how the objects will move over time. In the illustration just given, the student decided that one block would fall as the other block rose.

2. Planning a solution to the problem by choosing systems and deciding which major principles, such as Newton's law or Conservation of Energy, to apply to each system. In the illustration, the student chose two systems, one for block 1 and one for block 2, and decided to apply Newton's law to each.

3. Delineating the relevant mechanical quantities, such as forces, accelerations, energies, moment, etc. »

12 Voici ce que l'on doit comprendre par une stratégie, selon les auteurs :

« By strategy we simply mean a qualitative description containing three major components for solving a problem

1. the major principle(s) or concept(s) that can be applied to solve the problem

2.a justification for why the principle(s) or concept(s) can be applied and

3.*a procedure by which the principle(s) or concept(s) can be applied to arrive at a solution. »*

13 La visualisation du problème consiste à dessiner la situation, à identifier les inconnues, à reformuler (écrire) la question et à identifier les principes à utiliser.

14 La description du problème consiste à faire des diagrammes (en utilisant les principes) et à paramétrer la situation.

15 La construction du plan consiste à écrire la forme générale des principes, à les appliquer pour la situation, à faire établir des relations (entre les inconnues).

16 L'exécution du plan est l'étape de la résolution de problème afin d'obtenir l'inconnue demandée.

- le contrôle et l'évaluation du problème [17].

Les deux premières étapes correspondent à l'analyse qualitative de la situation donnée, les étapes 3 et 4 sont la mise en place de la procédure de résolution et la dernière étape consiste en la vérification de la pertinence des résultats.

Pour terminer cette partie, citons les travaux de Reif qui donne un cadre pour synthétiser les approches antérieures. Ces travaux occupent un rôle important dans les recherches sur la résolution de problèmes en physique. Nous nous référerons aux trois travaux de Reif qui datent de 1976[18], 1983[19] et 1995[20] [6], [7], [16]. La méthode de résolution du problème en mécanique y est reformulée en trois étapes ;

- *l'analyse initiale d'un problème,*
- *la prise de décision afin de construire une résolution,*
- *le contrôle du résultat.*

La première étape, appelée « ***analyse initiale d'un problème*** », correspond à la description du problème à l'aide de diagrammes et de symboles, de résumés des objectifs du problème et de la description de la situation en fonction du temps. Comme nous l'avons déjà vu dans d'autres travaux, c'est une analyse que l'on effectue avant la résolution "quantitative" c'est à dire algébrique de l'exercice.

La deuxième étape est la construction de la résolution du problème. Dans cette étape, nous trouvons une méthode qui est le découpage du problème (l'auteur écrit « diviser et conquérir »[21]).

On décompose le problème en sous problèmes. La résolution du problème initial consiste donc en résolutions de sous problèmes. On choisit un sous problème et on le résout algébriquement. Puis on revient en arrière et en choisit un autre sous problème. Cela continue jusqu'à ce que l'on n'ait plus d'inconnues, c'est-à-dire jusqu'à l'obtention du résultat demandé dans l'énoncé du problème.

---

17 L'évaluation du problème est l'étape de contrôle de résultats qui consiste à poser des questions comme « la solution est-elle complète ? », « le signe de la solution est-il correct ? La solution a-t-elle une dimension correcte ? », « la magnitude de la solution est-elle raisonnable ? ».

18 Dans le travail de 1976 [16], on constate que la résolution d'un problème se fait en quatre étapes successives. La ***description du problème*** consiste à faire une liste de ce qui est connu et ce qui est demandé et de dessiner un diagramme pour la situation. Reif précise aussi que le résultat de cette étape doit être une reformulation claire du problème. ***L'étape du planning*** consiste à sélectionner des relations pertinentes pour résoudre le problème et à préciser comment ces relations peuvent être utilisées. Il précise que le résultat de cette étape doit être un plan spécifique pour obtenir la solution du problème. ***L'implémentation du plan*** consiste en l'exécution du plan en faisant tous les calculs nécessaires. Le résultat de cette étape doit être la solution du problème. C'est l'étape de résolution algébrique du problème. ***Le contrôle de la solution*** consiste à vérifier que toutes les étapes du plan précédent sont valides et que la solution finale a du sens. Par l'accomplissement de cette étape on sera sûr de la validité de la solution du problème.

19 Dans le travail de 1983[6], il change le nom de la première étape et il introduit le terme « analyse »; au lieu d'utiliser la description du problème, il préfère dire « description et analyse du problème ». Il met au même niveau l'étape du planning et l'implémentation du plan et il l'appelle « construction effective d'une solution par le suivi des méthodes ». La dernière étape de la résolution reste telle qu'elle est, c'est-à-dire le contrôle des résultats.

20 Ce travail daté de 1995 [7] et a été récompensé par le prix « Millikan Lecture » par la revue AJP.

21 En anglais : « divide – conquer »

On peut aussi expliciter pour les étudiants ce qu'il faut faire dans la résolution. D'ailleurs, la non explicitation des procédures de résolution est considérée comme une cause d'échecs. Johsua et Dupin précisent que « ***le dire, c'est le faire*** *» [5]*

A ce propos, Reif précise également que

> *« il est très commode d'expliciter clairement les processus de la résolution. Une simple question « Quel principe pouvez-vous appliquer à quel système ? » peut aider les étudiants et peut leur éviter de se poser la question « qu'est-ce que je dois faire ensuite ?[22] »*

Nous voyons que cette méthode convient aussi aux besoins des étudiants que nous avons cités au paragraphe 2.3. VanLehn [26] identifie les besoins des étudiants lors de la résolution de problèmes, et note que, par exemple, la plupart des étudiants demandent eux-mêmes ce qu'il faudrait faire pour résoudre les problèmes posés.

Dans un autre article de Reif *[6]*, nous trouvons une conclusion similaire :

> *« Il semblerait utile d'enseigner aux étudiants séparément et explicitement les composantes du savoir nécessaire pour bien résoudre les problèmes… De plus, l'enseignement devrait alors aider à intégrer ces composantes de façon à ce que les étudiants les utilisent conjointement en commençant des travaux de résolution de problèmes,… »*

La dernière étape consiste à poser des questions sur la cohérence de la réponse obtenue. Elle a pour objectif d'assurer que le problème est correctement résolu.

Reif insiste sur le fait de poser des questions comme :

- *« Le but est-il atteint ? »,*
- *« Y a-t-il des inconnues dans la solution ? »,*
- *« Le résultat est-il optimisé ? »,*
- *« Y a-t-il des cohérences avec les autres informations (cohérence avec les cas spéciaux, cohérence avec le résultat obtenu par d'autres chemins de résolution, ...) ? »,*
- *« Y a-t-il des cohérences entre les unités dans les équations, entre les signes dans les équations ? ».*

Dans les parties ultérieures de la thèse, nous reviendrons sur ces questions.

En conclusion

Nous avons choisi ci-dessus d'assimiler les propositions dans les travaux de didactique sur la manière de résoudre les problèmes de physique à des éléments d'aide à apporter aux étudiants. En fait le terme « aide» est indissociable du terme « difficulté » parce que les aides proposées doivent répondre à des difficultés des étudiants. Les travaux précédemment cités souligne de fait l'importance des difficultés méthodologiques rencontrées par les étudiants lors de la résolution d'un problème de physique.

Les travaux que nous avons analysés supposent également la comparaison de la résolution de l'étudiant avec celle de l'expert. Les difficultés et les aides à proposer sont interprétées en

22 What to do next? (En anglais)

fonction de cette comparaison. Les travaux ne vont pas au-delà des comparaisons des résolutions supposées de l'expert avec celle de l'étudiant, ainsi que le soulignent Johsua et Dupin.

> *« […], il paraît clair que, du point de vue de leur intérêt en didactique des sciences, les études sur la résolution de problème doivent surtout être prises en considération à partir du moment où elles cherchent à prendre en compte le fonctionnement du sujet en soi, à une étape et dans des conditions données, et non principalement en comparaison avec le fonctionnement supposé de l'expert. » [5]*

Ils précisent aussi que

> *« Il y a là un problème de taille ; beaucoup de travaux en résolution de problème admettent désormais la différence qualitative de la structuration des connaissances entre l'expert et le novice, mais prennent le premier comme modèle à atteindre directement. » [5]*

D'autres chercheurs, notamment Dumas-Carré et Goffard précisent que

> *« certains enseignants essayent de, […], réduire la difficulté en énonçant une suite d'actions à accomplir. Par exemple, en mécanique : choisir le système, faire le bilan des forces sur le système, … » [2]*

mais

> *« ces activités de tutelle sont insuffisantes , à notre avis, car, premièrement, rien n'est dit ou fait pour aider les élèves à réaliser certaines actions conseillées : dire qu'il faut choisir un système ne dit pas comment le faire, ne dit rien quant aux critères et aux méthodes de choix ;… » [2]*

4 Conclusion du chapitre

L'étude bibliographique effectuée dans ce chapitre nous a permis d'établir des repères sur le « problème » et la « résolution de problèmes » en physique, et de montrer l'importance de difficultés méthodologiques récurrentes des étudiants dans la résolution de problèmes de physique. Nous avons dégagé les stratégies (les cheminements stratégiques) recommandées dans la résolution d'un problème de physique en réponse à ces difficultés.

Nous avons choisi de nous concentrer sur cette question des difficultés méthodologiques rencontrées par les étudiants lors de la résolution de problèmes en mécanique du point matériel (la majorité des études didactiques sur la résolution de problèmes en physique portent sur ce domaine).

Nous avons vu que la majorité de travaux présentés ci-dessus procèdent par confrontation la résolution d'un problème par un étudiant avec celle d'un « expert ». Mais ils n'analysent pas vraiment ce qu'est une résolution experte, ni les références que constituent pour les étudiants les résolutions données dans les manuels et par les enseignants. D'autre part, on ne s'interroge pas beaucoup sur « ce qui fait problème », c'est-à-dire on ne questionne pas véritablement d'une part l'intention scientifique (celle qui motive le problème) et d'autre part les intentions pédagogiques. C'est ce que nous nous proposons de faire dans la suite de ce travail. Nous allons d'abord partir d'énoncés et de résolutions expertes pour dégager les intentions scientifiques et pédagogiques et les stratégies des enseignants anciens (depuis 1784) et actuels. Ceci nous permettra de construire une grille d'analyse pour analyser les productions

des étudiants actuels. Cela demande un travail d'analyse détaillé et nous avons choisi de nous concentrer sur un problème emblématique de l'enseignement de la mécanique du point.

Nous allons travailler sur un problème très connu, le problème de la machine d'Atwood. Dans le chapitre suivant, nous allons résoudre ce problème en tenant compte des résultats de notre étude bibliographique et nous allons construire un cadre d'analyse didactique pour l'analyse des résolutions des enseignants et celles des les étudiants.

Chapitre II

Rapport de l'expert à la résolution de problème de problème de dynamique du point

Construction d'une grille d'analyse

Chapitre II Rapport de l'expert à la résolution de problème de dynamique du point : Construction d'une grille d'analyse

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié les propos des chercheurs en didactique sur la résolution de problèmes et les aides à proposer aux étudiants. Cependant, ce que les auteurs présentent comme stratégies « d'expert[23] » (de référence) ou/et à proposer aux étudiants, restent souvent très générales. Nous allons chercher à entrer dans le détail de ces stratégies que ce soit des stratégies scientifiques de référence, des stratégies à proposer comme aide aux étudiants ou des stratégies d'étudiants. Dans un premier temps, ce chapitre, nous allons construire une résolution « experte » actuelle artificielle qui servira de référence à toute notre étude et nous permettra de déployer notre cadre théorique d'analyse didactique. Dans le chapitre suivant (chapitre 3), nous analyserons à l'aide de la grille d'analyse établie ci-dessous, l'évolution des résolutions des enseignants depuis 1784. Nous passerons ensuite aux résolutions par les enseignants actuels, puis à celles des étudiants actuels.

Nous ne pouvons pas faire une analyse détaillée d'un ensemble diversifié de problèmes scolaires classiques de dynamique. Nous avons choisi de nous concentrer sur un problème unique typique de l'enseignement de la dynamique et universel dans le sens où on le retrouve de manière quasi systématique dans tous les enseignement de mécanique du point matériel, dans tous les pays et à toutes les époques. Il s'agit du problème de la machine d'Atwood, le dispositif mécanique destiné à l'étude des lois de Galilée sur le mouvement qui précèdent les fameuses lois de Newton : « *En 1782, un docteur anglais, Atwood, professeur à l'université de Cambridge, fit connaître une machine très ingénieuse, à l'aide de laquelle on peut étudier la chute des corps plus complètement et plus commodément qu'avec le plan incliné de Galilée »* [27].

La mise au point de cette grille d'analyse, dans la deuxième partie de ce chapitre, s'appuie sur les résultats dégagés par l'étude bibliographique précédente et sur plusieurs outils théoriques : l'analyse praxéologique de Chevallard [28] qui sera complétée par le modèle MOT (Modélisation par des objets typés) de Paquette [29]. Nous verrons également comment ces outils permettent ou non d'aborder la dimension « Réel/Théorie » (Tiberghien [4], [12]) et la dimension langagière (Duval, [14]) dans la résolution d'un problème de dynamique.

1 Problème de la machine d'Atwood et sa résolution

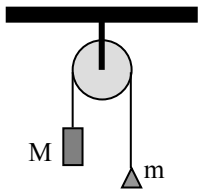
1.1 Présentation du problème de la machine d'Atwood

Pour préciser les difficultés rencontrées par les étudiants et les aides à leur proposer nous souhaitons d'abord dégager les stratégies permettant à l'expert de résoudre le problème de mécanique. C'est le problème de la machine d'Atwood. Voici le problème tel qu'il est énoncé

23 Le terme « expert » est utilisée de manière récurrente dans les travaux américains. Nous entendons par ce terme « physicien » qui est utilisé dans les travaux français.

dans une feuille de TD de dynamique du point matériel en première année d'université en France en 2003. Cet énoncé est représentatif des types d'exercices proposés dans les travaux dirigés (TD).

Machine d'Atwood
Dans ce système mécanique, on négligera tous les frottements, ainsi que la masse de la poulie et de la corde. La corde est inextensible. M > m.
Calculer l'accélération acquise par les masses M et m lorsqu'on laisse évoluer librement le système.



Ce problème correspond au type de problèmes, dits scolaires, que nous avons caractérisés précédemment (paragraphe 1.1.2, Chapitre 1) :

- La situation éloignée du réel, est déjà modélisée dans l'énoncé (objets géométriques représentant les masses, la poulie, la corde).
- Les grandeurs, masses, accélération sont explicitées dans l'énoncé. Les paramètres définissant les systèmes sont également donnés, telles les masses M et m.
- La question est posée en termes de grandeurs physiques à déterminer (obtenir l'expression de l'accélération de la masse M).
- La solution est supposée exister. On peut poser qu'elle est unique.

1.2 Choix et contraintes pour construire la résolution de référence

Dans la suite du chapitre, nous aurons deux discours : le discours d'un expert qui résout le problème et qui nous servira de référence. Nous le désignerons par le terme d'*Expert de Référence.* Le second discours est celui du chercheur en didactique de la physique qui a pour objectif de décrire le processus de résolution de celui qui résout ce problème de la machine d'Atwood. Nous utiliserons la première personne du pluriel « nous » pour le discours du chercheur en didactique (comme nous l'avons fait jusqu'ici), et la troisième personne du singulier « il » pour le discours de l'*Expert de Référence*. Cela permettra de bien séparer les intentions d'un expert lors d'une résolution de problème de notre intention de chercheur, qui est de décrire sa stratégie de résolution.

L'Expert de Référence est « actuel » : il résout le problème tel qu'il est posé dans un TD de mécanique du point matériel actuel et il dispose des cadres théoriques scientifiques actuels (en physique et en mécanique).

L'Expert de Référence est « composite » car nous avons cherché ici à prendre en compte de manière cohérente et à synthétiser les principaux éléments proposés dans les différents travaux de recherche exposés dans le chapitre 1 (paragraphe 3, pp.12) : d'une part les caractéristiques de la résolution d'un problème par un expert (paragraphe 2, pp.8), et d'autre part les schémas de résolution, en particulier le schéma de résolution proposé par Reif (paragraphe 3, pp.14). La résolution quantitative du problème est précédée par une analyse qualitative et suivie par un contrôle de résultats.

L'Expert de Référence est virtuel car il n'existe dans aucune institution ; c'est un modèle que nous construisons et auquel nous donnons la forme d'un personnage pour les raisons de clarté

de rédaction précédemment citées. *L'Expert de Référence* sait que les énoncés des problèmes scolaires et leurs résolutions subissent des simplifications qui les circonscrivent au contexte d'un enseignement, que ce contexte soit déterminé localement par un enseignant ou sur un plan institutionnel plus général (dans un curriculum, par des connaissances et compétences visées, par une situation d'enseignement). C'est pourquoi il a choisi de construire une résolution dans un contexte plus général que les contextes habituellement rencontrés dans l'enseignement de la dynamique du point matériel.

Cet expert virtuel nous sert d'*Expert de Référence* car sa résolution nous permettra d'appréhender les choix effectués lors des simplifications de résolution, et de délimiter les contextes de l'enseignement traditionnel. Ceci doit également permettre de poser la question des choix effectués par un enseignant dans un cadre institutionnel donné. Sur le plan de la physique, la résolution proposée repose sur le seul contexte de la dynamique du point matériel.

2 Résumé de la résolution du problème de la machine d'Atwood

La résolution de cet *Expert de Référence* est présentée en Annexe A. Nous présentons dans ce paragraphe les grandes lignes de cette résolution.

La résolution de *L'Expert de Référence* est constituée de trois étapes principales en référence aux études didactiques précédemment citées :

- une analyse qualitative du problème posé permettant d'anticiper certains aspects de la solution et des résultats pour certains cas particuliers
- une résolution quantitative du problème aussi détaillée que possible, s'appuyant sur les lois de la mécanique et utilisant l'arsenal mathématique
- un contrôle de la solution obtenue par la résolution quantitative et une articulation avec les résultats de l'analyse qualitative.

La stratégie de résolution est représentée dans la figure ci-dessous (Figure 6).

L'Expert de Référence utilise principalement le principe fondamental de la dynamique (PFD) exprimé sous une forme algébrique[24]. Bien que d'autres lois physiques soient aussi employées c'est le PFD qui pilote toute la résolution.

Il précise dans quel cadre théorique de la mécanique il se place pour cette résolution : c'est le cadre théorique de la dynamique du point matériel, qu'il réduit ensuite au cadre particulier de cette étude. Par exemple il précise que le référentiel est galiléen et n'écrit le PFD que pour le cas de corps de masse constante.

24 Le principe fondamental de la dynamique peut être exprimé dans le langage naturel : par exemple Feynman [30] le pose dans ces termes : « *Le mouvement d'un objet est modifié par les forces : la vitesse de changement en fonction du temps d'une quantité appelée quantité de mouvement est proportionnelle à la force* ». Nous avons également trouvé dans un polycopié de la mécanique du point matériel la définition suivante : « *la force totale* $\vec{F}$ *appliquée à un corps est égale au produit de sa masse m par son accélération* $\vec{a}$ » [31].

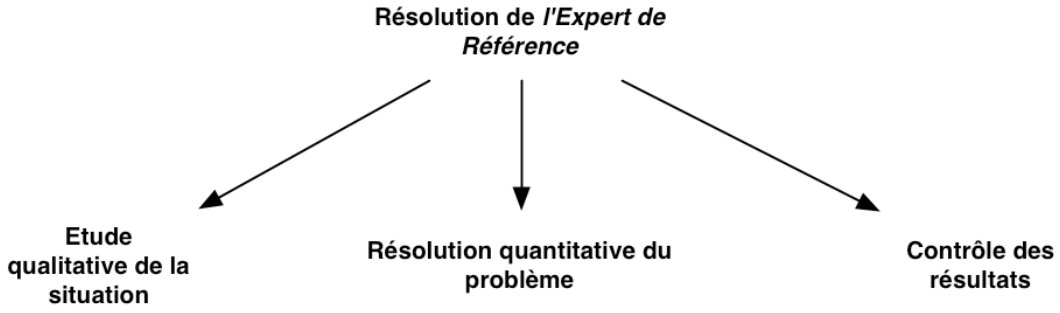


Figure 6: Principales étapes de la résolution de l'Expert de Référence

2.1 Approche qualitative

La résolution de *l'Expert de Référence* commence par une étude qualitative (paragraphe 1 – Annexe A). Son étude qualitative comprend principalement une étude de cas limites : ce sont des cas particuliers pour lesquels on peut anticiper l'accélération des masses à partir de l'expérience quotidienne ou/et parce qu'on connaît les résultats de problèmes simples similaires à ces cas particuliers (par exemple la chute libre d'un corps similaire au cas où la masse la plus faible est considérée nulle).

Ces cas particuliers lui permettent d'extrapoler certaines caractéristiques du cas général : si la masse la plus petite est infiniment plus faible que l'autre masse, alors l'accélération des masses dans le dispositif de la machine d'Atwood sera proche de l'accélération gravitationnelle ; si au contraire les masses sont égales, les accélérations sont nulles ; on en déduit que les accélérations seront plus petite que l'accélération gravitationnelle (paragraphes 1.1 et 1.2 – Annexe A).

2.2 Résolution quantitative

2.2.1 Discussion des conditions d'application du PFD

L'Expert de Référence passe ensuite à la résolution quantitative du problème de la machine d'Atwood (paragraphe 2 – Annexe A).

Il discute les conditions d'utilisation du PFD : la nécessité d'un référentiel galiléen (paragraphe 2.1.1 – Annexe A), la définition des systèmes à étudier, et des objets de masse constante (paragraphe 2.1.2 – Annexe A). Pour être objectif et exhaustif dans sa résolution, il décide d'étudier tous les systèmes possibles : *la masse M, la masse m, la poulie et* les deux brins verticaux de la corde.

2.2.2 Etude de la masse M par l'utilisation du PFD

L'Expert de Référence utilise d'abord le PFD pour le système de la masse M (paragraphe 2.2.1 – Annexe A). En s'appuyant sur la définition du PFD, il précise qu'il lui faut définir 3 paramètres : la masse de ce système, l'accélération du système, les forces extérieures appliquées au système. La masse du système est explicite dans l'énoncé du problème : M.

L'Expert de Référence fait une analyse du mouvement: *la masse M descend et la masse m monte,* et il paramètre l'accélération du système : $\vec{a_M}$. L'analyse du mouvement lui permet aussi de choisir les axes du repère et le système de coordonnées approprié : *un axe vertical dirigé vers le bas et le système de coordonnées cartésiennes*.

L'Expert de Référence fait ensuite le bilan de forces en justifiant l'existence de chacune des forces. Il instancie chaque force dans ce système de coordonnées.

L'Expert de Référence a ainsi tous les éléments pour écrire le PFD. Il écrit d'abord vectoriellement le PFD et ensuite il le projette suivant l'axe du repère choisi. D'après la projection, il obtient une équation : $+Mg-\|\vec{T_M}\|=+M\|\vec{a_M}\|$, nommée *« Equation 1 »*.

Dans cette équation, il y a deux inconnues ($\vec{T_M}$ et $\vec{a_M}$): l'expert ne peut pas résoudre l'équation et décide d'étudier les autres systèmes.

2.2.3 Etude des autres systèmes par le PFD

L'Expert de Référence utilise le PFD de la même manière pour la masse m, pour la poulie (en l'absence de mouvement de translation), pour un brin vertical de corde :

- L'étude du système de la masse m lui donne l'équation du mouvement pour la masse m (*« Equation 2 »*) : $+mg-\|\vec{T_m}\|=-m\|\vec{a_m}\|$ (paragraphe 2.2.2 – Annexe A).
- L'étude du système de la la poulie lui donne l'équation $\|\vec{F}\|=\|\vec{T}\|+\|\vec{T}'\|$ (« équation 3 »). Mais cette équation n'est pas utilisée dans la suite de sa résolution (paragraphe 2.2.3 – Annexe A).
- L'étude du système d'un brin vertical de corde lui donne l'égalité en norme des forces de tensions sur un brin vertical de corde -« équation 4 » (paragraphe 2.2.4 – Annexe A).

2.2.4 Etude de la rotation de la poulie

Il étudie ensuite le système de la poulie en se plaçant dans le cadre théorique de **la mécanique du solide indéformable** (paragraphe 2.2.5 – Annexe A)

Cette étude et l'étude de la corde permettent d'établir une relation entre les forces de tension appliquées sur les masses M et m, à savoir $\vec{T_M}=\vec{T_m}$ (« équation 6 »). Cependant l'ajout de cette relation ne suffit pas à résoudre le système d'équations.

2.2.5 Conservation de la longueur de la corde

L'Expert de Référence s'appuie sur la conservation de la longueur de la corde en paramétrant chacun des brins de corde et en utilisant les concepts cinématiques (passage de la position à l'accélération) (paragraphe 2.2.6 – Annexe A). Il obtient une autre relation entre les accélérations des masses, $\vec{a_M}=-\vec{a_m}$ (« équation 7 »).

A l'aide de ces 6 relations, Il résout le système d'équation et obtient les accélérations des deux masses $\vec{a_M}=\frac{M-m}{M+m}\vec{g}=-\vec{a_m}$ (« équation 8 »).

2.3 Contrôle des résultats

La résolution de « *l'Expert de Référence* » s'achève par la vérification de la cohérence entre la solution obtenue et les résultats obtenus dans des cas particuliers par l'analyse qualitative (paragraphe I.3 – Annexe A). Il vérifie que l'expression analytique liant les paramètres est cohérente avec l'analyse qualitative. Par exemple, il vérifie que dans le cas limite de l'égalité entre les deux masses ($M=m$), l'expression algébrique correspond bien à un système en équilibre avec les accélérations des masses nulles. Il conclut alors que sa solution est cohérente avec les contraintes données par l'analyse qualitative. L'absence de contradictions permet de conforter l'appréciation que la résolution et la solution sont correctes.

3 Description primitive de la résolution en vue des analyses didactiques

L'analyse rapide de la résolution nous permet de dégager les aspects suivants.

La résolution du problème a mobilisé le réseau conceptuel mettant en relation des grandeurs cinématiques et dynamiques à travers un principe physique dominant : le principe fondamental de la dynamique. En outre, il est apparu nécessaire de faire appel à la dynamique du solide, au moment cinétique pour obtenir une relation entre les forces de tension de la corde.

La résolution a mobilisé des concepts appartenant à plusieurs cadres théoriques de la physique (la dynamique du point, la cinématique, la mécanique du solide). Elle a également mobilisé les connaissances d'un autre cadre théorique d'une autre discipline, l'algèbre.

L'Expert de Référence a utilisé différents registres sémiotiques, tels que le registre du langage naturel, le registre du schéma, le registre du langage algébrique.

L'Expert de Référence a organisé les différentes connaissances de la situation physique qui fait référence au réel[25] : sélection des informations de la situation (réel), puis traduction de ces informations sous forme de paramètres physiques, puis retour vers le domaine du réel afin de donner du sens à la solution du problème.

Enfin, *l'Expert de Référence* a mis en place une stratégie de résolution qui est déterminée par ce que nous appellerons l'intention de l'expert (cf paragraphe 4.2). Cette intention peut être exprimée ainsi : ***démontrer l'expression de l'accélération des deux masses en s'appuyant sur des principes dans le cadre théorique de la physique***.

A la lumière de cette analyse, nous constatons que la résolution fait interagir des connaissances appartenant à 4 pôles :

- le réseau conceptuel de la dynamique et de la cinématique
- les registres de représentations sémiotiques
- une référence au réel
- une stratégie fonction de l'intention de celui qui résout le problème.

25 En fait, la situation physique d'un tel énoncé peut désigner une infinité de situations réelles. Il s'agit d'une classe de situation.

Nous représentons les quatre pôles évoqués ci-dessus par la figure suivante (Figure 7).

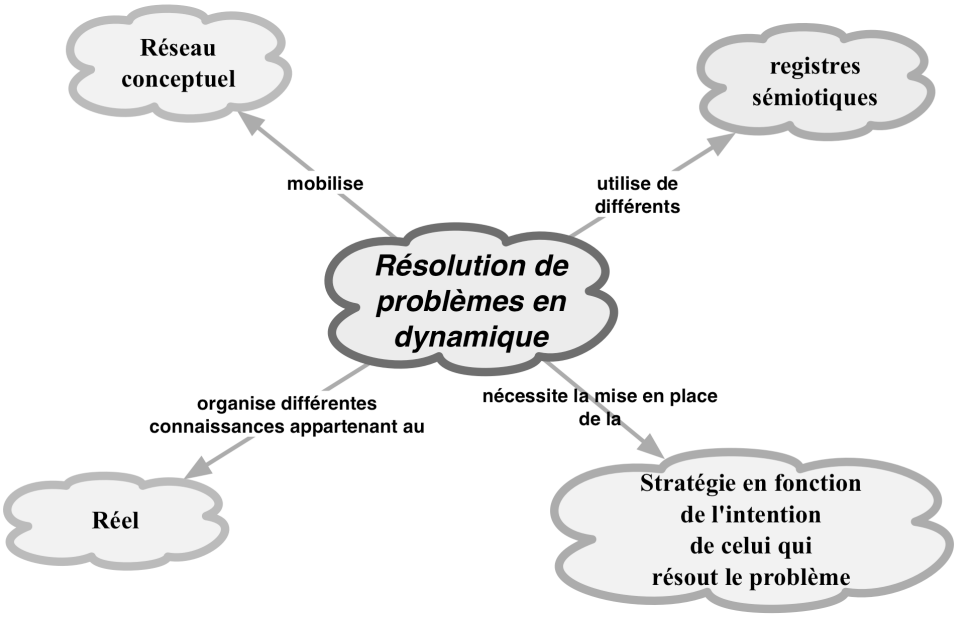


Figure 7: Caractérisation de la résolution du problème en dynamique

Le principe fondamental de la dynamique du point (PFD) ne définit pas telle ou telle stratégie de résolution, mais il impose des contraintes qui guident la résolution. Notre objectif est de décrire la stratégie adoptée par *l'Expert de Référence* pour résoudre le problème.

Pour mener cette étude, nous nous proposons d'effectuer trois analyses qui se compléteront :

- 1e analyse : Analyse générale de la résolution de *l'Expert de Référence* en termes d'intention et de stratégie
- 2e analyse : Analyse de la résolution dans le cadre de la théorie anthropologique du savoir
- 3e analyse : Analyse de la résolution à l'aide de l'outil de modélisation MOT (Modélisation par des Objets Typés).

Nous représentons nos analyses pour décrire la stratégie de résolution de l'Expert de Référence par la figure ci-dessous (Figure 8)

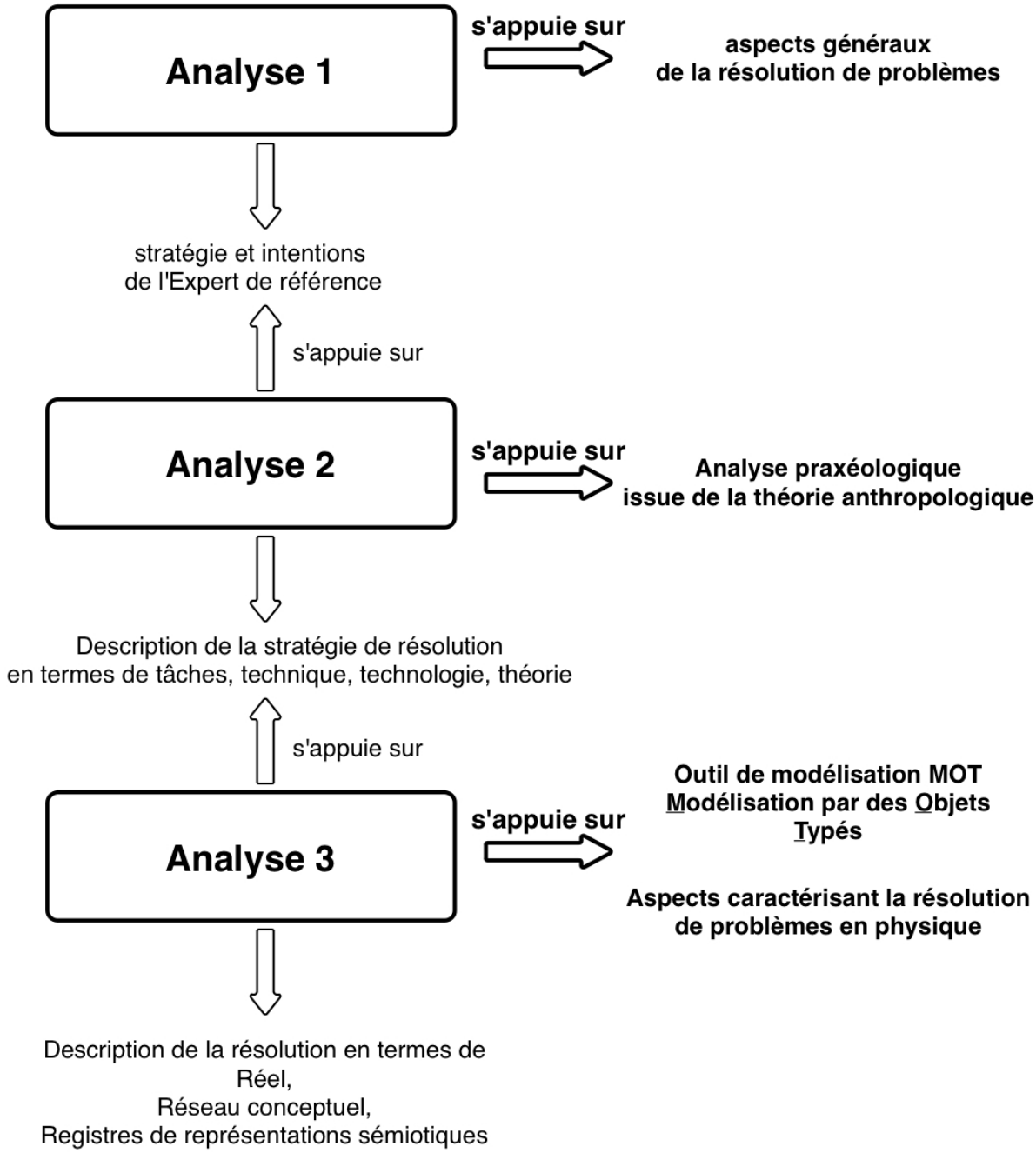


Figure 8: Diagramme représentant les analyses à faire pour la description de la résolution de l'Expert de Référence

4 1e Analyse : Description et analyse générale de la résolution de l'Expert de Référence : Son intention et sa stratégie

4.1 Stratégie

Dans cette première analyse, nous avons pour objectif de décrire le « cheminement » que *l'Expert de Référence* a suivi pour la résolution du problème de la machine d'Atwood. Autrement dit, nous avons pour objectif de décrire la stratégie de *l'Expert de Référence*. Ceci correspond au premier aspect que nous avons dégagé pour caractériser un problème, c'est à dire la nécessité d'un cheminement à suivre en fonction d'un but (paragraphe 1.2.1, pp. 3, chapitre 1).

Tout d'abord, nous allons décrire comment nous allons dégager, et donc définir, les deux éléments recherchés : la stratégie de résolution et l'intention associée.

En décomposant la résolution de *l'Expert de Référence* en étapes élémentaires, nous mettons en évidence sa stratégie de résolution. La stratégie de résolution de *l'Expert de Référence* est représentée par la figure 9. Pour construire cette figure, nous nous appuyons sur la figure 6 (pp.50), qui montre les principales étapes de la résolution de *l'Expert de Référence*. Nous numérotons les étapes en fonction de l'organisation chronologique dans la résolution. Sa stratégie est constituée de trois étapes principales :

- Etape 1 : il commence par une étude qualitative de la situation, qui lui permet d'anticiper la solution du problème sans résoudre quantitativement le problème (*étape 1 dans la figure 9*),
- Etape 2 : il fait ensuite une résolution quantitative du problème en utilisant la forme algébrique des principes de la physique (*étape 2 dans la figure 9*)
- Etape 3 : il termine sa résolution par le contrôle de résultats qui lui permet d'assurer la cohérence de sa résolution (*étape 3 dans la figure 9*).

Pour les analyses ultérieures dans ce chapitre 2, nous nous appuierons sur cette description de stratégie.

4.2 Intention

Cependant cette stratégie ne trouve son sens que par référence à *l'intention* de *l'Expert de Référence*. Autrement dit, nous définissons ici une caractéristique de *l'intention* de *l'Expert de Référence* par le fait qu'elle permet de rendre compte de sa stratégie de résolution.

Nous avons vu au chapitre précédent (1.2.2.2) que Guillaud [13] fait appel à une notion d'intention dans sa caractérisation des faits scientifiques : « *la construction du fait scientifique […] suppose toujours une intention, un choix. Il n'est visible que pour celui qui disposant au préalable d'éléments théoriques, est capable de poser des questions à la nature* ».

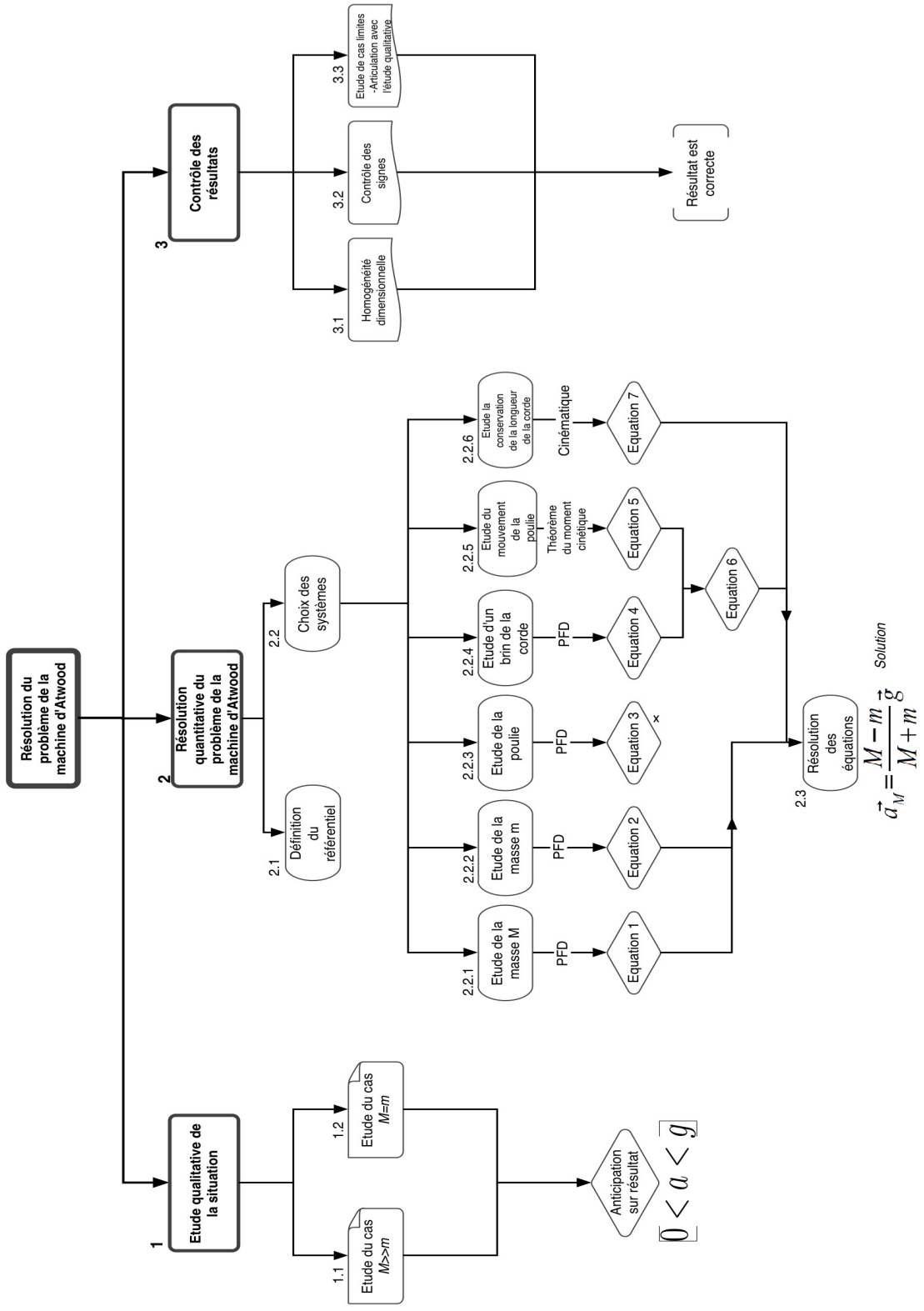


Figure 9: Stratégie de résolution suivie par l'Expert de Référence. Les numéros au-dessus des figures correspondent à ceux des paragraphes dans la résolution de l'Expert de Référence présentée en Annexe A.

Le dictionnaire Hachette [32] définit l'intention comme un « *acte de la volonté par lequel on*

se fixe un but. Par extension, le but lui-même ». Nous entendrons ici par le terme d'« *intention* scientifique » : d'une part les principes épistémologiques et physiques qui guident l'action, et d'autre part le but de l'action, c'est-à-dire la question scientifique que l'on se pose. S'agissant de la stratégie adoptée par une personne experte lors de la résolution du problème de mécanique qui nous intéresse, l'intention scientifique de l'expert peut être décrite par « ***démontrer l'expression de l'accélération des deux masses en s'appuyant sur les « principes » de la mécanique du point et du solide ».*** Dans la figure 9, nous décrivons la stratégie de l'expert comme une organisation globale composée de 3 types de sous-organisations spécifiques à ce type de problèmes de mécanique. Chacun de ces types d'organisations est coordonné par un principe physique organisateur (PFD, théorème du moment cinétique, cinématique).

Nous remarquons que notre expert de référence n'a pas d'*intention didactique* car il ne se situe pas dans un contexte d'enseignement qui impliquerai un cadre et des buts didactiques que nous désignerons plus tard par le terme d'*intention didactique*.

Nous avons également fixé des règles de comportement de notre expert de référence dans sa résolution :

- Il entre dans les détails de la résolution. Il cherche seulement à construire une solution qui soit en cohérence avec les principes. Il ne se préoccupe pas de contraintes que les enseignants rencontrent dans leur enseignement (l'interaction avec « les novices », la gestion de la charge cognitive et du temps didactique, …)
  - il fait une résolution exhaustive (plusieurs pages pour la résolution d'un seul problème), ce qui rend sa résolution objective et compréhensible dans ses détails.
  - il démontre, autant que possible, toutes les relations dont il a besoin pour résoudre les équations.
  - il peut sortir du cadre théorique de la dynamique du point (*il utilise le théorème du moment cinétique -étape 2.5 dans la figure 9*).
- il étudie systématiquement tous les systèmes définis (*étape 2 dans la figure 9*).
- il peut étudier un système qui n'aide pas à résoudre le problème (*équation 3 dans la figure 9*)
- …

Nous avons mis ici en évidence l'intention de l'expert de référence et sa stratégie. Ces deux éléments font partie de la grille d'analyse que nous suivrons pour étudier et comparer les résolutions de la machine d'Atwood par les enseignants et les étudiants.

Dans le paragraphe suivant, nous nous proposons d'étudier la stratégie de *l'Expert de Référence* dans le cadre de la théorie anthropologique de savoir, notamment en fonction de l'organisation praxéologique de Chevallard.

5 2e analyse : Description et analyse didactique de la stratégie de l'Expert de Référence – Organisations praxéologiques

5.1 *Présentation de la théorie anthropologique de savoir*

Cette notion de praxéologie est issue de la théorie anthropologique du savoir de Y. Chevallard. Son objectif est de mettre en évidence le rapport institutionnel à un objet de savoir et de souvent comparer ce rapport institutionnel avec le rapport personnel des étudiants. Nous nous

sommes appuyés sur différents travaux de Chevallard ([33], [34], [28], [35],[36]) et des thèses récentes ([37], [38], [39]).

5.1.1 Objet, Personnes et Institution

La théorie anthropologique repose sur trois termes primitifs:

- les objets (O) : tout peut être l'objet mais en didactique on considère les objets de savoir
- les personnes (X), qui sont les enseignants et les élèves
- les institutions (I), qui sont par exemple les séances de TD, l'école

Chevallard définit des rapports suivants à partir de ces trois termes primitifs :

- le rapport institutionnel à un objet de savoir qu'on désigne par $R_I(O)$[26].
- le rapport personnel d'une personne à un objet de savoir qu'on désigne par $Rp(X,O)$[27].
- le rapport institutionnel d'une personne en position P d'une institution à un objet de savoir RI(P,O)[28]

En respectant les notions primitives de la théorie anthropologique du savoir, énoncées par Chevallard, nous proposons le tableau ci-dessous (Tableau 2). Ce tableau montre les correspondances des notions primitives de la théorie anthropologique avec notre sujet d'étude. Notre objet d'étude est précisément la résolution du problème de la machine d'Atwood, avec l'idée que la résolution de ce problème est représentative des résolutions d'une classe plus large de problèmes de dynamique.

Notions primitives	Correspondances avec notre travail
Objet	Résolution du problème de la Machine d'Atwood (RMA)
Sujets	*Expert de Référence (ExpRef)*
	Enseignants (Ens)
	Etudiants (Etd)
Institution	TD de dynamique du point

Tableau 2: Notions primitives de la théorie anthropologique du savoir et correspondances de ces notions dans le cadre de notre travail

Nous parlerons des rapports au savoir pour caractériser les différentes résolutions : la résolution de l'Expert de Référence, celles des enseignants et celles des étudiants. Nous définissons donc trois rapports :

- **R(ExpRéf, RMA) :** pour désigner le rapport de l'*Expert de Référence* à la

26 $R_I(O)$ signifie que l'objet *O* existe dans l'institution *I*, c'est-à-dire que l'institution *I* connaît l'objet *O*. Il énonce ce qui se fait dans l'institution *I* concernant l'objet *O*.

27 Le rapport personnel à un objet de savoir est l'ensemble des interactions que la personne *X* peut entretenir avec l'objet de savoir *O*. Il définit la manière dont la personne *X* connaît l'objet de savoir *O*.

28 $R_I(P,O)$ définit la manière dont la personne *X* en position *P* de l'institution *I* connaît l'objet de savoir *O*.

résolution de problèmes en dynamique du point. L'*Expert de Référence* étant fictif et n'étant ni dans une position d'apprenant ni celle d'un enseignant, les qualifications d'institutionnel ou personnel n'ont pas beaucoup de sens ici.

- **R_I(Ens, RMA) :** pour désigner les rapports institutionnels des enseignants à la résolution de problèmes en dynamique du point. Il s'agit ici de rapports institutionnels dans la mesure où nous avons étudié des polycopiés et des manuels rédigés par des enseignants (des entretiens avec certains de ces enseignants nous fourniront cependant un autre éclairage).
- **R_p(Etd, RMA) :** pour désigner les rapports personnels des étudiants à la résolution de problèmes en dynamique du point[29]. Nous établirons ces rapports personnels à partir de leurs productions en TD.

L'étude de ces trois rapports organise la structuration des chapitres de la thèse : le rapport au savoir de *l'Expert de Référence* (ce chapitre), ceux des enseignants (chapitres 3, 4, 5) et ceux des étudiants (chapitres 6, 7).
Dans ce chapitre, notre objectif est donc de décrire le rapport de *l'Expert de Référence* à la résolution du problème de la machine d'Atwood *Rp(ExpRéf, RMA),* qui complétera notre grille d'analyse pour les deux autres rapports au savoir qui nous intéressent (rapports institutionnels des enseignants et rapports personnels des étudiants). A ce stade, notre grille d'analyse reposera sur trois éléments : la praxéologie, l'intention et la stratégie.

Pour décrire ces différents rapports, la théorie anthropologique donne deux outils d'analyses que nous présenterons dans le paragraphe suivant :

- l'analyse écologique
- l'analyse praxéologique.

5.1.2 Analyse écologique

L'analyse écologique s'articule autour de deux notions : l'habitat et la niche. L'habitat signifie les lieux de vie de l'objet de savoir dans des institutions et la niche la fonction que remplit cet objet de savoir dans les habitats [33], [40].

Si on considère la machine d'Atwood comme un objet de savoir, son habitat est défini par le lieu où cet objet se trouve dans l'institution de la mécanique du point matériel à l'UJF, c'est-à-dire le TD de la dynamique du point matériel. Sa niche est définie par la fonction que remplit cet objet dans cette institution, c'est-à-dire l'apprentissage des concepts de la dynamique du point matériel par la résolution de problèmes.

Nous ne chercherons pas ici à définir plus avant l'habitat et la niche de cet objet, parce que notre objectif est de caractériser la résolution du problème, et que l'analyse praxéologique offre un cadre plus adapté. Nous regarderons cependant l'évolution de la niche et de l'habitat du problème de la machine d'Atwood pour mettre en évidence les changements intervenus au cours du temps (depuis sa création à nos jours) et caractériser l'évolution des rapports institutionnels (Chapitre 3).

29 Car leur rapport institutionnel est désigné par la conformité de leur rapport à l'exigence de l'institution.

5.1.3 Analyse praxéologique

L'organisation praxéologique est définie par un quadruplet :

- Type de tâche (T) et tâches (t)
- Technique (τ)
- Technologie (θ)
- Théorie (Θ)

Dans la suite de notre travail, nous utiliserons le terme « l'organisation praxéologique » comme il est défini par Chevallard : *« Le système de ces quatre composantes, noté [T/τ/θ/Θ], constitue une organisation praxéologique ou praxéologie » [35].*

Tâche

« Au point de départ [de l'organisation praxéologique], il y a la notion de type de tâches, [...] les tâches auxquelles on se réfère se découpent dans toute la diversité de l'activité humaine. Résoudre une équation du second degré »[28], résoudre un problème de dynamique sont des types de tâches. Une tâche t appartient à une type de tâche T (plus général). Par exemple, « résoudre le problème de la machine d'Atwood » est une tâche du type de tâche « résoudre résoudre un problème de dynamique ».

Technique

La technique τ est une « manière de faire » :

> *« Quel que soit le type T de la tâche t à effectuer, l'accomplissement de t ∈ T suppose la mise en œuvre d'une technique τ, c'est-à-dire d'une « manière de faire » idoine – qui pourra varier dans le temps, mais aussi de pays à pays, et, plus généralement d'institution à institution. » [28]*

La technique est un ensemble de sous tâches accomplies :

> *« Toute technique se décompose en un ensemble de gestes. Or la plupart des gestes exécutés lorsque la tâche t ∈ T est accompli selon la technique τ sont en fait eux-mêmes de tâches : ce sont des sous tâches dont l'accomplissement est appelé par la technique τ. » [35]*

Technologie et Théorie

La technologie θ est le discours rationnel de la technique. Autrement dit, la technologie θ justifie la technique τ et la rend *« intelligible »* [36]:

> *« Toute technique τ appelle en principe une justification, c'est-à-dire un « discours raisonné » portant sur cette technique, soit ce qu'on nommera une technologie de τ. » [28]*

Cette technologie θ est *« à son tour justifié[e] et éclairé[e] par une théorie, Θ »*[36].

Savoir-faire et Savoir

Y. Chevallard définit la notion de « ***savoir-faire*** » et de « ***savoir*** » :

> *« On obtient [...] un bloc « pratico-technique » [...] formé d'un type de tâches T et d'une technique τ, et qu'on peut identifier à ce que la langue courante nomme un savoir-faire »*
>
> *« En association avec le bloc [T/τ] émerge ainsi un second bloc, [θ/Θ], formé d'une*

technologie et d'une théorie, qu'on peut identifier à ce que la langue courante nomme – de manière réductrice – un savoir. » [28]

5.2 Organisation praxéologique pour la résolution de *l'Expert de Référence*

Nous désignerons par le terme d'**étape** les trois parties dégagés dans l'étude bibliographique précédente : analyse qualitative, résolution quantitative, contrôles des résultats. (dans le cadre de l'analyse historique notre définition de l'étape sera un peu élargie) (étapes que l'on découpera en sous-tâches). En découpant chacune de ces étapes de la résolution du problème en sous-tâches et en définissant une chronologie dans leur accomplissement, nous mettons en évidence l'organisation praxéologique au niveau de chaque tâche.

Nous identifierons les tâches ainsi effectuées par l'expert à des types de tâches que nous caractériserons. Nous décrirons ensuite la technique permettant d'accomplir le type de tâche concerné. Nous chercherons à identifier les éléments technologiques, permettant de justifier la technique. Pour certaines tâches, nous préciserons les théories sur lesquelles *l'Expert de Référence* s'appuie. Nous entendrons par le terme « théorie » le cadre théorique de la physique dans lequel l'Expert de Référence se place.

L'Expert de Référence accomplit la tâche posée dans l'énoncé du problème (sur la machine d'Atwood) en effectuant les étapes :

- Etape 1 : *faire l'étude qualitative de la situation de la machine d'Atwood*
- Etape 2 : *résoudre quantitativement le problème de la machine d'Atwood*
- Etape 3 *: contrôler les résultats de la résolution du problème de la machine d'Atwood.*

Nous cherchons d'abord les tâches qui composent chaque étape (technique de l'étape) en répondant à la question « comment l'étape est-elle effectuée ? ». Ensuite, nous recherchons la technologie de cette technique en répondant à la question « pourquoi cette technique pour cette tâche ? ». Nous identifierons la théorie associée aux travers des lois physiques utilisées dans l'étape considérée.

5.2.1 Organisation praxéologique de l'étape 1 (Analyse qualitative)

Type de tâche « Etude de cas limites »

Pour faire l'analyse qualitative, *l'Expert de Référence* étudie les cas limites de la situation dans deux cas (deux tâches de ce type) :

- le cas où les deux masses sont égales (paragraphe 1.1 – Annexe A)
- le cas où la masse m est négligée par rapport à la masse M (paragraphe 1.2 – Annexe A)

Technique

L'accomplissement de ce type de tâche fait appel à une technique que nous pouvons exprimer par des sous-tâches :

- rechercher des cas particuliers pour lesquels on connaît le comportement du dispositif étudié

- prévoir ce qui va se passer dans ce cas particulier
- prévoir les valeurs que certains paramètres de la situation prendront dans ces cas particuliers.

Technologie
Pourquoi rechercher des cas particuliers et qu'est-ce qui permet de prévoir les comportements dans ces cas ? *L'Expert de Référence* s'appuie sur des problèmes de mécanique plus simples dont il connaît la solution ou/et sur son expérience personnelle de situations réelles correspondant à ces cas particuliers. Cette technologie se trouve justifiée par les « pratiques scientifiques » de l'expert. L'expert peut ensuite anticiper certaines aspects de la résolution du problème et se donner des moyens de contrôles sur la solution qui sera obtenue par l'étape lors de la résolution quantitative ; ces contrôles feront l'objet de l'étape 3.

5.2.2 Organisations praxéologiques de l'étape 2 (Résolution « quantitative » du problème)

Nous nous appuyons sur la stratégie de résolution de *l'Expert de Référence* représentée par la figure 9 (pp.56) et nous nous intéressons à l'étape de la résolution quantitative. La résolution quantitative de l'expert est organisée par trois « principes » : le PFD, le théorème du moment cinétique et la conservation de la longueur de la corde.

Dans la suite, nous décrirons ainsi trois organisations praxéologiques (voir Figure 10) :
- 1e organisation praxéologique liée à l'utilisation du PFD
- 2e organisation praxéologique liée à l'utilisation du théorème du moment cinétique
- 3e organisation praxéologique liée à l'utilisation de la conservation de la longueur de corde.

Dans le cadre théorique de la mécanique, ces trois organisations mettent en œuvre les concepts de la cinématique et de la dynamique.

A l'intérieur de chacune de ces trois organisations praxéologiques, une autre organisation praxéologique intervient : l'organisation praxéologique de l'algèbre (4e organisation praxéologique).
L'organisation praxéologique du PFD intervient de manière récurrente dans la résolution de *l'Expert de Référence* alors que les deux autres organisations n'interviennent qu'une seule fois pour établir une relation. Par contre, l'organisation praxéologique de l'algèbre est intégrée dans toutes les autres de manière quasi systématique : les trois organisations praxéologiques physiques constituent chacune un habitat pour l'algèbre.

La figure 10 présente l'organisation praxéologique générale de l'étape de résolution quantitative. Au premier niveau nous avons deux tâches la définition du référentiel et le choix des systèmes. En fait, la tâche de définition du référentiel est une sous tâche des deux organisations praxéologiques associées à l'utilisation du PFD et du théorème du moment cinétique. Du fait de son caractère répétitif, elle a simplement été extraite de sa place naturelle et placée à un niveau supérieur de l'organisation qui ne l'exige pas (par contre elle est exigée au niveau des deux autres organisations - PFD et théorème du moment cinétique).

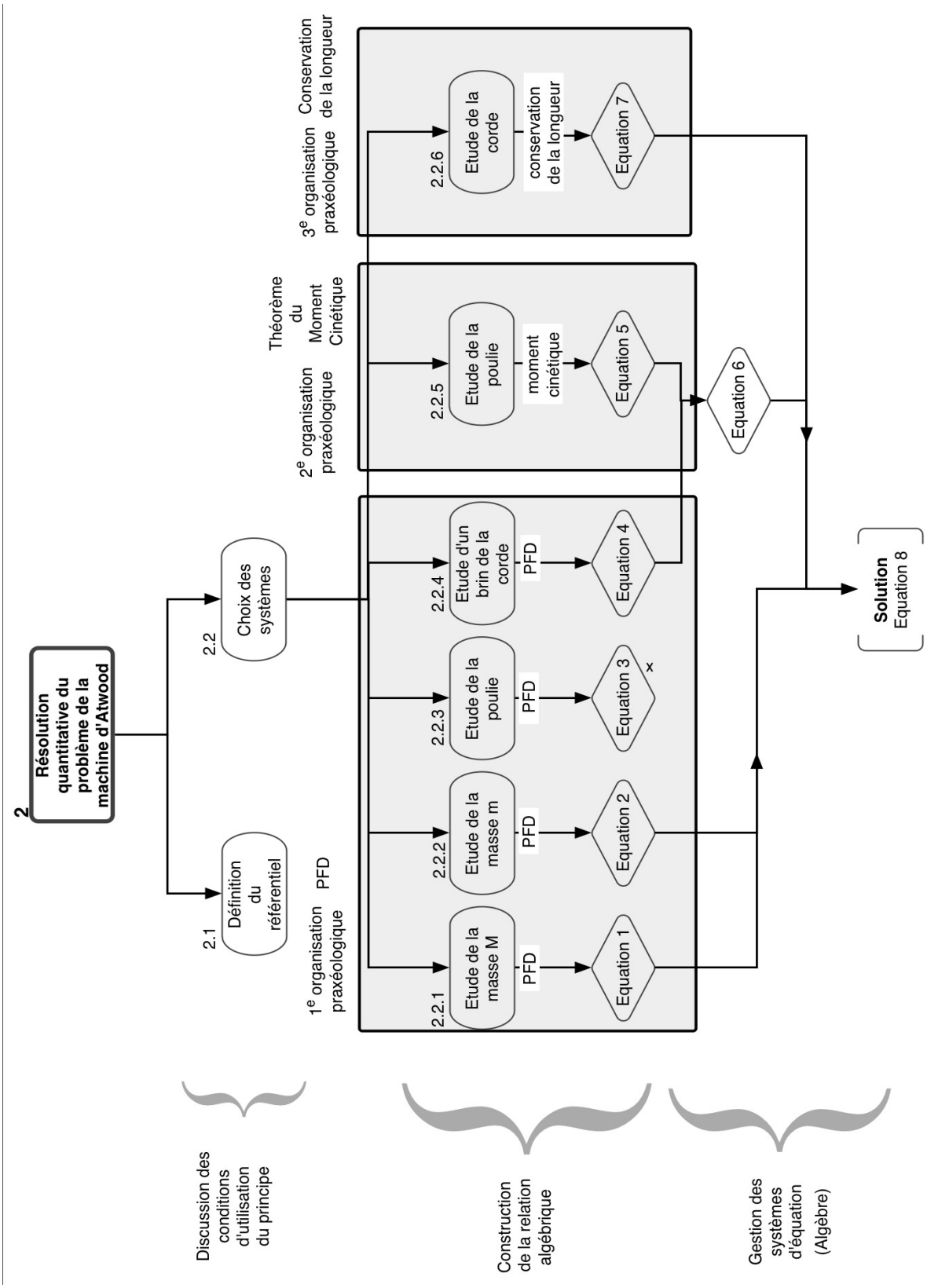


Figure 10: Résolution « quantitative » de l'Expert de Référence en termes des organisations praxéologiques

Par contre, la tâche du choix des systèmes est celle qui définit l'organisation de l'étape de la résolution quantitative (étape 2) : quels sont les systèmes physiques pour lesquels l'étude mécanique va permettre d'écrire des relations algébriques entre les paramètres physiques du problème qui vont permettre la résolution du problème ? Une fois les systèmes choisis, on va dérouler pour chaque système l'organisation praxéologique adéquate (parmi les trois définies ci-dessus). Chacune de ces sous tâches de l'étape aboutit à une ou plusieurs relations algébriques constituant un système d'équations dont la résolution conduit à la solution recherchée.

5.2.2.1 1e Organisation praxéologique dans l'étape 2: Utilisation du PFD

Tâche
Nous allons considérer le type de tâche dans lequel *l'Expert de Référence* utilise le PFD et décrire la technique permettant d'accomplir ce type de tâche à travers la résolution de *l'Expert de Référence*. Nous appellerons « utiliser le PFD » ce type de tâche où le PFD organise la technique (en fait cette dénomination correspond plutôt à la technique).

Technique
Ce type de tâche (utiliser le PFD) est accompli par l'expert à plusieurs reprises, ce qui nous permet de mieux cerner la technique associée.
Certaines sous-tâches sont accomplies globalement pour l'ensemble des tâches de ce type. L'expert discute d'abord les conditions d'utilisation du PFD : il définit le référentiel (paragraphe 2.1.1 en Annexe A) et choisit les systèmes à étudier (paragraphe 2.1.2 en Annexe A).
Ensuite en passant à l'étude de chacun des systèmes, il instancie le type de tâche « utiliser le PFD ». Il utilise le PFD pour 4 systèmes (les masses M et m, la poulie et le brin de la corde passant sur la poulie et les deux brins verticaux de corde). Lors de l'étude ces systèmes, il suit le même *algorithme*.
Pour chaque système, il écrit le vecteur d'accélération, il choisit un axe de repère et un système de coordonnées, il fait un bilan de forces extérieures appliquées au système, il écrit vectoriellement le PFD et il projette l'équation vectorielle. Ces tâches constituent la technique de l'utilisation du PFD (paragraphes 2.2.1 à 2.2.4 en Annexe A).

Nous récapitulons ces tâches dans le tableau 3. Dans les chapitres ultérieurs, nous nous appuierons sur ce tableau pour analyser les résolutions des enseignants et celles des étudiants.
Nous pouvons regrouper ces tâches en 3 groupes :

- 1e sous groupe : les tâches qui consistent à discuter les conditions d'utilisation des principes
- 2e sous groupe : les tâches liées à la construction de la relation algébrique reliant les paramètres accélération, force et masse (travail d'instanciation du principe physique dans la situation)
- 3e sous groupe : les tâches qui consistent en la résolution des systèmes d'équations.

Nous verrons que la catégorisation ci-dessus est valable également pour l'utilisation de l'autre loi de la mécanique (théorème du moment cinétique).

Technique de l'utilisation du PFD	Discussion des conditions d'application du principe	Tâche 1	Définir le référentiel galiléen
		Tâche 2	Définir le système à étudier
	Construction de la relation algébrique	Tâche 3	Ecrire l'accélération du système
		Tâche 4	Choisir un axe du repère et un système de coordonnées
		Tâche 5	Faire le bilan de forces
		Tâche 6	Ecrire vectoriellement le PFD pour le système étudié
		Tâche 7	Projeter l'équation vectorielle suivant les axes du repère
	Résolution de systèmes d'équations	Tâche 8	« Résoudre » les équations

Tableau 3: Technique associée au type de tâche « utiliser le PFD »

Technologie et théorie
Pour utiliser le principe fondamental de la dynamique, *L'Expert de Référence* doit respecter les contraintes du domaine de validité du PFD. Il sait que le principe fondamental de la dynamique est valable dans un référentiel galiléen. Dans ce référentiel, il doit définir un « système » que l'on peut assimiler à un « point matériel ».
La tâche 6 repose sur l'instanciation de la relation algébrique du PFD. Cette relation algébrique justifie les tâches 2,3 et 5 : ces tâches explicitent les différents éléments de l'expression algébrique. Pour le système défini (tâche 2), il doit identifier les forces extérieures exercées sur ce système (tâche 5), écrire l'accélération de ce système (tâche 3), écrire le PFD[30] pour ce système (tâche 6). A ce stade, on a une équation algébrique.

Un autre élément entre alors en jeu, l'algèbre. Pour résoudre l'équation vectorielle, il faut (très souvent) la projeter. Pour projeter un vecteur, il faut choisir des axes de repère, et donc un repère. Après avoir projeté les équations vectorielles, il faut éliminer les inconnues dont on n'a pas besoin et résoudre les équations contenant les inconnues intéressantes pour le problème posé. La justification de ces tâches relèvent des théories de l'algèbre que nous ne discuterons pas ici.

5.2.2.2 2e Organisation praxéologique dans l'étape 2 : Utilisation du théorème du moment cinétique

Tâche
La tâche de *l'Expert de Référence* pour l'étude du mouvement de la rotation de la poulie s'organise autour du type de tâche « utiliser le théorème du moment cinétique » (paragraphe 2.2.5 en Annexe A).

Technique
Ce type de tâche fait appel à une technique qui consiste à accomplir les sous tâches suivantes :

- définir le système

30 *L'Expert de Référence* s'assure que les masses sont constantes, ce qui l'autorise a exploiter une forme particulière du PFD.

- identifier les forces appliquées au système
- calculer le moment de chaque force
- calculer le moment cinétique du système
- écrire le théorème de moment cinétique
- « résoudre » les équations

Technologie et Théorie : Elle repose sur l'énoncé du théorème du moment cinétique en mécanique du solide.

Nous voyons que le type de procédure et sa justification sont très similaires à ceux employés pour l'utilisation du PFD. Le sujet qui nous intéresse relevant de la mécanique du point matériel, nous ne détaillerons pas plus loin la praxéologie de ce type de tâche lié à l'utilisation du théorème du moment cinétique. Ceci est également justifié par le fait qu'aucune des études ultérieures dans cette thèse ne fait appel à ce type de tâche.

5.2.2.3 3e Organisation praxéologique dans l'étape 2 : Etude de la conservation de la longueur de la corde

Tâche
La tâche de l'expert consiste à établir la conservation de la longueur de la corde et à traduire l'expression algébrique obtenue pour cette conservation en termes de grandeurs cinématiques caractérisant le mouvement chacune des deux masses suspendues à la corde.

Technique
Cette tâche fait appel à la technique constituée des sous-tâches ci-dessous :

- paramétrer la longueur de la corde
- écrire l'expression algébrique de la conservation de la longueur de la corde (et sa dérivée temporelle seconde)
- établir une équivalence entre les paramètres de longueur de la corde et les paramètres cinématiques (position, accélération) des masses M et m
- Utiliser les relations d'équivalence pour traduire l'expression algébrique de la conservation de la corde dans une relation entre les accélérations de M et m.

Technologie
La justification de cette technique repose sur un ensemble de faits (bruts et scientifiques) donnés explicitement pour certains dans l'énoncé du problème : la corde est tendue (fait 1) et inextensible (fait 2) et relie les deux masses M et m (fait 3). Les deux premiers faits assurent la conservation de la longueur de corde. Cette conservation avec le troisième fait implique que les grandeurs cinématiques (position, vitesse, accélération) des deux masses sont dépendantes donc qu'il existe une relation algébrique entre les accélérations des deux masses.

5.2.3 Organisation praxéologique de l' étape 3 (Contrôle des résultats)

Tâches et Techniques

Pour contrôler les résultats, *l'Expert de Référence* accomplit les types de tâches suivants :

- vérifier les signes des solutions
- vérifier l'homogénéité dimensionnelle des solutions
- faire un retour sur les résultats de l'analyse qualitative en examinant leur cohérence

avec la solution obtenue par la résolution quantitative : l'instanciation de la solution pour ces cas limites doit être cohérente avec les résultats qualitatifs

Technologie
Le premier type de tâche (contrôle des signes) repose sur la syntaxe de l'algèbre qui assure la cohérence interne des calculs.

La technologie du deuxième type de tâche (homogénéité dimensionnelle) c'est l'obligation d'homogénéité dimensionnelle de toute relation algébrique en physique : l'homogénéité assure la cohérence de tout le réseau des grandeurs physiques et des lois physiques qui relient algébriquement ces grandeurs.

La technologie du troisième type de tâche (retour sur l'analyse qualitative) a été traitée pour l'organisation praxéologique de l'étape 1 (analyse qualitative) : cette tâche de contrôle est une des raisons d'être de l'analyse qualitative des cas limites.

5.3 Conclusion pour l'analyse praxéologique

L'analyse praxéologique de Chevallard nous a permis de décrire ***globalement***[31] et ***à différentes échelles*** la résolution du problème de la machine d'Atwood qui va nous servir de référence. Ceci nous donne une description de la stratégie de *l'Expert de Référence* en termes d'organisations praxéologiques et défini son rapport au savoir de la résolution du problème de la machine d'Atwood *Rp(ExpRéf, RMA)*.

Elle permet aussi de mettre en évidence
- la complexité du travail à effectuer
- les algorithmes employés par *l'Expert de Référence* pour résoudre le problème.

Mais, elle ne permet pas d'analyser plus finement les tâches en particulier en ce qui concerne :
- la mise en évidence et l'analyse des relations entre les tâches d'une organisation praxéologique d'un niveau donné
- comment les différents pôles de la résolution, *tels que le réseau conceptuel, le réel, les registres de représentations sémiotiques*, interviennent précisément au niveau de la réalisation de chaque tâche.

Afin de faire une analyse plus fine des tâches élémentaires qui composent la technique de résolution, nous nous appuierons dans la suite sur la Modélisation par des Objets Typés (MOT) [29].

31 Nous disons « globalement » parce qu'on ne peut pas définir toutes les tâches spécifiques pour la résolution d'un problème.

6 3e analyse : Analyse détaillée de l'accomplissement des tâches à l'aide de l'outil de modélisation MOT (Modélisation par des Objets Typés)

6.1 Présentation théorique de l'outil de modélisation MOT

Nous appuierons sur les travaux de modélisation des connaissances de Paquette [29]. Nous ne ferons pas la présentation complète de ce cadre de modélisation. Nous présenterons quelques aspects importants qui nous servent à analyser les tâches accomplies par *l'Expert de Référence*.

Pour Paquette, chaque connaissance est modélisée par des objets de type : *concept, procédure, principe*. Le « ***concept*** » répond à la question « ***quoi ?*** », la procédure à la question « ***comment ?*** » et le principe à la question « ***pourquoi ?*** ».

Les concepts de « procédure » et de « principe » sont proches des concepts proposés dans la praxéologie de Chevallard [33], [34], [36], [28]. Chevallard présente la technologie comme une justification de la technique qui découle de la théorie et qui permet de répondre à la question « pourquoi ». Mais le « concept » n'a pas vraiment de correspondant dans la praxéologie.

MOT permet en outre de décrire des relations entre connaissances par des liens prédéfinis (6 au total), suivant les règles de liaison et suivant le type de connaissance (concept, procédure, principe). Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons plus particulièrement au lien « intrant /produit ». On utilise ce lien pour relier les concepts (les objets) et les procédures (les tâches). Il a pour signification : « un objet-intrant est nécessaire pour l'accomplissement d'une tâche qui produit d'autres objets (objet-produit). Ce lien nous permet de nous centrer sur deux questions lors de l'analyse des tâches :

- de quoi a-t-on besoin pour accomplir une tâche ?
- que va-t-on obtenir quand on accomplit une tâche ?

Ci-dessous, nous présentons l'usage de ces liens en nous appuyant plus particulièrement sur le tableau 3 qui montre les tâches à accomplir pour la résolution quantitative du problème de la machine d'Atwood.

6.2 Intrants et produits des tâches dans la technique d'utilisation du PFD

Une analyse en termes d'intrants et de produits des tâches dans la technique d'utilisation du PFD permet de se rendre compte que l'accomplissement de tâches nécessite

- la mobilisation de connaissances théoriques
- la prise en compte d'informations du réel déjà modélisées et explicitées dans l'énoncé du problème
- la réutilisation éventuelle du produit d'une tâche dans une autre tâche ultérieure (transformation d'un produit en intrant).

De plus

- elle permet de mettre en évidence certaines opérations sémiotiques effectuées dans

la tâche.

6.2.1 Mobilisation des connaissances théoriques

L'accomplissement d'une tâche mobilise des connaissances issues des théories de la mécanique (et de l'algèbre). Par exemple le type de tâche « utiliser le PFD » mobilise et organise des connaissances autour de l'usage du PFD. Dans le Tableau 4, nous précisons les principales notions théoriques en jeu pour chacune des sous tâches.

Ces connaissances théoriques s'organisent en un réseau conceptuel de la tâche qui réunit donc toutes les notions théoriques nécessaires à l'accomplissement de la tâche. Pour *l'Expert de Référence*, ce réseau conceptuel est supposé construit correctement.

Tâches	**Notions en jeu**
1. Définir le référentiel galiléen	Référentiel, référentiel galiléen , …
2. Définir le système à étudier	Système…
3. Ecrire l'accélération du système	Accélération, repère et système de coordonnées, système, …
4. Choisir un axe du repère et un système de coordonnées	Repère et système de coordonnées, …
5. Faire le bilan de forces	Forces diverses et paramètres de ces forces, repère, système, …
6. Ecrire vectoriellement le PFD pour le système étudié	PFD, forces, accélération, masse, système,…
7. Projeter l'équation vectorielle suivant les axes du repère	Technique de projection, équation vectorielle du PFD, repère, …

Tableau 4: Notions principales en jeu pour chacune des sous tâches de « utiliser le PFD

6.2.2 Prise en compte des faits de l'énoncé

L'accomplissement d'une tâche peut faire appel à des faits de la situation physique donnés par l'énoncé ou implicite. Par exemple, le fait « la corde est inextensible» est un intrant dans la tâche conservation de la longueur de la corde. L'énoncé sous-entend que la situation physique se déroule à la surface de la terre. Ce fait est un intrant, en général implicite, de la tâche de définition du référentiel qui a pour produit « référentiel terrestre considéré galiléen » dans la résolution de l'expert.
L'énoncé ne fournit que des intrants ou des contraintes sur l'exécution des tâches (par exemple « on néglige tous les frottements »).

6.2.3 Réutilisation d'un produit d'une tâche comme intrant d'une autre tâche

Dans le tableau 4, la tâche 2 « définir le système » a pour produit le système à étudier (par exemple la masse M). On voit sur ce même tableau que le système à étudier est intrant de plusieurs autres tâches : par exemple « écrire l'accélération du système », « faire le bilan de forces », « écrire vectoriellement le PFD pour le système étudié » dépendent de cet intrant. Comme autre exemple, la tâche « projeter l'équation vectorielle » dépend des produits de la tâche « choisir les axes du repère ».
Ces cas de passage du statut de produit d'une tâche au statut d'intrant d'une autre tâche impose une relation de précédence entre les deux tâches : la définition du système doit précéder l'écriture de l'accélération par exemple. Dans MOT, Paquette explicite ces relations de précédence entre les tâches.
Nous verrons par la suite que ces deux exemples de passage de produit à intrant pour le système et pour le choix des axes constituent des difficultés récurrentes dans les résolutions des étudiants.

6.2.4 Côté registres sémiotiques

L'accomplissement d'une tâche peut avoir des intrants et des produits dans les différents registres sémiotiques ou bien dans un même registre sémiotique. Si les intrants et les produits d'une tâche sont dans le même registre sémiotique, on peut considérer cette tâche comme une tâche de « production » au sens de Duval [14]. Si les intrants et les produits d'une tâches sont dans des registres sémiotiques différents, on peut considérer cette tâche comme une tâche de « traduction » au sens de Duval.

Afin d'illustrer les aspects évoqués dans les paragraphes ci-dessus (6.2.1, 6.2.2, 6.2.3, 6.2.4), nous analyserons les deux exemples suivants :

- l'accomplissement de la tâche 2.5 « faire le bilan de forces » qui est accomplie plusieurs fois par *l'Expert de Référence* lors qu'il s'agit d'étudier un système par le PFD
- l'établissement de la relation entre les forces de tension $\vec{T}_M$ et $\vec{T}_m$.

6.3 Exemples d'analyse de l'accomplissement de tâches

6.3.1 Tâche 5 « faire le bilan de force »

Prenons l'exemple du type de tâche « faire le bilan de forces » dans la résolution de *l'Expert de Référence.*

Nous avons pour objectif de répondre aux questions ci-dessous (Figure 11):

- de quoi a besoin *l'Expert de Référence* pour accomplir cette tâche (quels sont les intrants) ?
- quels sont les produits ?
- quelles peuvent être les difficultés lors de l'accomplissement de cette tâche?

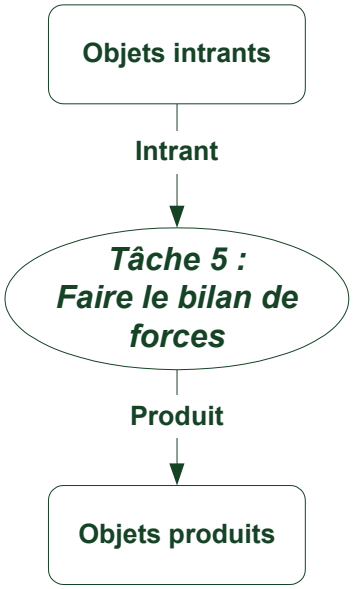


Figure 11: Analyse à effectuer (MOT) pour rendre compte de l'accomplissement de la tâche 5 « faire le bilan de forces »

Intrants :

- le système. Il est le produit de la tâche de définition du système
- la partie de réseau conceptuel concernant les forces (Figure 12). Faire un bilan de forces, c'est-à-dire sélectionner les forces présentes et définir leurs caractéristiques dans la situation donnée, suppose la connaissance de toutes les forces possibles (conditions d'« existence » et caractéristiques physiques générales). Nous verrons que ces connaissances sont rassemblées dans le cours (polycopié) en ce qui concerne la population d'étudiants observée dans cette thèse (Chapitre 6, 7).
- les faits de l'énoncé relatifs aux forces. Ceci suppose une sélection de ces faits donnés dans l'énoncé (explicites) ou suggérés (implicites), concernant les forces à proprement parler et leurs caractéristiques physiques. Ces faits sont exprimés dans le registre de la langue naturelle et dans le registre du schéma (cf Tableau 5). Par exemple, « négliger les frottements » est une contrainte explicite de l'énoncé en langue naturelle ; « les masses sont verticalement suspendues à la corde » est un fait explicite sous forme schématique qui a un rôle à jouer dans la présence et l'orientation des forces de tension ; « l'expérience se passe sur terre » est un fait implicite de l'énoncé qui a un rôle dans la sélection des forces gravitationnelles.

Produits :

- Toutes les forces extérieures exercées sur le système à retenir. Elles sont identifiées explicitement dans la langue naturelle. Leurs caractéristiques physiques sont paramétrées et exprimées dans les registres algébrique et schématique.

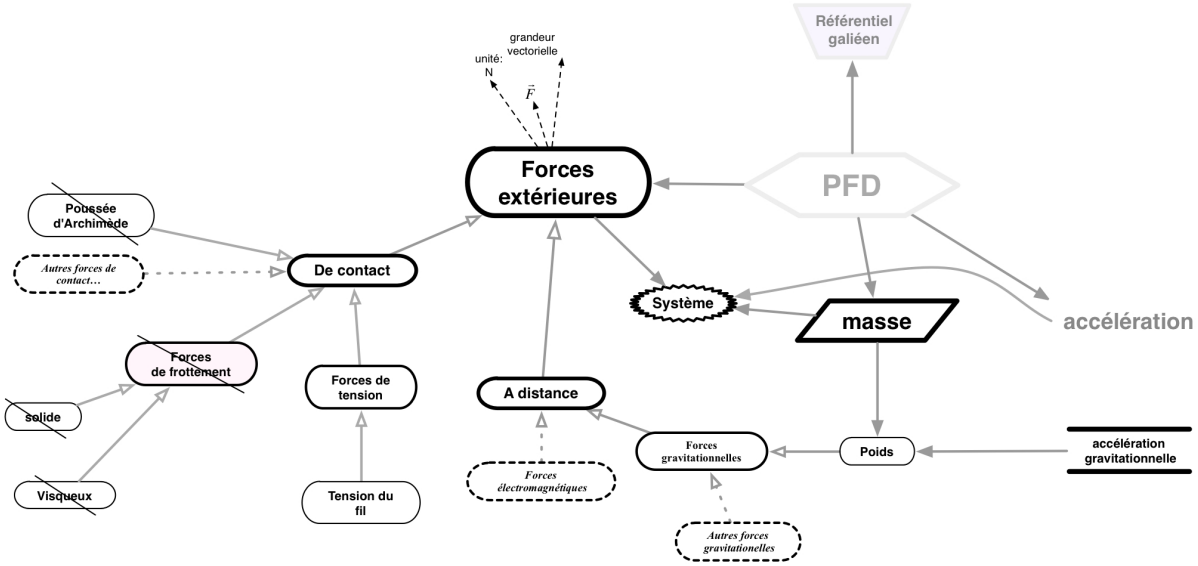


Figure 12: Réseau conceptuel nécessaire pour accomplir la tâche 5 « faire le bilan de forces » pour l'Expert de Référence. L'Expert de Référence possède une base de connaissance adéquate, complète, organisée et fortement hiérarchisée (cf paragraphe 2 Chapitre 1)

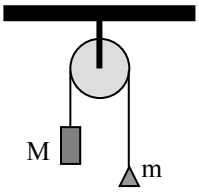
Dessin du dispositif	Faits tirés du dessin
	***Les deux masses sont reliées*** par une corde
	La corde est tendue
	La corde passe sur une poulie
	Les deux extrémités de la corde sont ***verticales***.
	Les masses sont « ***verticalement*** » suspendues aux extrémités de la corde.
	L'air est supposé ne pas agir sur les objets.
	L'expérience se déroule sur la ***Terre***.

Tableau 5: Les faits que l'on peut extraire du dessin du dispositif donné dans l'énoncé, et qui jouent un rôle pour l'accomplissement d'une tâche de bilan de forces.

Ainsi, la tâche 5 « faire le bilan de forces » est une tâche complexe : non seulement elle nécessite de faire référence au réseau conceptuel et d'effectuer une sélection des informations pertinentes pour cette tâche (intrants), mais aussi elle impose sur le plan sémiotique, le décodage et la formulation de certaines informations, la traduction d'informations d'un registre sémiotique à un autre.

Nous avons identifié les intrants de la tâche, son fonctionnement et ses produits. Ceci permet d'envisager certaines des difficultés qui pourraient surgir dans l'accomplissement de cette tâche. Il s'agit en fait plutôt des terrains sur lesquels se situent ces difficultés, plutôt que ces difficultés elles-mêmes:

- des difficultés provenant du réseau conceptuel : le réseau conceptuel de la personne qui résout le problème peut être incomplet, erroné, manquer d'organisation.

- des difficultés lors de la sélection des informations pertinentes pour la tâche : par exemple, on doit coordonner les faits de l'énoncé avec le réseau conceptuel pour sélectionner les forces adéquates
- des difficultés sur les opérations sémiotiques.

6.3.2 Analyse de l'établissement de la relation entre les forces de tension dans la résolution de l'Expert de Référence

Nous nous référons à la résolution quantitative de *l'Expert de Référence* (étape 2) et nous nous intéressons à l'établissement de la relation entre les deux forces de tension, $\vec{T}_M$ et $\vec{T}_m$.

L'Expert de Référence établit des relations qui font intervenir les forces de tensions dans plusieurs sous tâches de l'étape de résolution quantitative. Ces deux tâches appartiennent à deux organisations praxéologiques différentes :

- une organisation praxéologique « utiliser le PFD » lors de l'étude du système « brin de corde » (paragraphe 2.2.4 Annexe A)
- une organisation praxéologique « utiliser le théorème du moment cinétique » lors de l'étude du mouvement de la rotation de la poulie.

Dans ces deux tâches, *l'Expert de Référence* a mobilisé des réseaux conceptuels différents et s'est référé à des faits différents. La figure 13 montre que ces deux tâches produisent chacune une relation entre les forces de tension : la première étude a pour produit une relation d'égalité entre les modules des forces de tension exercées sur un brin de la corde et la deuxième étude a pour produit une relation d'égalité des forces de tension exercées sur la corde de part et d'autre de la poulie.

La figure 13 montre une tâche qui est restée implicite dans notre discours jusqu'ici qui met en commun les deux relations obtenues (intrants) et produit une nouvelle relation entre les forces de tension exercées par les extrémités de la corde. En fait l'expert passe directement de la force de tension exercée sur l'extrémité de la corde à la force de tension exercée par l'extrémité de la corde sur une masse M ou m. Ceci correspond à une tâche implicite qui repose sur la troisième loi de Newton. Nous voyons qu'en réalité l'établissement de cette nouvelle relation ne repose pas que sur les règles de l'algèbre mais dépend également d'un raisonnement physique.

Nous verrons par la suite que la pratique de raccourcis de ce type est fréquent dans la résolution de ce problème. En particulier, les résolutions actuelles étudiées établissent toutes l'égalité des deux tensions $\vec{T}_M$ et $\vec{T}_m$ de manière implicite, voire problématique quand elles ne font référence à qu'à une partie, voire à aucun, des intrants en jeu.

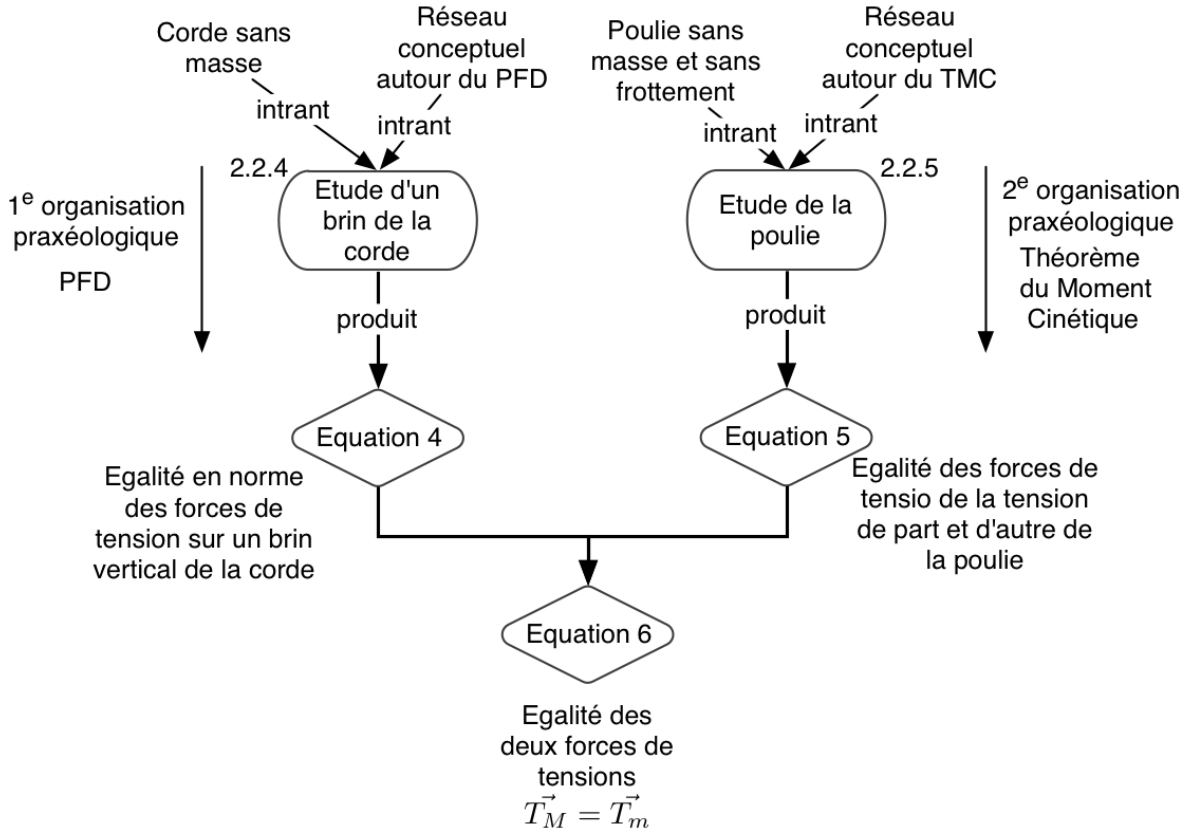


Figure 13: Etablissement de la relation entre les forces de tension par l'Expert de Référence

6.4 Conclusion pour la modélisation MOT

Notre exploitation (limitée) de l'outil de modélisation MOT nous a permis d'analyser plus finement l'accomplissement de chacune des tâches identifiées par l'analyse praxéologique. Cette analyse en terme de leurs intrants et produits nous permet de mieux mettre en évidence les connaissances et informations en jeu dans l'accomplissement d'une tâche, de préciser leur nature et leur provenance. Cela permet également de faire ressortir certaines opérations sémiotiques de la tâche, les relations de précédence entre les tâches, l'existence d'implicites (tâches, intrants, …).

7 Conclusion

7.1 Outils pour décrire un rapport au savoir dans la résolution d'un problème de mécanique

Nous avons mis en place des outils pour décrire le rapport au savoir « résolution du problème de la machine d'Atwood » d'une personne. Ces outils sont :

- la stratégie de résolution : le cheminement stratégique adopté par la personne pour résoudre le problème
- l'intention scientifique qui guide la stratégie (un enseignant aura également une intention pédagogique)

- l'organisation praxéologique (Théorie anthropologique, Chevallard [33]) qui permet de décrire le détail des étapes de la stratégie de résolution en termes de tâches, de techniques, de technologie/théorie. Ceci permet de définir les tâches de la résolution, de les organiser et de les justifier.
- Les intrants et les produits des tâches (MOT, Paquette [29]) permettent de mettre en évidence différents éléments mis en jeu dans une tâche : le réseau conceptuel , les faits (en tant que références à la situation réelle évoquée par le problème), les opérations sémiotiques, les relations de précédence avec d'autres tâches.

7.2 Résolution de *l'Expert de Référence*

Nous avons établi la résolution du problème de la machine d'Atwood par un expert actuel, virtuel, composite pour nous servir de référence dans les études ultérieures sur la résolution de ce problème par des individus réels (enseignants, étudiants). La description ci-dessous définit à la fois les caractéristiques de *l'Expert de Référence* et de sa résolution.

L'expert de Référence met en place pour la résolution du problème de la machine d'Atwood, une ***stratégie*** cohérente qui apparaît avec une forte complexité. Elle est conduite par son ***intention scientifique:*** *« démontrer l'expression de l'accélération des deux masses en s'appuyant sur des « principes »* (les principes de la mécanique, principe fondamental de la dynamique (PFD) et théorème du moment cinétique, mais aussi la conservation de longueur de la corde)**.** La cohérence de cette stratégie réside sur le cadre théorique de la mécanique et de l'algèbre, la maîtrise des opérations sémiotiques, divers contrôles des solutions (contrôles algébriques et dimensionnels, contrôles avec des connaissances antérieures de cas particuliers de la situation physique).

Cette stratégie se compose de trois étapes de nature différente : une étude qualitative au début de résolution, puis une étude quantitative et ensuite une étape de contrôle des résultats.

Pour l'étape de la résolution quantitative, *l'Expert de Référence* se place dans le cadre théorique de la mécanique du point matériel. Mais il ne se limite pas à la mécanique du point. Il s'appuie également sur la mécanique du solide. Il accomplit autant que possible de manière explicite toutes les tâches. Il démontre autant que possible toutes les relations (entre les forces de tension et entre les accélérations) dont il a besoin pour résoudre les équations. Cela rend sa résolution détaillée mais objective et cohérente. L'accomplissement de chacune de ces tâches se fait par la mise en place de ***techniques*** qui, à leur tour, se décomposent en sous-tâches. Il en résulte ainsi une multiplicité et diversité de tâches organisées entre elles et une complexité de la procédure de résolution, c'est à dire une complexité de la stratégie de *l'Expert de Référence*.
Dans cette étape de résolution quantitative, nous recensons plusieurs types de tâche décrits sous forme d'organisations praxéologiques, chaque organisation étant dirigée par un principe organisateur qui est la plupart du temps un principe de la mécanique (PFD, théorème du moment cinétique).

7.3 Exploitation ultérieure de la grille d'analyse

Dans la suite de notre travail, nous allons analyser d'autres résolution du problème de la machine d'Atwood à l'aide de la grille d'analyse établie dans ce chapitre. Nous nous

intéresserons à la résolution d'enseignants et d'étudiants. Nous regarderons l'évolution des résolutions des enseignants depuis 1784. Nous passerons ensuite aux résolutions par les enseignants actuels, puis à celles des étudiants actuels.

Dans le cas des enseignants, la nécessité de la transposition didactique est manifeste car l'enseignant ne peut pas mettre en place la même stratégie que *l'Expert de Référence*. Un enseignant est soumis à diverses contraintes dues au contexte didactique : la contrainte du temps didactique, du niveau du public, de la motivation des étudiants, …. Ceci va alourdir la gestion de la résolution du problème et de sa cohérence et influencer la stratégie de résolution adoptée par l'enseignant. Son intention sera différente et reposera à la fois sur des arguments scientifiques et pédagogiques.

Dans le chapitre suivant, nous allons examiner l'évolution du rapport institutionnel des enseignants à la résolution du problème de la machine d'Atwood depuis son origine en 1782. Notre objectif est de mettre en évidence le fait que le problème de la machine d'Atwood et sa résolution ont profondément changé. Les éléments de notre grille d'analyse vont nous permettre de mettre en évidence la nature de ces changements.

Chapitre III

Evolution du rapport institutionnel des enseignants à l'objet de savoir « résolution du problème de la machine d'Atwood »

Chapitre III Evolution du rapport institutionnel des enseignants à l'objet de savoir « résolution du problème de la machine d'Atwood » depuis 1782

Dans de nombreuses études didactiques, nous avons vu que les résolutions des étudiants novices sont évaluées et/ou analysées par comparaison avec celle d'un « expert », un scientifique « générique[32] » (Chapitre 1). Les chercheurs en didactique proposent également des stratégies de résolution à proposer aux étudiants, qui se réfèrent à cette résolution d'un « expert ». Dans le chapitre précédent (Chapitre 2), nous avons proposé et étudié une résolution du problème de la machine d'Atwood que nous avons désignée par « la résolution de *l'Expert de Référence », l'Expert de Référence* étant un personnage virtuel, actuel, composite dont nous avons défini le mode de fonctionnement. L'objectif est de disposer d'une référence sur laquelle nous avons construit notre grille d'analyse didactique (Chapitre 2), et qui va nous servir maintenant à analyser et à confronter les résolutions de personnes réelles : des enseignants et des étudiants. Nous commençons ici par l'analyse de la résolution du problème de la machine d'Atwood par deux enseignants du XVIIIe et XIXe siècles afin de pouvoir retracer l'évolution du rapport institutionnel des enseignants à ce savoir.

Pour mener l'étude de l'évolution du rapport institutionnel des enseignants au cours des 200 dernières années, nous avons étudié comment l'étude du dispositif de la machine d'Atwood, ainsi que la résolution de problèmes sur ce dispositif, ont été présentées de sa création jusqu'à aujourd'hui dans 8 ouvrages publiés entre 1784 et 1953, [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48][33]. Nous avons choisi de ne présenter ici que les études de 2 de ces 8 ouvrages, qui donnent une image représentative de cette évolution historique.

1 Méthodologie d'analyse

Nous étudierons dans le détail le manuel de 1784 paru juste après la création du dispositif [41] et le manuel de 1880 paru environ un siècle après sa découverte [46]. Tous les ouvrages étudiés entre 1840 et 1890 (sauf celui de 1880) restent proches du premier manuel et donc du problème original posé par Atwood. Un changement décisif apparaît dans le manuel de 1880 qui annonce l'époque moderne.

D'après l'étude menée dans le chapitre précédent, nous allons caractériser les rapports institutionnels des deux enseignants (enseignant en 1784 et enseignant en 1880) à partir des éléments de la grille d'analyse :

- Quels sont les intentions des enseignants à travers l'étude de ce dispositif ? Quelles stratégies sont mises en œuvre par les enseignants ?
- Quelle(s) sont les organisations praxéologiques mises en oeuvres ?

32 Nous utilisons ce terme dans le sens où cet expert est fictif et est supposé réunir les qualités représentatives d'une communauté scientifique.

33 Tous les manuels sont retrouvés sur le site de la BNF (www.bnf.fr) et sont disponibles sous forme de document électronique numérisé.

- Quelles tâches accomplissent les enseignants ? Quelle(s) technique(s) mettent en œuvre les enseignants pour accomplir la tâche (ou les tâches) ? Sur quelle théorie s'appuient-ils ?
- Quel est le réseau conceptuel mobilisé lors de l'accomplissement de tâches ?
- Quel usage font-il des différents registres sémiotiques ?

Nous examinerons également les points suivants qui prennent toute leur importance avec ces ouvrages. Ici, nous allons devoir aborder la question d'une approche expérimentale. D'autre part, l'évolution historique de ce problème met en lumière les paradigmes actuels et passés.

- Quel est le rapport des enseignants au réel ?
- Quels sont les paradigmes qui déterminent les actions des enseignants[34] ?

Ces questions abordées successivement donnent le plan du chapitre : la comparaison des rapports institutionnels nous permettra de pointer l'évolution éventuelle (ou non) des rapports des enseignants au cours du temps.

2 «Enseignant» au moment de la création du dispositif de la machine d'Atwood

Le dispositif conçu par G. Atwood en 1782, va occuper une place importante dans la physique expérimentale : il rencontre un véritable succès pendant les siècles qui suivent sa création[35].

Nous nous référons pour cette première étude au manuel paru en 1784 [41], juste après la création du dispositif de la machine d'Atwood. Ce manuel « Description et usage d'un cabinet de physique expérimentale » destiné à accompagner un cours de physique et à faire connaître les richesses de la physique expérimentale aux amateurs éclairés.

2.1 Intentions de l'enseignant

Le dispositif est présenté dans ce manuel dans la partie concernant les « Appareils propres à démontrer les lois du mouvement accéléré et du mouvement retardé ». L'enseignant précise explicitement qu'il veut étudier expérimentalement à l'aide de ce dispositif les lois suivantes :

- « *Un corps soumis pendant plusieurs instants à l'action de la pesanteur et qui se meut librement et perpendiculairement à l'horizon accélère son mouvement selon la progression des nombres impairs, 1, 3, 5, 7, 9,…*» Et inversement, *« Un corps lancé de bas en haut avec une force donnée parcourt des espaces qui vont en décroissant selon la progression des nombres 9, 7, 5, 3, 1. »*
- « *La somme des espaces parcourus après une suite donnée d'instants est comme le carré de ces instants.* »[36]

34 Pour le terme « paradigme », nous nous appuyons sur la définition citée par Rumelhard [49] : *« une conception dominante ayant cours à une certaine époque dans une communauté scientifique donnée, qui fond les types d'explication envisageable, et les types de faits à découvrir dans une science donnée (Trésor de la langue française, 1986) »*

35 Dans le manuel qui date de 1857 [44], on retrouve l'introduction suivante pour la machine d'Atwood : « *En 1782, un docteur anglais, Atwood, professeur à l'université de Cambridge, fit connaître une machine très ingénieuse, à l'aide de laquelle on peut étudier la chute des corps plus complètement et plus commodément qu'avec le plan incliné de Galilée. »*

36 On retrouve dans le manuel qui date de 1865 [45] la formulation suivante des lois de Galilée :

- 1e loi : la vitesse de la chute d'un corps est indépendante de sa masse

L'enseignant ne se place pas dans une démarche prédictive. Au contraire, il souhaite que les lois du mouvement soient « *rendues sensibles dans les expériences* » que soit visualisé et mesuré l'accroissement régulier de la vitesse des deux masses [41].

L'intention de l'enseignant en 1784 est multiple. Il souhaite vérifier expérimentalement les lois de Galilée. Pour rendre accessible aux lecteurs cette étude expérimentale, il expose en détail les procédés d'expérience et d'observation qui permettent de vérifier ces lois.

2.2 Stratégie de l'enseignant de 1784

Les intentions de l'enseignant détermine la stratégie que l'on peut décomposer en quatre étapes (figure 14) :

- Etape 1 : l'enseignant présente la construction du dispositif expérimental, une machine d'Atwood.
- Etape 2 : il modélise le dispositif expérimental : il discute toutes les conditions expérimentales qui constituent les faits et le domaine de validité du modèle du dispositif de l'énoncé actuel.
- Etape 3 : il étudie le mouvement dans le dispositif expérimental conçu et modélisé à partir d'une loi empirique : il calcule le rapport de l'accélération des masses à celui de la pesanteur.
- Etape 4 : il élabore puis exécute des expériences avec le dispositif qui permettent de confronter les résultats expérimentaux avec les résultats prédits par les lois de Galilée.

C'est la stratégie de l'enseignant en 1784, qui est représentée sur la figure 14.

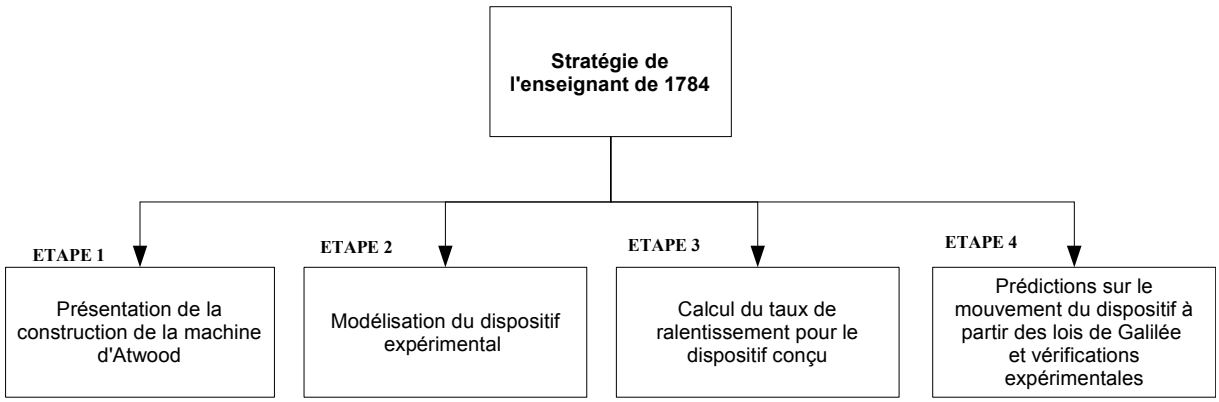


Figure 14: Stratégie de l'enseignant de 1784

L'intention de l'enseignant et sa stratégie détermine les étapes et les tâches à effectuer. Dans le paragraphe suivant, nous étudierons celles présentées par l'enseignant de 1784.

- 2e loi : la vitesse de la chute d'un corps ne dépend pas de sa nature
- 3e loi : la vitesse acquise par un corps qui tombe librement en partant de l'état de repos est proportionnelle au temps

2.3 Organisations praxéologiques

Ci-dessous, nous détaillerons les tâches qui constituent chacune des étapes de la stratégie adoptée.

2.3.1 Etape 1 : Reproduire le dispositif expérimental permettant de ralentir le mouvement de masses dans le champ du pesanteur

L'étude du mouvement de la chute n'est pas nouvelle. Il a déjà étudié par Galilée 150 ans auparavant. Nous avons déjà précisé que le dispositif d'Atwood est considéré comme un procédé alternatif plus fiable que le plan incliné utilisé par Galilée. L'enseignant se préoccupe d'abord de la construction du dispositif : c'est pourquoi nous appelons la tâche de la première étape «construire le dispositif expérimental ».

Cette étape est présentée en détail par l'enseignant à l'aide d'une figure et d'un texte (Figure 15). Il ne s'agit pas d'une figure abstraite, comme on peut le voir de nos jours dans les énoncés de problème de physique. Le dessin est très proche du réel, un peu comme une photo. Tous les composants du dispositif sont représentés : la « poulie » (qui se compose de cinq rouleaux), la règle graduée (permettant de prendre les mesures du déplacement de l'une des masses), l'horloge (pour mesurer le temps), le support (permettant de maintenir le dispositif verticalement), …

Tous les détails de ce dispositif sont décrits en mettant en avant :

- les dimensions, la qualité, les matières des pièces utilisées dans le dispositif ,
- les détails de la technique de montage des pièces[37].

Par exemple, la poulie dans le dispositif de la machine d'Atwood se compose de 5 rouleaux de cuivre dont quatre de même diamètre et un de diamètre plus grand que les autres. De nombreux autres détails sont présentés, décrivant l'orientation relative des rouleaux, le procédé de montage pour réduire le frottement.[38]

L'enseignant ne décrit pas la corde comme sans masse et inextensible mais comme « *un fil de soie très léger et assez fort* » [41] [39].

Cette étape est constituée de nombreuses tâches qui permettent de réaliser chacune des pièces du dispositif : la poulie, le bâti, les charges, le dispositif de mesure des distances et des temps de chute. Leur exécution est conditionnée par un savoir-faire non décrit dans le document ; la technique de ces sous-tâches reste donc implicite.

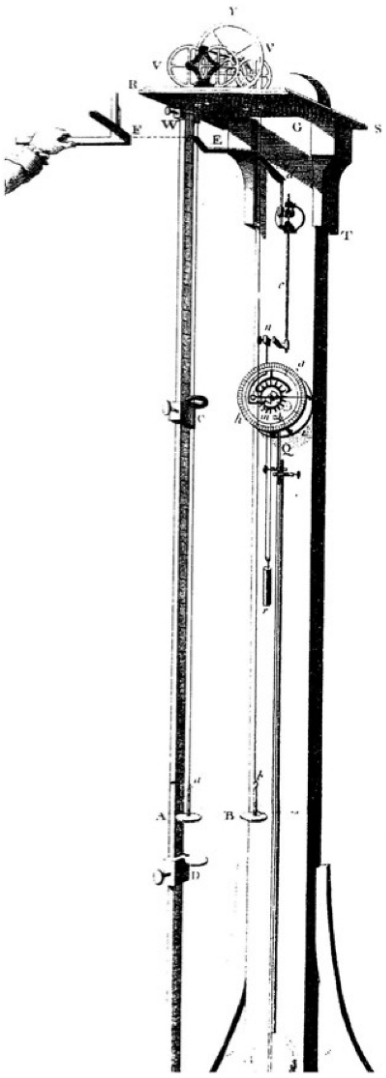
La technologie de cette étape (et de ses sous-tâches) n'est pas explicite ici mais elle apparaît dans les autres étapes parce qu'elle est portée par l'intention de l'enseignant, la vérification expérimentale des lois de Galilée sur la chute libre des corps. Tout d'abord, le dispositif

37 Voir figure 1, 2 et 3 en Annexe B1.

38 *« Ces rouleaux sont établis verticalement et se meuvent dans cette direction sur leurs axes. Les plus petits, pris deux à deux, sont de droite et de gauche et parallèlement entre eux, de manière que la circonférence de l'un passe très près du centre de l'autre et réciproquement. Quand au grand rouleau, les deux pivots de son axe ont pour point d'appui ceux d'intersection des petits rouleaux, et par conséquent il n'éprouve que très peu de frottement lors qu'il se meut, les plus petits rouleaux se mouvant alors également sur leurs pivots. » (cf Annexe B1 -figure 2)*

39 L'extrait original est présenté à l'annexe B1 (figure 3)

construit permet de réaliser les mesures désirées. L'étape 2 de modélisation du dispositif sert à établir les conditions expérimentales (réalisées dans l'étape 1) qui autorisent un modèle simplifié du dispositif : l'usage d'un fil de soie, de la « poulie » à 5 rouleaux, …, permet d'établir toutes ces conditions simplificatrices que l'on retrouve dans l'énoncé actuel du problème (à une exception près)[40]. Ce modèle simple permet la confrontation des résultats expérimentaux avec ceux prédits par les lois de Galilée, qui ne permettent pas de prendre en compte un réel complexe (influence des frottements, masse de la corde, ...). Les outils théoriques et les modèles qui permettent aujourd'hui de rendre compte d'un réel complexe[41] n'existent pas à l'époque ou sont en cours d'élaboration. Cet état de fait oblige le scientifique de 1784 à une référence permanente au réel et donc à la dimension expérimentale.



"…quatre rouleaux en cuivre de même diamètre. Ces rouleaux sont établis verticalement et se meuvent dans cette direction… Les plus petits, pris deux à deux, sont de droite et de gauche et parallèlement entre eux, de manière que la circonférence de l'un passe très près du centre de l'autre et réciproquement. Quand au grand rouleau Y, les deux pivots de son axe ont pour points d'appui ceux d'intersection des petits rouleaux et par conséquent il n'éprouve que très peu de frottement lorsqu'il se meut…(Annexe B, paragraphe I.2)"

"La machine est une colonne en bois rougie d'environ 6 pieds de hauteur, 4 pouces et demi de largeur et 1 pouce 9 lignes d'épaisseur. Cette pièce est faite de deux morceaux joints à queue d'aronde et assujettis par des vis noyées dans l'épaisseur du bois, ce qui donne plus de facilité pour la transporter." (Annexe B, paragraphe I.1)"

"Ce grand rouleau a une rainure ou gorge dans toute sa périphérie sur laquelle passe une soie très fine mais assez forte pour soutenir deux cercles de cuivre A, B, … (Annexe B, paragraphe I.3)"

Figure 15: Représentation du dispositif de la machine d'Atwood dans le manuel de 1784

40 L'auteur n'a pas réussi à s'affranchir avec ce dispositif de l'influence de l'inertie de la poulie.

41 Modélisation théorique par opposition à la modélisation du dispositif expérimental présenté dans cet ouvrage.

2.3.2 Etape 2 : Modélisation du dispositif expérimental

Les[42] informations relatives à cette deuxième étape sont dispersées dans le document. Après avoir précisé le taux de ralentissement du mouvement des masses, l'enseignant recherche tous les facteurs qui ont une influence sur ce ralentissement (tâche de l'étape 2) et montre expérimentalement comment ce dispositif permet de s'affranchir de la plupart des facteurs qui sont pas pris en compte dans les lois de Galilée :

- Il étudie l'effet de la masse du fil de soie (qui est de 0,19 grammes) et démontre qu'on ne peut pas percevoir l'effet de cette masse sur le mouvement (paragraphe II.3 en Annexe B1).
- Il précise la hauteur maximale utilisée dans les expériences, qui est de 66 cm (26 pouces). Au delà de cette hauteur, les résultats prévus ne sont pas conformes aux résultats expérimentaux[43] (voir annexe B1, figure 4).
- Il démontre que le frottement entre l'air et les masses ne produit pas d'effet sensible sur le mouvement des masses (paragraphe II.1 en Annexe B1).
- Il étudie le frottement entre le fil de soie et la poulie et démontre que le frottement n'a pas d'effet sensible sur le mouvement des masses (paragraphe II.2 en Annexe B1)

Par contre, l'effet de l'inertie de la poulie et des frottements dans les rouages ne sont pas négligeables avec ce dispositif et ils sont pris en compte de manière empirique dans l'étape 3.
Lorsqu'il étudie le mouvement des masses (étape 3), l'enseignant prend en compte les facteurs suivants :

- la masse des charges située aux extrémités du fil de soie
- l'inertie engendrée par la présence de poulies
- les forces de frottement liées à la rotation des poulies.

(Il utilise pour estimer l'influence de ces deux derniers points un résultat obtenu par Atwood, mais il ne donne aucune explication sur la manière dont il a été obtenu.)

2.3.3 Etape 3 : Calcul du taux de ralentissement du mouvement

Tâche
Après la construction du dispositif, l'enseignant étudie le mouvement des charges et leur accélération qu'il appelle « taux de ralentissement du mouvement » qui correspond au rapport de l'accélération des masses et l'accélération gravitationnelle.

Nous nous proposons d'étudier l'extrait ci-dessous afin de montrer le raisonnement effectué pour le calcul du rapport de l'accélération des masses par rapport à l'accélération gravitationnelle - tâche de l'étape 3 (Figure 16).

Technique
En premier (tâche 1), il s'intéresse à une situation d'équilibre : à l'extrémité du fil, il y a deux charges (A et B) de masse égale (*27,5 m*) constituée de deux parties : le bassin et les charges

42 *L'Expert de Référence* n'a jamais discuté comment et pourquoi les frottements sont négligés dans ce dispositif. Il néglige les forces de frottement par rapport aux forces en jeu pour établir les relations algébriques de la résolution. Les données de l'énoncé ne sont pas suffisantes pour permettre de déterminer ces forces. En conséquence , négliger la résistance de l'air et la force de frottement au niveau de l'axe de la poulie dans le dispositif de la machine d'Atwood est indispensable pour pouvoir résoudre le problème.

43 L'auteur évoque surtout les effets de frottement.

additionnelles. Le dispositif est en équilibre.

Ensuite (tâche 2), il y a rupture d'équilibre sous l'action d'une nouvelle masse additionnelle (*1m*) placée dans le bassin A. Le bassin A descend tandis que le bassin B monte. Ce qui met en mouvement l'ensemble des charges et des poulies. Le mouvement des masses est ralenti par rapport à leur chute libre. Le taux de ralentissement du mouvement est estimé sous la forme d'une relation entre divers « termes d'inertie » du dispositif sans que soit expliquée l'origine de cette relation. Nous allons désigner le taux de ralentissement par α et le traduire sous une forme algébrique en terme de masse (ou de « masse équivalente » en ce qui concerne le terme d'inertie de la poulie)[44] : $\alpha = \frac{m_{surcharge}}{m_{total}}$. Il est évalué en fonction de l'inertie des bassins, la poulie, … ce qui donne (tâche 3) :

$$\alpha = \frac{1}{\underbrace{27{,}5 + 27{,}5}_{inertie\ des\ bassins} + \underbrace{8}_{inertie\ de\ la\ poulie} + \underbrace{1}_{inertie\ du\ surcharge}} = \frac{1}{64}$$

Technologie

La relation obtenue ici correspond à la relation recherchée dans le problème actuel traité par *l'Expert de Référence* : le coefficient de proportionnalité α traduit le rapport de l'accélération du système sur l'accélération de la pesanteur. La seule différence est que dans le problème traité ici, l'inertie de la poulie n'est pas négligeable. Par contre si les conditions de la situation physique, réelles pour l'auteur de 1784 et abstraites dans le cas du problème actuel, mènent à une expression similaire[45], les moyens pour atteindre ces relations sont totalement différents : l'un repose sur la modélisation théorique dans le cadre d'une théorie physique mature et l'autre semble provenir d'une démarche empirique. Si l'auteur de 1784 introduit bien les paramètres qui entrent en jeu dans cette relation algébrique, et indique qualitativement comment ils influent sur le taux de ralentissement, il ne justifie pas la relation algébrique qui quantifie ces effets. Nous ne pouvons pas dire grand chose de plus ici sur la technologie de cette étape.

Réseau conceptuel

Le réseau conceptuel actuel et celui utilisé par l'auteur sont différents. Par exemple :

- A la lumière du réseau conceptuel actuel, on pourrait penser que l'auteur confond diverses quantités, forces, masses, inertie du fait que les grandeurs sont évaluées à travers un seul facteur, une seule grandeur, la masse : « l*a force agissante ou accélératrice sera seulement 1/64 de cette masse totale ».* Les modèles théoriques dont nous disposons actuellement pour rendre compte des forces, de l'inertie d'un solide et de ses effets, ne sont pas établis.
- Le fait de rapporter les poids, l'inertie et les frottements à une seule et même grandeur physique permet la construction d'un rapport α sans dimension. Ce rapport, le taux de ralentissement, exprime une grandeur cinématique mesurable par le dispositif conçu.
- L'égalité du rapport des accélérations et du rapport $m_{surcharge}/m_{totale}$ est présenté comme une évidence. *« Cela posé, si on augmente du poids 1m la charge du bassin A, ce poids lui fera perdre son équilibre et le fera descendre et dans e même temps e bassin B s'éleva. La masse mise alors en mouvement sera évidemment 64m ; la*

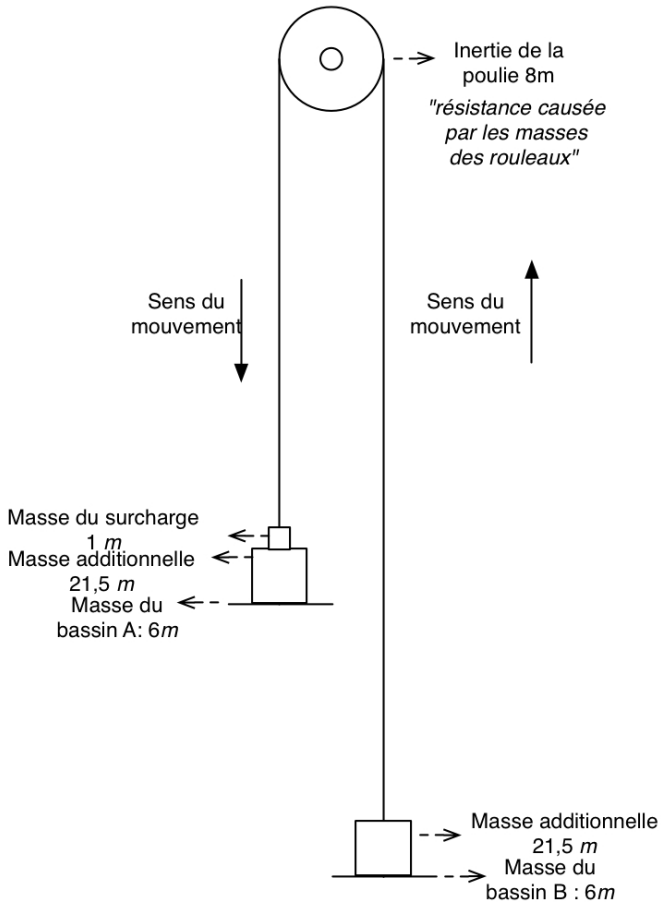
44 Le registre sémiotique utilisé par l'enseignant est essentiellement le registre de la langue naturelle.

45 Si l'on néglige les effets de l'inertie de la poulie, l'expression de α est la même que celle de y/g trouvé par *l'Expert de Référence*.

force agissante ou accélératrice sera seulement 1/64 de cette totale. »

Ce grand rouleau a une rainure ou gorge dans toute ſa périphérie, ſur laquelle paſſe une ſoie très-fine, mais aſſez forte pour ſoutenir deux cercles de cuivre A, B ſuſpendus horizontalement à ſes extrémités *a b*, ainſi que les différens poids qu'on emploie dans les expériences. Ces deux cercles, que nous appellerons les baſſins A & B, ſont égaux en maſſe; il en eſt de même des deux tiges d'acier qui s'élevent du milieu de ces baſſins, ainſi que des crochets attachés aux extrémités du fil de ſoie & engagés dans les trous que préſentent ſupérieurement ces deux tiges; en un mot, la maſſe totale ou la charge que ſupporte le fil eſt de 3 onces; elle eſt de plus diſtribuée également, c'eſt-à-dire que chaque baſſin peſe, en totalité, une once & demie; ainſi le poids de l'un étant contre-balancé par celui de l'autre, & réciproquement, ces deux baſſins ſont en équilibre. Si l'on exprime par 1 *m* le poids d'un quart-d'once, on aura 6 *m* en A, & 6 *m* en B, & de plus 8 *m* d'inertie dans le rouage, car M. *Atwood* évalue à 2 onces la réſiſtance cauſée par la maſſe des rouleaux & de la grande roue: par conſéquent on aura au total 20 *m*; & en ſuppoſant qu'on ajoute 21 *m* & demie au baſſin A, & autant au baſſin B, la maſſe totale ſera alors 63 *m*, & les deux baſſins demeureront encore en repos, l'un ne peſant pas d'avantage que l'autre.

Cela poſé, ſi l'on augmente du poids de 1 *m* la charge du baſſin A, ce poids lui fera perdre ſon équilibre & le fera deſcendre, & dans le même tems le baſſin B s'élevera. La maſſe miſe alors en mouvement, ſera évidemment 64 *m*; la force agiſſante ou accélératrice ſera ſeulement $\frac{1}{64}$ de cette maſſe totale.



$$\alpha = \frac{m_{surcharge}}{m_{totale}}$$ taux de ralentissement

$$\alpha = \frac{1}{27,5 + 27,5 + 8 + 1} = \frac{1}{64}$$

Figure 16: Ralentissement du mouvement dans le manuel 1784 et notre représentation du dispositif expérimenté en 1784. L'enseignant préfère utiliser l'unité de mesure « m » qui correspond à un quart d'once, à savoir 7,08 grammes.

2.3.4 Etape 4 : Prédictions sur le mouvement et vérifications expérimentales

L'enseignant, après avoir fait des études sur le mouvement des masses, propose des problèmes (11 problèmes au total[46]). Tous les problèmes sont centrés sur les aspects cinématiques, comme l'espace parcouru par les masses, leur vitesse, le temps de chute des masses que l'on met en relation avec le taux de ralentissement.

46 Les énoncés des problèmes sont présentés à l'annexe B1 (figure 7)

Pour chaque problème, la technique se décompose en trois types de tâches :

- l'auteur pose une affirmation à démontrer. Cette affirmation consiste en une prédiction d'une valeur numérique pour une des grandeurs cinématiques mesurable avec le dispositif, dans une situation expérimentale donnée ; cette prédiction repose sur les lois de Galilée et sur le taux de ralentissement du dispositif (technologie) : le taux de ralentissement donne le coefficient de proportionnalité pour transposer les lois de la chute libre de Galilée au cas de la machine d'Atwood. L'auteur ne montre pas toujours comment il procède pour obtenir la valeur prédite (la technique de cette tâche n'est pas toujours donnée).
- l'auteur décrit toute la démarche expérimentale à suivre pour réaliser les mesures ; puis il donne les résultats de mesures et commente éventuellement la mesure.
- il confronte ensuite les résultats expérimentaux avec la prédiction.

Nous présenterons un exemple. Nous nous intéressons au premier problème dans ce manuel (Figure 17).

PREMIER PROBLÈME.

SI la quantité 64 *m* a pour force accélératrice 1 *m*, l'eſpace qu'elle parcourra dans la premiere ſeconde de ſa chute, ſera ſeulement de 3 pouces.

Figure 17: Premier problème posé sur la machine d'Atwood -Manuel 1784

Tâche 1 : L'enseignant fait référence à la chute libre pour prévoir la position de la masse en une seconde. Si la masse supplémentaire de *1 m* est en chute libre, elle se déplace de 192 pouces en une seconde. Puisque le mouvement est ralenti avec un taux de *1/64*, cette même masse doit se déplacer dans ce dispositif de *192/64* pouces, à savoir 3 pouces[47,48].

Tâches 2 et 3 : L'auteur propose l'expérience à réaliser : *« Mettez ensuite l'étage D sur la division de 3 pouces marquée dans l'échelle, et le fond du bassin 1 au zéro de la même échelle. Cette masse, livrée à elle-même après quelques secondes, car le coup qu'elle frappera coïncidera exactement avec le coup suivant du pendule: ainsi toute la masse parcourra 3 pouces dans la première seconde de sa chute. »*[49].

L'auteur propose ensuite une variante de ce problème qui consiste à changer les paramètres de manière à ce que les valeurs prédites puissent facilement être mesurées avec ce dispositif. Cela met en évidence la contrainte expérimentale suivante : le dispositif de mesure ne permet

47 On vérifiera ces résultats en se référant au réseau conceptuel de la cinématique. On exprime l'espace parcouru lors de la chute libre par l'expression $x=\frac{1}{2}gt^2$ où est x la distance parcourue par les masses. En considérant $g=9{,}81\ ms^{-2}$, on aura $x=4{,}90\,m$ en une seconde de la chute, ce qui correspond à peu près *192 pouces*. Si l'accélération des masses est égale à $\frac{1}{64}g$, pour l'espace parcouru des masses dans le dispositif de la machine d'Atwood, on aura *0,07* mètres, qui correspond à 3 pouces.

48 L'extrait original de la résolution du premier problème est présenté dans l'annexe B1 (figure 9)

49 L'extrait original est présenté dans l'annexe B1(figure 9)

pas de mesurer n'importe quelle valeur avec précision et il faut donc bien ajuster les conditions expérimentales pour avoir une mesure précise.
Le choix des valeurs des paramètres n'est donc pas mené au hasard. C'est le résultat d'une stratégie qui vise à prévoir un résultat en se référant aux lois de la chute libre, et ce résultat ainsi que les paramètres expérimentaux dont il dépend doivent répondre aux contraintes imposées par le dispositif expérimental. La tâche de prédiction paraît indispensable pour permettre une réalisation précise de la tâche de mesure, et les deux tâches s'articulent alors dans une relation de précédence : la prédiction contrainte par le dispositif, précède la mesure.

Théorie, réseau conceptuel, registre sémiotique
L'auteur du manuel fait référence dans l'étape 4 aux lois de Galilée mais pas explicitement à la loi de Newton (PFD) qui à notre époque justifie ces lois de Galilée. Il utilise les concepts de force accélératrice relative au taux de ralentissement, d'accélération, de vitesse, de déplacement. Ces concepts proches des concepts actuels, ne répondent pas à des définitions précises reposant sur des modèles mathématiques. Les tâches sont décrites essentiellement sous le registre sémiotique du schéma et sous le registre de la langue naturelle. La description initiale insiste sur les composantes spatiales, temporelles et causales. Le processus de résolution n'a recours aux signes algébriques que pour préciser les valeurs numériques à l'aide de chiffres et de fractions.

Rapport de l'enseignant au réel
La stratégie de l'enseignant dénote une volonté d'établir un lien permanent avec le « réel » : à trois reprises les tâches ont pour objet soit de « construire le dispositif », soit de « modéliser le dispositif expérimental », soit de vérifier la compatibilité entre résultats théoriques et expérimentaux. Une phase déductive – en partie implicite- qui ne donne pas lieu à de longs développements algébriques (dans le registre de la langue naturelle), fait le lien entre ces tâches.

2.4 Conclusion pour le manuel de 1784

Alors que le dispositif est créé un siècle[50] après la découverte des lois de la dynamique par Newton, nous avons constaté à travers l'étude de ce dispositif que l'enseignant est dans une période de transition entre la physique galiléenne et la physique newtonienne.

Comme dans la physique Aristotélicienne [50], le travail de l'enseignant consiste à identifier des causes du mouvement (rupture de l'équilibre sous l'effet de la surcharge). Il raisonne à partir d'une masse supplémentaire qu'il ajoute au dispositif (1m). Il insiste sur le fait que c'est cette masse supplémentaire qui met en mouvement la totalité du dispositif de masse 64 m et lui communique une accélération évaluée à *1/64* fois celle de la pesanteur. Il lie les forces accélératrices à l'inertie du système et à son accélération. On peut supposer une référence implicite à la physique de Newton.

50 Newton publia son œuvre maîtresse « Philosophiae naturalis principia mathematica » en 1867 et la machine eut été créée par Atwood en 1784.

Mais conformément à la physique de Galilée[51,52] et de Newton[53], l'appréciation de l'intensité des forces, l'anticipation de leur effet et la confrontation du résultat obtenu avec le réel traduisent une rupture avec une physique qualitative (celle héritée d'Aristote)[54] et l'entrée dans une physique quantitative. Comme Galilée, l'auteur a la volonté de s'appuyer sur l'expérience et la mesure. Cependant, il ne dispose pas des outils conceptuels de *l'Expert de Référence* : par exemple, le référentiel, le repère, le système de coordonnées, l'expression vectorielle du PFD, des forces et de l'accélération, les modèles de forces, ... relevés dans une des tâches de *l'Expert de Référence*, n'existent tout simplement pas. Tout ce cadre théorique physique et mathématique n'est qu'au début de son élaboration, et le champ expérimental joue un rôle prédominant.

Lamé préface en 1840 son manuel destiné aux étudiants de l'école polytechnique [42] :

> *« Le cours de la physique de l'Ecole Polytechnique devrait se développer dans un cadre particulier : exposer avant tout les procédés d'expérience et d'observation qui conduisent aux lois des phénomènes ; discuter et rapprocher ces lois pour les réduire au moindre nombre ; choisir et éprouver les hypothèses qui peuvent le mieux coordonner tous les faits de chaque cadre théorique physique ; chercher s'il est possible l'hypothèse unique ou la loi générale qui embrasserait toute la science ; telle est la démarche scientifique qu'il importait de suivre.[…] les physiciens cherchant à grouper les phénomènes dont ils s'occupent en un petit nombre de théorie, soumettent à toutes les épreuves de l'observation, de l'expérience et du calcul, les lois et les hypothèses qui peuvent le mieux atteindre ce but scientifique. […] parmi les théories de la physique, les unes sont encore sous l'empire des hypothèses, seul lien qui puisse aujourd'hui grouper les faits qui les composent, tandis que d'autres atteignant leur loi générale, ne tarderont pas à faire partie des sciences mathématiques. »*

A cette époque, la physique a donc déjà beaucoup évolué et dispose d'un cadre théorique physique et mathématique nettement plus substantiel, mais l'intention de l'enseignant est avant tout orientée vers l'établissement des lois de la physique. L'enseignement dispensé reste ancré dans l'approche expérimentale : dans le manuel de Lamé l'étude de la machine d'Atwood demeure proche de celle présentée dans le manuel de 1784.
Cette citation de Lamé, bien que plus tardive, situe donc assez bien le paradigme qui détermine l'exposé de l'enseignant de 1784.

Comparaison avec la résolution de *l'Expert de Référence*

Nous avons vu que le cadre conceptuel, théorique et expérimental de la physique en 1784 est fondamentalement différent du cadre actuel. Cependant, avec une intention différente, les études des deux auteurs, celle de 1784 et celle de *l'Expert de Référence*, s'articulent autour de

51 *« Les corps tombent ; c'est un fait. De plus, lorsqu'ils tombent, leur mouvement s'accélère. Ce qu'il faut, selon Galilée, expliquer ou comprendre, ce n'est pas le fait même de la chute : il ne s'agit pas de trouver la cause pour laquelle les corps tombent. Ce qu'il cherche, c'est l'essence du mouvement de la chute. »*[51]

52 « *Galilée ne cherche pas à faire une théorie de la chute des corps. Tout au contraire, il observe le phénomène de la chute et l'étudie sans idées préconçues. Dans cette recherche, adaptant graduellement sa pensée aux phénomènes et la poursuivant dans toutes les conséquences logiques, il est arrivé à une conception qui, probablement pour lui-même beaucoup moins que pour ses procureurs, a eu le caractère d'une loi particulière nouvelle.* » [53]

53 « *Newton apporte une dynamique, c'est-à-dire une explication du pourquoi des mouvements des corps, grâce à l'introduction du concept de force qui relie les effets cinématiques aux causes qui les produisent* »[52]

54 « *La physique d'Aristote est fausse mais pourtant est une physique, une science, même si elles ne sont pas développées de l'aspect mathématique. »* [51]

la même grandeur : l'expert recherche l'accélération des masses et l'enseignant de 1784 établit le taux de ralentissement des masses.

Les conditions simplificatrices de l'exercice actuel sont exposées dans l'énoncé mais ne sont pas objets de discussion dans la résolution de l'expert, alors que toutes ces conditions sont abordées et discutées ici à partir d'arguments expérimentaux. L'auteur tient compte de la mise en mouvement, donc de l'inertie, de l'ensemble du dispositif, de la poulie, et de toutes les masses qui constituent le système. Seule l'inertie de la poulie n'est pas estimée négligeable par l'auteur du manuel, alors que l'énoncé actuel l'impose. L'auteur de 1784 ne peut pas faire appel à une loi théorique pour résoudre la question de la participation de la poulie : la manière dont il résout cette question est la seule dans sa résolution qui ne soit pas totalement justifiée, mais elle n'est pas implicite.

La situation traitée est une situation réelle, et non pas comme dans l'énoncé actuel une situation abstraite en référence à un réel possible et générique. Par contre on peut percevoir ici, mis à part la question de la poulie, comment ce problème « abstrait » moderne s'est constitué, comment ces différents éléments sont justifiés par une situation réelle véritable : quels éléments de la situation physique prend-on en compte, lesquels néglige-t-on et pourquoi ? Quelle est la raison originelle de l'intérêt porté à l'accélération des masses ? Nous verrons également que ces raisons se sont perdues et que l'on s'intéresse toujours aux mêmes grandeurs avec une intention et une approche différente : établir l'accélération, la force de tension, dans les mêmes conditions simplificatrices, dans une approche de modélisation théorique sans plus aucun rapport avec le champ expérimental.

3 L'enseignant un siècle après la création du dispositif

A partir du milieu du XIXe siècle, brusquement la présentation de l'expérience de la machine d'Atwood change de nature. Nous nous appuyons sur un manuel allemand [46] paru en 1880 pour le mettre en évidence.

Le dispositif n'est plus présenté dans le chapitre « lois de mouvement accéléré et retardé » comme nous avons vu dans l'ouvrage précédent, mais il est une illustration de l'utilisation du principe de D'Alembert. L'habitat écologique du dispositif « la machine d'Atwood » change.

Le dispositif qui fait l'objet d'une expérimentation à sa création, devient un problème à résoudre en s'appuyant sur un langage algébrique et en faisant référence à un principe de la physique newtonienne : la question posée demande d'étudier le mouvement des masses en utilisant le principe de D'Alembert.

Nous ferons la même étude mais de manière plus rapide que celle que nous avons faite pour le manuel de 1784. Nous étudierons tout d'abord l'intention de l'enseignant et sa stratégie puis les tâches qu'il accomplit ensuite les théories sur lesquelles l'enseignant de 1880 s'appuie et le paradigme dans lequel il se place, enfin, le rapport de l'enseignant au réel, son l'usage des registres sémiotiques et la mobilisation des réseaux conceptuels.

3.1 Intention de l'enseignant et sa stratégie

Nous identifions ainsi 2 intentions de l'enseignant :

- la prévision des caractéristiques du mouvement (étude du mouvement) par l'utilisation du principe de D'Alembert
- l'apprentissage des concepts de la mécanique par la résolution de problèmes (le manuel est composé uniquement de résolutions de problèmes).

La résolution de l'enseignant montre que la mécanique est devenue est une science prédictive. Sa stratégie consiste à anticiper le mouvement des masses à l'aide des principes exprimés sous leur forme algébrique, sans faire l'expérience, sans faire de mesure et sans confronter les résultats théoriques et expérimentaux.

Cette stratégie impose donc une étude avec un réel déjà simplifié et modélisé. On le voit sur la figure du dispositif donné dans l'énoncé du problème (Figure 18).

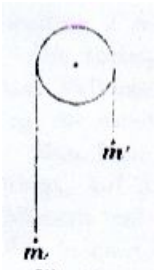


Figure 18: Figure du dispositif de la machine d'Atwood retrouvé dans le manuel de 1880. Elle est proche de celle qu'on utilise actuellement pour représenter le dispositif.

Cette stratégie impose la disparition de certaines tâches très importantes pour l'enseignant au moment de la création du dispositif : il n'a plus à «construire le dispositif expérimental ». On ne retrouve même plus en 1880 de description détaillée du dispositif. L'enseignant ne travaille plus avec le réel lui-même. Il ne discute pas du tout les conditions de validité du modèle présenté : la masse de la corde, celle de la poulie, son inertie, les frottements ont disparu. Il n'établit pas une relation empirique entre les accélérations des masses et l'accélération gravitationnelle. Ainsi, sa stratégie est constituée d'une seule étape : la résolution « quantitative du problème de la machine d'Atwood ». Il n'y a pas d'étapes d'étude qualitative ni de contrôle des résultats. Nous étudierons dans le paragraphe suivant la stratégie de l'enseignant de 1880 en terme d'organisation praxéologique.

3.2 Organisation praxéologique liée à la résolution du problème de la machine d'Atwood (1880)

Tâche
Le type de tâche de l'enseignant de 1880 consiste à utiliser le principe de D'Alembert que nous pouvons appeler « utiliser le principe (de travaux virtuels) de d'Alembert dans le cas de liaisons parfaites ».

Technique
De nos jours, nous pourrions décrire la technique de ce type de tâche (utiliser le principe de d'Alembert) par l'ensemble des sous tâches suivantes (que nous désignons la technique de l'utilisation du principe de d'Alembert -cas de liaisons parfaites) :

1. Définir le référentiel
2. Définir le système composé de plusieurs points matériels
3. Choisir des coordonnées pour chaque point matériel du système
4. Déterminer et écrire les contraintes géométriques qui limitent le mouvement du système
5. Identifier la force résultante des forces appliquées à chaque point matériel du système (autres que les forces de liaison)
6. Ecrire le principe de d'Alembert (cas de liaisons parfaites)
7. Résoudre les équations

La technique de l'enseignant de 1880 correspond à cette technique, sauf les terminologies des forces appliquées aux points matériels du système et l'accomplissement implicite de quelques tâches que nous préciserons ci-dessous.

Montrons comment l'enseignant développe cette technique décrite ci-dessus pour résoudre le problème de la machine d'Atwood. La résolution originale de l'enseignant est présente dans les figures 10 et 11 en Annexe B1.

Dans la résolution de l'enseignant de 1880, la définition du référentiel et du système d'étude est implicite (tâches 1 et 2) : il utilise un système constitué de deux points matériels (la masse m et la masse m').

Il définit deux coordonnées (tâche 3) : x et x'. Il définit ainsi deux déplacements virtuels (tâche 4) : δx et $\delta x'$. Il écrit la contrainte sur le mouvement du système : $x+x'=cte$. Il en déduit la somme des deux déplacements virtuels, qui est nulle : $\delta x+\delta x'=0$.

Il identifie les forces appliquées à chacun des points matériels du système (tâche 5) : mg et $m'g$. L'enseignant dans sa résolution utilise les termes « *forces effectives* » qui correspond à l'inertie de chaque point matériel du système ($m_\alpha \vec{a}_\alpha$) et « *forces perçues* » qui correspond à la différence (la soustraction) entre l'inertie d'un point matériel et la force résultante appliquée à celui-ci, à savoir $\sum_{\alpha=1}^{N}(m_\alpha \vec{a}_\alpha - \vec{F}_\alpha)$.

Il écrit le principe de d'Alembert (tâche 6) :

$$\sum_{\alpha=1}^{N}(m_\alpha \vec{a}_\alpha - \vec{F}_\alpha)\delta \vec{r}_\alpha = 0$$

ce qui donne pour les deux points du système défini (opération de projection permettant de passer de l'équation vectorielle à l'équation scalaire est implicite) :

$$(m\ddot{x}-mg)\delta x+(m'\ddot{x}'-m'g)\delta x'=0$$

Il résout les équations (tâche 7) et obtient l'égalité des accélérations des des deux points matériels du système : $\ddot{x}=\ddot{x}'=\frac{m-m'}{m+m'}g$.

L'enseignant précise que ce résultat est conforme au résultat proposé par Atwood. Lorsque cet enseignant donne des valeurs aux masses m et m', par exemple: m=7, m'=8, il obtient, dans ce cas, une valeur de l'accélération inférieure à la pesanteur, telle que $\frac{1}{15}g$. A la fin de sa

résolution, il fait référence à la dynamique newtonienne : il écrit l'équation différentielle du mouvement pour le point matériel *m,* similaire aux équations que l'on peut voir dans les résolutions actuelles.

La résolution de l'enseignant termine par le calcul des vitesses des masses et de leur déplacement que nous ne traiterons pas ici.

Technologie/Théorie
La technique ci-dessus décrit l'instanciation du principe de d'Alembert. Les contraintes de ce principe justifie la technique de l'enseignant ci-dessus.
Pour utiliser ce principe dans le cas des liaisons parfaites, il faut déterminer un système de points matériels soumis à des contraintes (géométriques) connues qui limitent son mouvement. Ces contraintes peuvent être interprétées en termes de forces de liaison, a priori inconnues, mais s'exerçant sur les points du système de sorte à ce qu'il obéisse en tout temps à ces contraintes. Ces forces de liaison doivent satisfaire la condition des travaux virtuels : $\sum_{\alpha=1}^{N} \vec{R}_\alpha \cdot \delta \vec{r}_\alpha = 0$ où $\vec{R}_\alpha$ est une force de liaison s'exerçant sur le point α et $\delta \vec{r}_\alpha$ le déplacement virtuel . Ainsi, le principe de d'Alembert s'écrit pour tout déplacement compatible avec les contraintes $\sum_{\alpha=1}^{N} (m_\alpha \vec{a}_\alpha - \vec{F}_\alpha) \delta \vec{r}_\alpha = 0$.
On s'aperçoit que l'auteur utilise le langage de la mécanique analytique (mécanique du solide) pour résoudre un problème qui relève également de la mécanique du point. La notion de liaison parfaite recouvre les conditions établies dans le problème actuel : corde et poulie de masse négligeable, frottements négligeables, … Ces remarques confirment bien le changement d'habitat souligné précédemment.

Lors de la résolution des équations, un autre cadre théorique entre en jeu : c'est l'algèbre.

3.3 Conclusion pour le manuel de 1880

L'enseignant utilise les différents cadres théoriques de la mécanique. Il s'appuie sur le principe de travaux virtuels de D'Alembert. Il utilise avant tout la productivité des langages mathématiques pour établir l'expression algébrique reliant les différentes paramètres.

Réseau conceptuel
La stratégie de l'enseignant (qui consiste à anticiper, sans faire l'expérience, le mouvement des masses à l'aide des principes physiques exprimés sous leur forme algébrique) nécessite un réseau conceptuel plus structuré. La catégorie des forces s'est enrichie : « forces effectives », « forces perçues », le poids, la force de tension. Dans ce réseau conceptuel, les expressions algébriques lient les grandeurs physiques : le produit de la masse et de l'accélération donne la « force effective » sur un objet. Les concepts de la cinématique apparaissent aussi dans ce réseau conceptuel. L'enseignant est capable d'exprimer algébriquement les grandeurs physiques, les relations entre les grandeurs physique (déplacement, vitesse, accélération).

Réel
La référence au réel est limitée à la sélection des faits pertinents et leur traduction dans le registre de langage algébrique (par exemple, ici, la propriété de la corde « inextensible » permet de poser la contrainte du système sous forme algébrique $x + x' = cte$. La référence à cette propriété n'est pas explicite dans la résolution de 1880).

La résolution de l'enseignant montre que les principes ne souffrent pas d'exception. Ils sont bien établis et ne peuvent être remis en cause contrairement à ce qui se passe dans le cas du manuel de 1784.

Dans sa stratégie, il n'y a plus de doute sur les résultats des calculs, ni de confrontation des résultats théoriques et expérimentaux. L'anticipation est a priori conforme à ce que devrait fournir l'expérience. Il n'y a plus besoin de vérifier la conformité entre le résultat de la modélisation et celui de l'expérience. La démarche qui suppose un aller-retour entre le réel est la théorie est de plus en plus ténue par comparaison avec la démarche d'Atwood et de l'auteur précédent. D'une certaine manière, on peut dire dans ce cas que la mécanique perd son statut de science expérimentale.

Langages
Cette stratégie de résolution entraîne la disparition du poids de la langue naturelle et favorise l'usage du langage algébrique. On utilise alors la productivité du langage algébrique. Les faits sont algébriquement traduits. La solution est présentée sous forme d'une expression algébrique. Enfin, l'approche algébrique et différentielle va de pair avec une référence plus précise aux principes (le principe de d'Alembert, le principe fondamental de la dynamique).
Pour cet enseignant le langage algébrique est le support pertinent pour traduire le principe.

Physique prédictive
La physique ne se place plus sur un plan d'interprétation du réel, mais dans une logique prédictive :

- Le dispositif « machine d'Atwood » est un système mécanique.
- Dans le cadre théorique bien établi de la mécanique de l'époque (1880), ce dispositif hérite de toutes les « propriétés » des systèmes mécaniques : on dispose de principes physiques (dont le principe de d'Alembert) qui permettent de résoudre un ensemble de problèmes (auquel le dispositif de la machine d'Atwood appartient) ; cela détermine le domaine de validité de ce cadre théorique de la mécanique.
- La traduction algébrique des principes physiques permet d'établir les relations « exactes » entre les paramètres. Nous disons qu'elles sont exactes dans le sens où on ne ressent plus le besoin d'une vérification par la confrontation avec le réel. Le cadre théorique est bien établi, il n'est plus discuté.

Cette nouvelle pratique de l'enseignant est liée au développement du calcul différentiel et intégral pendant ces 150 ans et au succès des modèles prédictifs dans ce domaine de la mécanique. La découverte de Neptune par le calcul, au milieu du XIXe siècle par Le Verrier et Galle[55] [55] a eu retentissement important dans la communauté scientifique. Elle assoit définitivement la mécanique newtonienne, élimine les autres approches et fixe la méthode à suivre, utilisée par l'auteur du manuel de 1880 (voir aussi la citation de Lamé, 1840 au paragraphe 2.4). Ceci explique le changement du rapport institutionnel de l'enseignant de 1880 à l'objet de savoir « résolution du problème de la machine d'Atwood ».

55 La première fois dans l'histoire « *le calcul permettait de découvrir un corps céleste situé à plus de 4 milliards de kilomètres de la Terre !* » [54]. En effet, avant Le Verrier, en 1843, un anglais, Adams, calcula la position et la masse de Neptune. Mais « *la prédiction d'Adams fut peu exploitée : l'université de Cambridge ne possédait pas de cartes à jour de la constellation du Verseau, et les collègues d'Adams n'aidèrent pas beaucoup ce nouveau chercheur, qu'ils considéraient comme trop jeune pour pouvoir faire une telle prédiction.* ». [54]

Le paradigme dans lequel se place la résolution de l'enseignant de 1880 est donc profondément différent de celui qui cadre la résolution de l'enseignant de 1784.

4 Conclusion

Parce que le dispositif a été mis au point près d'un siècle après la découverte par Newton des lois régissant la mécanique du point matériel, on aurait pu s'attendre à une proximité du rapport institutionnel des enseignants à l'objet du savoir « résolution du problème de la machine d'Atwood » en 1784 et 1880. Cette étude historique sur la machine d'Atwood nous a permis de constater qu'il n'en est rien et que les deux rapports institutionnels des enseignants à la résolution du problème de la machine d'Atwood sont profondément différents. Nous avons mis en évidence une forte évolution de ce rapport institutionnel en relation avec la maturation du domaine de la physique auquel appartient ce problème, qui s'accompagne d'un changement profond de paradigme.

On peut poser la question : « que se passe-t-il entre 1784 et 1880 ? ». Nous avons étudié quelques manuels parus entre 1784 et 1880 (1840 [42], 1852 [43], 1857 [44], 1865 [45]) (voir Annexe B1). Voici quelques points principaux :

- Dès 1840, La description du dispositif n'est plus exhaustive, elle se réduit en quelques lignes (figure 10 – Annexe B1). Cette étape essentielle pour l'enseignant de 1784 « construire le dispositif expérimental » disparaît ensuite complètement.
- Les manuels donnent des représentations picturales réalistes du dispositif en même temps que des schémas simplifiés de la machine d'Atwood qui représentent le modèle du dispositif (figure 12 – Annexe B1).
- Les intentions des enseignants sont similaires à celle de l'enseignant de 1784 jusqu'avant 1880 : vérifier expérimentalement les lois de Galilée par le dispositif de la machine d'Atwood (figure 11 – Annexe B1).
- Aucun enseignant ne prend en compte l'inertie de la poulie.
- Tous les enseignants calculent un taux de ralentissement du mouvement par rapport à la chute libre, et s'appuient toujours sur la surcharge pour expliquer pourquoi le dispositif se met en mouvement (figure 13 – Annexe B1).
- On voit apparaître en 1865 l'usage du registre algébrique pour calculer le taux de ralentissement du mouvement : on utilise les symboles (μ, *m)* pour désigner les masses, l'unité des masses disparaît ; on exprime algébriquement l'accélération gravitationnelle en fonction des masses dans le dispositif et de l'accélération des masses (figure 14, annexe B1).
- Aucun manuel ne discute plus des conditions de validité de l'expérience : frottements, masses des poulies et fils, ...
- La confrontation des résultats théoriques avec les résultats expérimentaux disparaît. (Les études ne sont plus expérimentales, la part du réel est considérablement réduite)

Nous proposons le tableau récapitulatif ci-dessous (Tableau 6) : la comparaison des rapports institutionnels des enseignants de 1784 et 1880 à la résolution de problème de la machine d'Atwood permet de caractériser l'évolution de ce rapport institutionnel.

	$R_I(Ens, RMA)_{1784}$	$R_I(Ens, RMA)_{1880}$
Intentions	-Vérifier expérimentalement les lois de Galilée (intention scientifique) -Rendre accessible aux lecteurs tout le travail scientifique ((intention pédagogique)	-Prévoir les caractéristiques du mouvement par l'utilisation du principe de mouvement virtuel de D'Alembert (intention scientifique) -Faire apprendre la mécanique par la résolution de problèmes (intention pédagogique)
Stratégies	Exposer en détail les procédés d'expérience, d'observation et de raisonnement physique 4 étapes -Etape 1: Présentation de la Construction du dispositif de la machine d'Atwood -Etape 2 : Modélisation du dispositif expérimental -Etape 3 : Calcul du taux de ralentissement du dispositif conçu (rapport de l'accélération des masses à l'accélération gravitationnelle) -Etape 4 : Prédictions sur le mouvement à partir des lois de Galilée et vérifications expérimentales des prédictions	Résolution quantitative du problème dans le champ de la théorie et des modèles 1 étape Anticiper le mouvement des masses à l'aide du principe de d'Alembert, (Résolution algébrique, sans faire l'expérience, sans faire de mesure et sans confronter les résultats théoriques et expérimentaux)
Tâche(s)/ Techniques	Etape 1 Tâches : Plusieurs tâches permettant de réaliser chacune des pièces du dispositif expérimental Etape 2 : Tâches : Rechercher expérimentalement les facteurs qui ont une influence sur le mouvement des masses Etape 3 : Tâches : Etudier l'équilibre du dispositif -Rompre l'équilibre -Calculer le taux de ralentissement du mouvement par rapport à la chute libre Etape 4 Tâches : Résoudre divers problèmes concernant les lois de Galilée Technique pour chaque problème -Prédire les valeurs des grandeurs physiques par les lois de Galilée -Décrire la démarche expérimentale pour réaliser les mesures -Confronter les résultats expérimentaux avec les prédictions	Etape 1 Liste de tâches -Définir le référentiel -Définir le système composé de plusieurs points matériels -Choisir des coordonnées pour chaque point matériel du système -Déterminer et écrire les contraintes géométriques qui limitent le mouvement du système -Identifier la force résultante des forces appliquées à chaque point matériel du système (autres que les forces de liaison) -Ecrire le principe de d'Alembert (cas de liaisons parfaites) -Résoudre les équations
Théories	-Lois de Galilée (Cinématique) -Lois de Newton (tentative d'établir les liens entre les masses des charges et les forces)	-Principe de travaux virtuels de d'Alembert (mécanique newtonienne)
Réseau conceptuel	Le poids, l'inertie et les frottements sont rapportés à une seule et même grandeur physique : la masse (Absence d'un réseau conceptuel complet, organisé et **stable**)	Réseau structuré et relativement proche de celui de *l'Expert de Référence*
Registres sémiotiques	langue naturelle, représentations picturales réalistes	langage algébrique, schéma, langue naturelle (forte diminution du poids du registre de langue naturelle)

Référence au réel	-Situation physique réelle dans toute sa complexité (champ expérimental) -Références permanentes avec le réel	-Situation physique en référence à un réel simplifié et modélisé -Pas de retour au réel pour confronter les résultats théoriques obtenus
Paradigme	Physique expérimentale Problème de la machine d'Atwood participe à la « science en train de se faire »	Physique prédictive « Problème » de la machine d'Atwood relève de la « science proche de son « état d'équilibre »[56]

Tableau 6: Tableau comparatif des deux rapports institutionnels

Evolution du problème posé

D'après Dumas-Carré [2] les situations présentées de nos jours dans les exercices sont complètement modélisées dès l'énoncé. L'énoncé du problème de la machine d'Atwood de 1880 est de ce type. Dans le manuel 1784, les problèmes successifs sont aussi présentés sous cette forme, parce que la résolution d'un problème en faisant appel à des principes théoriques nécessitent une modélisation. Mais ils ne sont pas détachés de l'étude expérimentale. L'étude expérimentale a entre autre pour fonction de construire le modèle de la situation physique à partir du réel.

On peut faire l'hypothèse que cette évolution est liée à l'évolution du paradigme de la mécanique. L'étude historique de ce chapitre permet de percevoir une qualité particulière du réseau conceptuel (et des théories) associé à la discipline mécanique du point matériel. En 1784 le réseau conceptuel et les théories qui permettent de modéliser le réel ne sont pas stabilisés. Ils ne sont pas non plus complets, mais ils sont organisés ; en 1784 cette mécanique est une science toute jeune « en train de se faire ». Le problème de la machine d'Atwood et le cadre théorique de la mécanique que ce problème mobilise, n'est plus en 1880 (comme à l'heure actuelle) un « problème scientifique », un problème de la « science en train de se faire ». En 1880, la résolution du problème est restreinte à la modélisation « quantitative » théorique ; les résultats théoriques anticipent des faits de la situation pour lesquelles on ne semble plus percevoir la nécessité d'une confrontation avec le réel. On semble alors atteindre une totale confiance dans le modèle, la théorie, au point de ne plus remettre en question leur pertinence et l'« exactitude » de leurs prédictions des faits par rapport au réel. On peut comprendre la citation suivante de Lamé en 1840 comme une référence à «certitude» mathématique :

> *« les théories de la physique [...] atteignant leur loi générale, ne tarderont pas à faire partie des sciences mathématiques. »*

Dans le chapitre suivant (Chapitre 4) nous analyserons les résolutions du problème de la machine d'Atwood par les enseignants actuels. Nous pouvons poser dès maintenant que le paradigme dans lequel leurs résolutions se placent est le même que celui de *l'Expert de Référence* (que l'on a caractérisé comme étant « actuel »). Nous avons vu dans ce chapitre le rôle déterminant de l'intention de l'enseignant, et nous porterons une attention particulière à ce point de notre grille d'analyse dans les chapitres suivants.

56 « *Parmi les théories de la physique, les unes sont encore sous l'empire des hypothèses, seul lien qui puisse aujourd'hui grouper les faits qui les composent, tandis que d'autres atteignant leur loi générale, ne tarderont pas à faire partie des sciences mathématiques.* » Lamé [42]

Chapitre IV

Rapport institutionnel des enseignants actuels à l'objet de savoir « résolution du problème de la machine d'Atwood »

Chapitre IV Résolution du problème de la machine d'Atwood par les enseignants

Dans le chapitre précédent (chapitre 3), nous avons mis en évidence l'évolution des rapports institutionnels des enseignants à la résolution de problèmes en dynamique du point à travers l'étude de la résolution du problème de la machine d'Atwood. Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux rapport institutionnel des enseignants actuels à la résolution du problème de la machine d'Atwood $R_I(Ens, RMA)$.

Les enseignants actuels ne peuvent pas mettre en place la même stratégie que *l'Expert de Référence*, et ils sont contraints d'effectuer ou d'adopter une transposition didactique. Un enseignant est soumis à diverses contraintes dues au contexte didactique : la contrainte du temps didactique, des connaissances de la population d'étudiants, du programme d'enseignement, de la motivation des étudiants, ... Ces contraintes vont influencer la résolution adoptée par l'enseignant : sa stratégie, son intention, … seront différentes et reposeront à la fois sur des arguments scientifiques et pédagogiques.
Les résolutions proposées par les enseignants seront donc a priori différentes de celle proposée par *l'Expert de Référence*, sinon ce chapitre n'aurait pas lieu d'être.

L'organisation du chapitre est détaillée dans la figure 19 ci-dessous.

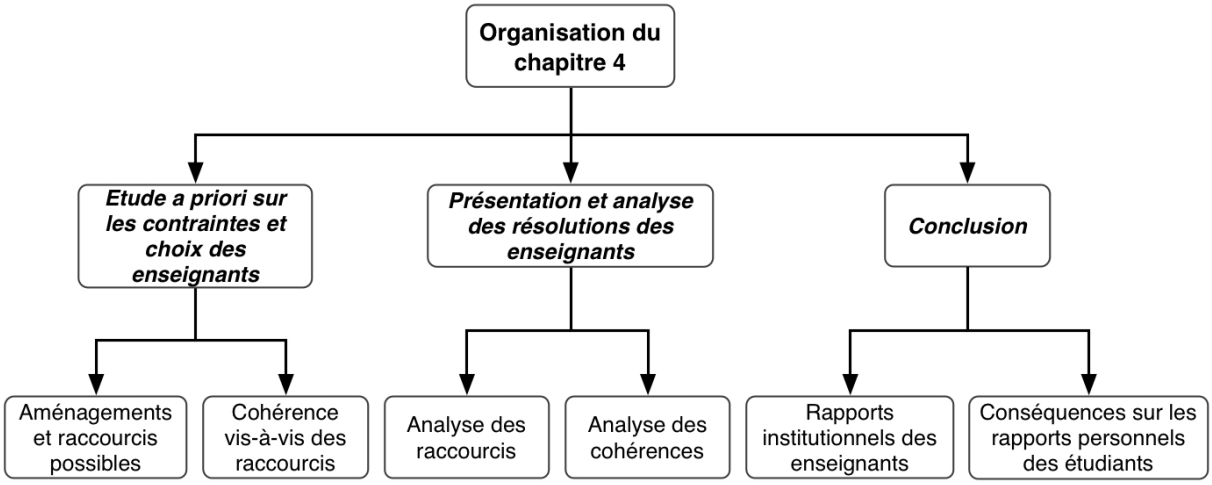


Figure 19: Organisation du chapitre 4

Nous commencerons par faire une analyse a priori de la résolution des enseignants actuels à partir de la résolution de l'expert de référence. Nous rechercherons les aménagements possibles des enseignants en prenant en compte les contraintes énoncées ci-dessus.
Cette analyse a priori complétera notre grille d'analyse pour étudier la résolution d'enseignants actuels dans des contextes différents : manuel de la mécanique du point, feuille du TD, sites internet,…

Puis, en effectuant une synthèse sur la cohérence des résolutions d'enseignants en référence aux écarts constatés par rapport à la résolution de l'expert de référence, nous essaierons de dégager a priori des difficultés possibles pour les étudiants.

1 Etude a priori de la résolution du problème de la machine d'Atwood par un enseignant actuel

Notre étude bibliographique sur les résolutions de problèmes montre que de nombreux chercheurs en didactique insistent sur le fait que la stratégie de résolution des étudiants consiste uniquement en la résolution quantitative du problème (voir paragraphe 3 au chapitre 1). Beaucoup conseillent le passage par une phase d'analyse qualitative et une phase de contrôle.

> **Hypothèse 1** : Ceci nous permet de supposer que les résolutions classiquement proposées par les enseignants ne comportent elles aussi que la partie de résolution quantitative.

Nous pouvons remarquer d'après la résolution de l'expert de référence, que cela permet une diminution conséquente du volume de la résolution (et donc de sa durée).

Nous avons vu également que les problèmes scolaires actuels reposent sur des situations physiques déjà modélisées (Dumas-Carré & Goffard [2]). Ceci se retrouve dans l'énoncé traité par l'expert de référence. Nous avons vu au chapitre 3 que ce fait s'est progressivement mis en place au cours du XIXe siècle en ce qui concerne le problème de la machine d'Atwood.

> **Hypothèse 2** : On peut donc s'attendre a priori à ce que les résolutions actuelles que nous allons rencontrer reposent sur des situations déjà modélisées sans lien explicite avec une situation réelle expérimentale.

Nous avons vu également dans le chapitre 3 que l'on passe progressivement d'une approche expérimentale du problème de la machine d'Atwood en 1784 à une approche uniquement prédictive en 1880 qui correspond également à l'approche du problème posé à l'expert de référence.

> **Hypothèse 3** : On peut donc s'attendre à ce que les problèmes résolus par les enseignants actuels soient également dans ce même type d'approche prédictive, en particulier si l'on suppose que ce choix est fortement contraint par le paradigme de la mécanique newtonienne et son évolution (chapitre 3 paragraphe 3.3).

Dans cette analyse a priori, nous allons tenter de dégager les écarts possibles de la résolution d'un enseignant avec la résolution de l'expert de référence. Nous faisons l'hypothèse que ces écarts sont motivés par des contraintes de la situation d'enseignement. Nous prendrons en compte principalement la nécessité de réduire la longueur et la complexité de la résolution de l'expert afin que la résolution proposée soit rendue accessible aux étudiants d'un niveau donné, qu'elle soit rendue conforme au programme d'enseignement, ceci en respect d'un temps didactique donné.
Nous considérerons les écarts entre une résolution d'enseignant et celle de l'expert de référence, comme des aménagements de la résolution de l'expert. Parmi les aménagements

possibles, nous porterons une attention particulière aux simplifications qui réduisent la longueur de la résolution, et que nous nommerons « raccourcis ».
Dans la suite de ce paragraphe nous présenterons plusieurs raccourcis qui pourraient être effectués par un enseignant sur la résolution du problème de la machine d'Atwood, puis nous analyserons la cohérence de la résolution vis-à-vis ces raccourcis.

Cette analyse a priori nous permettra ensuite d'analyser des résolutions d'enseignants actuels en portant une attention particulière aux raccourcis effectués. Cela nous guidera également pour analyser les cohérences des résolutions des enseignants vis à vis des écarts entre les résolutions des enseignants et la résolution de *l'Expert de Référence*.

La stratégie de *l'Expert de Référence* est complexe. Sa stratégie comporte plusieurs étapes :

- l'étude qualitative sur la situation
- la résolution quantitative du problème
- le contrôle des résultats[57].

Il en résulte une multiplicité et diversité de tâches : les tâches concernant l'étude qualitative, celles sur la résolution quantitative du problème et celles sur le contrôle de résultats.

L'Expert de Référence fait une résolution quantitative du problème de manière exhaustive : il étudie tous les systèmes possibles, il accomplit toutes les tâches nécessaires, il explicite les produits des tâches. Cela permet une lecture objective de cette résolution dans le sens où un lecteur averti peut suivre pas-à-pas sa résolution et la contrôler.
Mais la résolution de l'expert paraît difficile à présenter par l'enseignant aux étudiants à cause de sa (relative) exhaustivité, de la diversité des connaissances mises en jeu, du temps qu'il faudrait pour l'exposer ou la lire, … On peut donc s'attendre à ce que les enseignants fassent des raccourcis par rapport à la résolution de *l'Expert de Référence* afin de réduire la complexité et la longueur de la résolution du problème. Tout au long de ce paragraphe, nous étudierons d'une part les raccourcis possibles et d'autre part les cohérences ou incohérences éventuelles engendrées par le recours à ces raccourcis.

1.1 Raccourcis possibles des enseignants

1.1.1 1er raccourci : « centration » sur la résolution quantitative du problème

La résolution *l'Expert de Référence* consistait d'abord à faire une étude qualitative de la situation, puis une résolution quantitative du problème et ensuite à contrôler les résultats. L'enseignant peut envisager une résolution centrée sur la résolution quantitative du problème. Ainsi, sont éliminées les étapes de l'étude qualitative et de contrôles des résultats (ainsi que tâches associées à ces deux étapes).

Ce raccourci induit une réduction de la diversité des points de vue en faveur du seul point de vue de la résolution quantitative. On nommera ce premier raccourci « centration » sur la résolution quantitative.

57 La stratégie de *l'Expert de Référence* a été représentée par un diagramme dans la figure 4 au chapitre 2.

1.1.2 2e raccourci : Réduction du nombre de systèmes à étudier

L'Expert de Référence fait un choix et décide d'étudier tous les systèmes possibles (au total 6 systèmes). Il utilise plusieurs « principes » physiques (le PFD, le théorème du moment cinétique, la conservation de la longueur de la corde). L'enseignant peut être contraint à réduire le nombre de systèmes à étudier et à limiter le nombre de cadres théoriques utilisés, ne serait-ce que pour limiter la résolution aux compétences et connaissances des étudiants (savoirs institutionnels pré-requis et visés par l'enseignement). Il nous faut poser la question suivante : ces raccourcis affectent-ils la cohérence de la résolution ?

Examinons maintenant à travers la figure 20 (présentée au chapitre 2) le détail de la résolution de l'expert de référence en regard du programme de mécanique du point matériel généralement enseigné en première année universitaire.

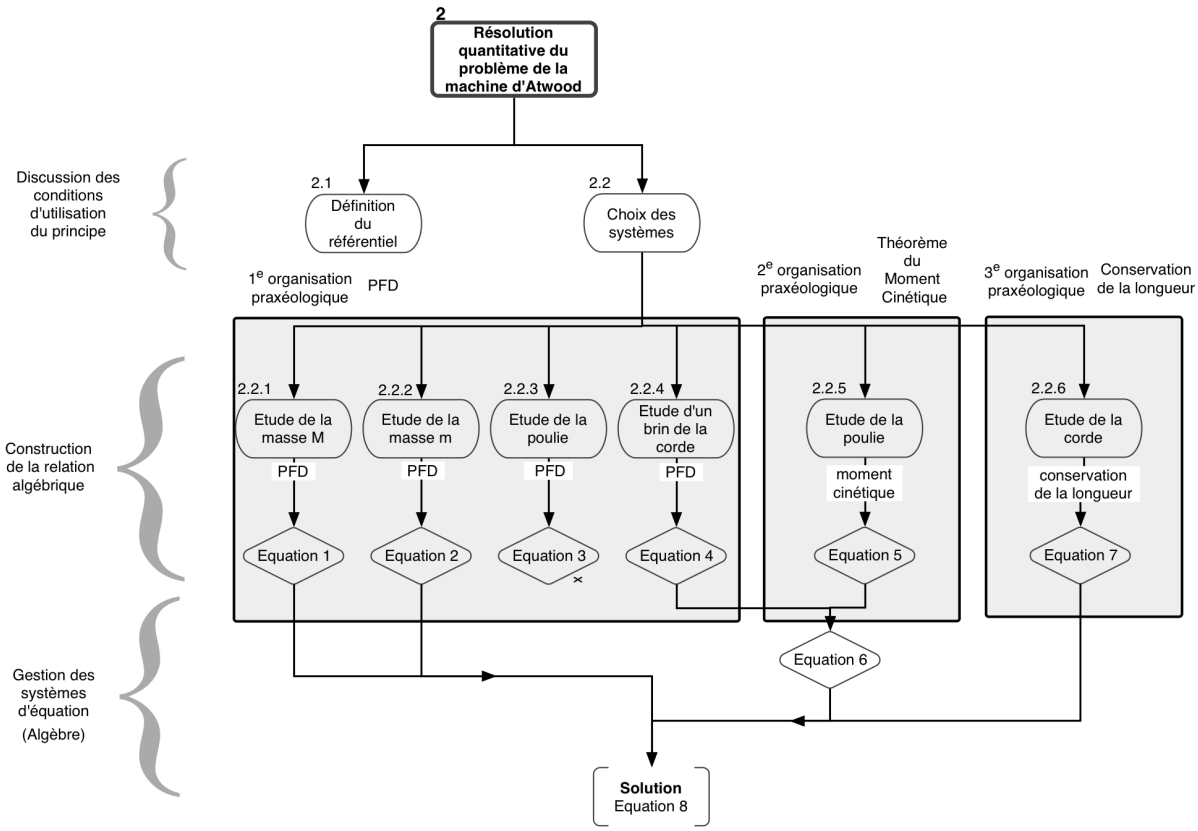


Figure 20: Résolution quantitative du problème de la machine d'Atwood par l'Expert de Référence

Le programme n'inclue pas à ce stade de l'enseignement les principes de la mécanique du solide. Il n'est donc pas possible pour l'enseignant de proposer aux étudiants le type de tâche de 2.2.5 tel qu'il est traité par l'expert de référence, et qui fait référence au théorème du moment cinétique en mécanique du solide et à l'organisation praxéologique associée. Il va donc lui falloir aménager cette partie de la résolution.
Le reste de la résolution de l'expert est a priori dans les connaissances acquises ou à acquérir d'un programme de première année.

La tâche 2.2.3 (étude de la poulie avec le brin de corde) n'est pas utile pour la résolution du problème. Donc on peut s'attendre à ce que l'enseignant ne la prenne pas en compte à juste

titre, sans remettre en question la cohérence de la résolution.

La tâche 2.2.5 (étude du mouvement de rotation de la poulie) permet en association avec la tâche 2.2.4 (étude du brin vertical de corde) d'établir la relation entre les forces de tension. Etant donné que la tâche 2.2.5 ne peut être traitée telle quelle par les étudiants, on peut s'attendre à ce que l'aménagement de cette tâche soit étendu à l'ensemble des deux tâches 2.2.5 et 2.2.4 qui pourraient être alors réduites à une seule et même tâche dont le produit est la relation entre les tensions.
D'autre part le modèle simplifié du dispositif suppose que les influences de la corde et de la poulie sont négligeables par rapport aux autres effets inertiels[58]. Cela peut induire à négliger de traiter les systèmes relatifs à la poulie et à la corde, ce qui est le cas des tâches 2.2.4 et 2.2.5, mais aussi de la tâche 2.2.6. Si c'est le cas, cela pourrait revenir à considérer comme une évidence l'égalité des tensions qui s'exercent sur les deux masses M et m. On risque alors d'induire un lien direct de cause à effet entre les faits « masses et frottements négligeables pour la poulie et la corde » et l'égalité des tensions, qui relèverait plus d'un raisonnement de sens commun que d'un raisonnement scientifique. La résolution de l'expert montre que la modélisation qui permet d'établir cette relation est loin d'être évidente. D'autre part la modélisation du dispositif dans le manuel de 1784 montre également que ce n'est pas une évidence sur le plan expérimental.

L'enseignant ne peut étudier deux systèmes s'il veut introduire les paramètres (masses) qui déterminent la valeur de l'accélération (étapes numérotées 2.2.1 et 2.2.2 sur la figure 20). Il pourrait laisser de côté l'étude de la poulie et de la corde. Ce serait le deuxième type de raccourci possible des enseignants.

1.1.3 3e raccourci : Argumenter ou démontrer (ou ni l'un ni l'autre)

Quand on étudie le mouvement des deux systèmes M et m, on obtient deux équations (équation 1 et équation 2 sur la 20) et on ne peut pas résoudre le système d'équations. C'est la raison pour laquelle *l'Expert de Référence* étudie d'autres systèmes. Nous avons vu ci-dessus que l'enseignant peut être tenté d'aménager l'étude de ces autres systèmes (par rapport à la résolution de l'expert). Nous posons ici la question des moyens pour aménager ces tâches.

Pour établir la relation entre les tensions *l'Expert de Référence* étudie d'abord la partie verticale de la corde (tâche numérotée 2.2.4 sur la figure 20), puis le mouvement de rotation de la poulie (tâche 2.2.5 sur la figure 20). Les technologies employées reposent sur le PFD et le théorème du moment cinétique.
L'expert de Référence établit une relation entre les accélérations des masses en prenant en compte la conservation de la longueur de corde et ce que cela induit sur les positions des masses M et m dans un repère judicieusement choisi (étape 2.26 sur la figure 20).

Comment l'enseignant pourrait procéder pour obtenir ces deux relations indispensables pour compléter le système d'équations qui devient alors soluble ?

Pour ne pas utiliser le théorème du moment cinétique, a priori inconnu des étudiants, l'enseignant pourra justifier l'égalité des tensions s'exerçant de part et d'autre de la poulie en

58 Voir manuel de 1880 et énoncé pour l'expert de référence ; dans le manuel de 1784 les effets de la poulie ne sont pas négligeables.

évoquant les faits donnés dans l'énoncé : l'absence de frottement entre la poulie et son axe, l'inertie réduite d'une poulie de masse négligeable … Il établit alors un lien direct entre les intrants de la tâche et son produit (Figure 21, extraite du chapitre 2).

Ce type de raisonnement peut également être utilisé pour postuler l'égalité en module des accélérations des deux masses (produit de la tâche 2.2.6) à partir des intrants : corde tendue, inextensible, masses attachées aux extrémités de la corde.

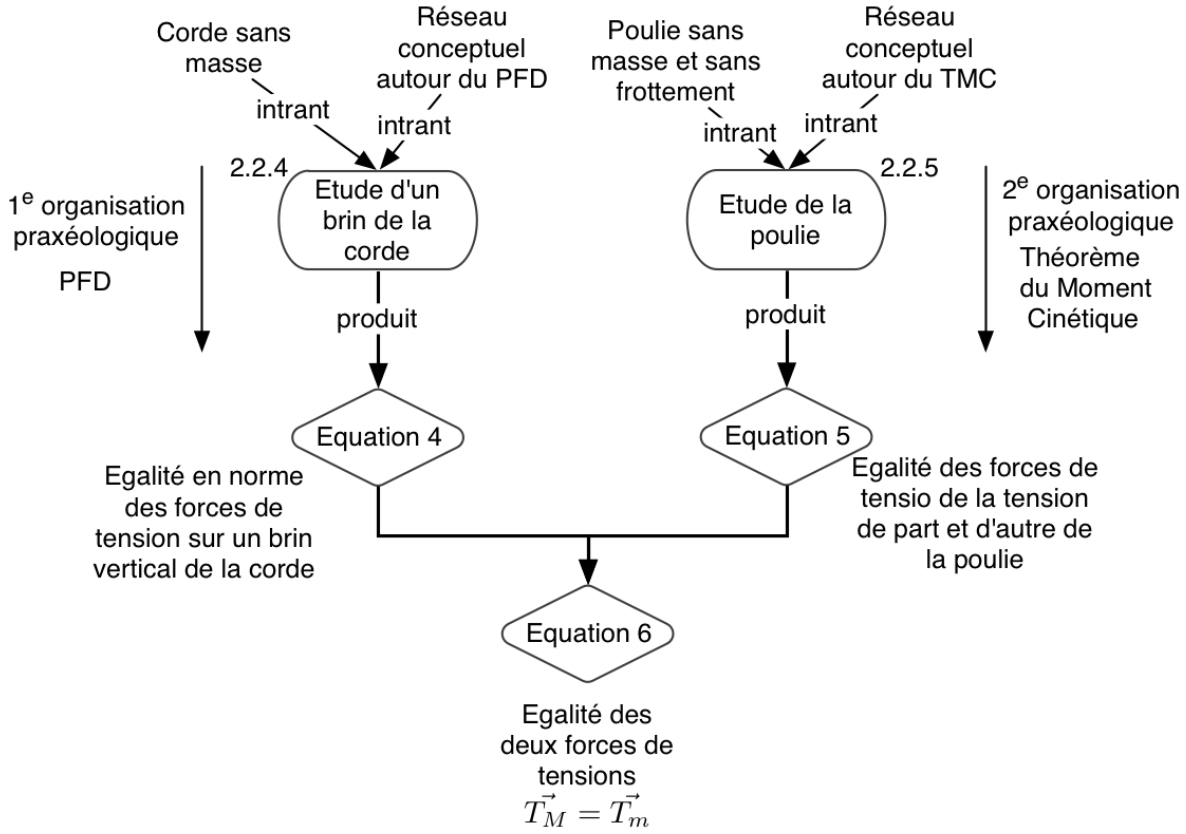


Figure 21: Etablissement de la relation entre les forces de tension par l'Expert de Référence

Les relations établies de cette manière ont un statut hypothétique. L'enseignant peut faire sentir, il peut justifier, argumenter sans démontrer de manière formelle.

1.1.4 4e raccourci : Accomplissement (exécution) automatique des tâches

L'enseignant pourrait aussi faire des raccourcis au niveau de l'accomplissement de certaines tâches qui se retrouvent de manière systématique dans un grand nombre des problèmes de mécanique du point matériel que les étudiants vont rencontrer dans un enseignement donné.

Par exemple, dans l'organisation praxéologique associée à l'utilisation du PFD, *l'Expert de Référence* passe du temps pour s'assurer que les conditions sont remplies pour que le PFD soit utilisable. Ces conditions sont systématiquement remplies dans tous les problèmes qui relèvent de cette organisation praxéologique. Cela peut être le cas dans la majorité des exercices d'un TD qui réunit des exercices portant sur les lois de Newton.
Voici quelques unes de ces tâches que l'on voit apparaître explicitement dans la résolution de l'expert et qui pourraient paraître répétitives à l'enseignant et aux étudiants lorsqu'on les considère à l'échelle d'une feuille d'exercices :

- Définition du référentiel – caractérisation comme galiléen (tâche 1)
- Définition du système quand il n'y en a qu'un possible sans ambiguïté (ce n'est pas le cas dans le problème de la machine d'Atwood) (tâche 2)
- définition explicite du repère et du système de coordonnées (tâche 4)
- écriture de l'accélération de chaque système (tâche 3)
- Identification explicite des forces extérieures appliquées au système (tâche 5)
- écriture vectorielle du PFD pour chaque système (tâche 6)
- projection de l'équation vectorielle de chaque système suivant l'axe du repère qu'il a choisi de manière explicite (tâche 7)

Certaines tâches sont discutées telles quelles dans d'autres problèmes et l'enseignant pourrait choisir de les passer sous silence. Par exemple la définition du référentiel terrestre et sa caractérisation comme galiléen est une tâche partagée par de nombreux exercices.
D'autres tâches vont voir leur technique réduite aux sous-tâches qui varient d'un problème à un autre. Par exemple :

- au lieu d'écrire de manière explicite l'accélération du système avant l'écriture vectorielle du PFD, on pourrait l'écrire directement lors de l'écriture vectorielle du PFD
- On peut ne pas faire un bilan de forces explicite, et les écrire directement dans l'équation du PFD
- on peut projeter les équations vectorielles sans expliciter les axes du repère choisi
- …

Une telle pratique peut se justifier par les arguments suivants :

- la réduction de la longueur de l'exposé
- les tâches omises sont connues de la population étudiante (tâches non problématiques : tâches répétitives ou routinières[59])

En poussant à l'extrême, on peut imaginer une résolution du problème de la machine d'Atwood en combinant une exécution automatique et implicites de l'ensemble des tâches citées ci-dessus, sans argumentation, qui se résumerait à présenter 2 équations vectorielles :

$$Mg - \|\vec{T}\| = M\,\|\vec{a}\|$$
$$mg - \|\vec{T}\| = -m\,\|\vec{a}\|$$

A condition que l'on connaisse et que l'on maîtrise la technique de l'organisation praxéologique du PFD, on peut identifier toutes les tâches accomplies implicitement dans ces deux équations.

Par contre, un étudiant qui ne possède pas cette organisation praxéologique n'est pas à même de dire quel a été le cheminement de l'auteur. La cohérence de la résolution lorsqu'on pratique de tels raccourcis est donc soumise à la capacité des étudiants à identifier les tâches passées sous silence.

59 Ainsi, on revient sur la notion de tâche problématique et routinière au sens de Chevallard. Il définit une tâche non problématique comme : « *Pour un individu x, un type de tâches T peut apparaître comme routinier ou comme problématique. Le type de tâches T est regardé comme routinier pour x quand, pour lui, l'accomplissement d'une tâche t du type T « va de soi », et « ne lui pose pas de problème. … Le type de tâche T est, en revanche, regardé comme problématique pour x quand il comporte des difficultés susceptibles d'empêcher x d'accomplir les tâches de ce type.* »[35]

1.2 En résumé

L'enseignant a à sa disposition diverses possibilités pour réduire la complexité et la longueur de la présentation de la résolution du problème en adoptant divers aménagements :

- diminuer le nombre de point de vue et se centrer sur la seule approche quantitative (« centration » sur la résolution quantitative)
- réduire le nombre de systèmes étudiés (exclure les tâches qui se situent dans des praxéologies hors du curriculum, où dont les intrants se situent hors du domaine de validité contraint par le modèle simplifié de la situation physique, ...)
- Adopter une approche non formelle[60] dans les systèmes dont on limite l'étude : on met plus directement en relation les faits intrants de la tâche avec le produit (relation algébrique) en s'appuyant sur une argumentation non formelle
- Réduire au minimum la technique des tâches supposées connues par la population étudiante visée.

La résolution de *l'Expert de Référence* est exhaustive et peut être intégralement contrôlée par un lecteur averti. Elle est cohérente avec l'usage des principes, les faits présentés dans le problème et leur traduction en fonction des éléments du réseau conceptuel.

Quand il s'agit de faire des raccourcis, la question de leur cohérence dans l'édifice de la résolution se pose sur plusieurs niveaux :

- au niveau de la pertinence des faits invoqués lors de l'emploi d'une argumentation non formelle dans une tâche : la tâche telle qu'elle apparaît dans la résolution de l'expert, est réduite à un raisonnement causal dont les prémisses doivent correspondre aux intrants de la tâche.
- au niveau de raccourcis dans l'accomplissement de la technique d'une tâche : toute tâche implicite dans la résolution de l'enseignant doit pouvoir être identifiée par le public visé.

2 Présentation et analyse des résolutions des enseignants

Nous présenterons et analyserons au total 5 résolutions dans ce chapitre. Nous avons pour objectif :

- de mettre en évidence les aménagements effectivement utilisés par les enseignants au cours de leur résolution
- d'analyser les incohérences éventuelles auxquelles pourraient être confrontés les étudiants
- d'identifier les intentions des enseignants
- de dégager les stratégies présentées aux étudiants.

Dans le tableau ci-dessous (Tableau 7), nous précisons les abréviations utilisées dans la thèse pour chacune des résolutions étudiées, ainsi que le contexte dans lequel les résolutions ont été effectuées.

60 Nous entendons ici une approche qui ne passe pas par une organisation praxéologique relevant de la physique, s'appuyant sur un principe physique

Résolution	Contexte
R1	Site internet de l'université Lock Heaven of Pennsylvanie aux Etats-Unis [56]
R2	Site internet Hyperphysics de l'université de Georgia State (protocole d'enseignement à distance aux Etats-Unis)[57]
R3	Manuel universitaire de mécanique, Alonso-Finn [58]
R4	Site internet de l'Université En Ligne (UEL -ressources pédagogiques de premier cycle universitaire créées par une association d'universités françaises) [59]
R5	Corrigé d'un TD de mécanique du point matériel en première année universitaire de l'Université Joseph Fourrier en France [60]

Tableau 7: Résolution des enseignants à analyser dans le chapitre 4

2.1 Résolution R1

La résolution est présentée dans la figure 22 ci-dessous. Nous allons tenter de reconstruire la stratégie de cette résolution par référence à la résolution de l'expert, ce qui nous permettra de dégager les aménagements et les raccourcis. Nous verrons que l'interprétation de cette résolution nous amènera à envisager d'autres organisations praxéologiques que celles de l'expert.

With masses m_1 and m_2 as the ascending and descending parts of the system, the net force on the system is:

$$F_{net} = m_2 g - m_1 g = (m_2 - m_1)g \quad [1]$$

when the pulley friction and moment of inertia are neglected.

By Newton's second law,

$$F_{net} = ma = (m_1 + m_2)a \quad [2]$$

where $m = m_1 + m_2$ is the total mass of the moving system. Then, equating Eqs. (1) and ~~(w),~~ 2 we have

$$(m_2 - m_1)g = (m_1 + m_2)a \quad [3]$$

or

$$a = \frac{(m_2 - m_1)g}{m_1 + m_2} \quad [4]$$

Figure 22: Résolution R1

Dans cette résolution, les deux masses suspendues aux extrémités de la corde sont considérées comme les parties descendantes et ascendantes d'un système qui n'est pas clairement identifié

(le premier usage du terme « système » semble se rapporter à l'ensemble du dispositif, alors que le second usage semble se rapporter à la notion de « système étudié » telle qu'elle est posée dans la résolution de l'expert).
L'auteur donne l'expression de la résultante des forces, qui est égale à la différence de poids entre les deux masses *(M-m)g* ; ce que l'on justifie en argumentant que les forces de frottement au niveau de la poulie et l'inertie de la poulie sont négligeables. Dans l'écriture du PFD, on prend en compte pour l'inertie la somme des masses et pour la force extérieure la différence des masses. On obtient l'expression de l'accélération des masses.

2.1.1 Raccourcis dans la résolution R1

Nous nous référons aux raccourcis supposés des enseignants :

- l'auteur se centre sur l'approche quantitative du problème
- deux cadres théoriques sont évoqués : la mécanique newtonienne (explicite) et la mécanique du solide (implicite) car l'enseignant précise que $F_{net}=(M-m)g$ quand on néglige « le frottement et le moment d'inertie de la poulie »,
- les relations entre les grandeurs physiques (accélérations et forces de tension) ne sont pas justifiées
- il limite tellement le nombre de tâches à effectuer que la résolution devient inexacte. La résolution quantitative du problème est réduite à l'écriture de la projection du PFD (*tâche 7*) :
  - Les tâches sur la discussion des conditions d'utilisation du PFD (*tâches 1 et 2*) sont absentes dans la résolution.
  - Le choix du système sur lequel sont appliquées les lois de la mécanique du point est douteux.
  - Les tâches sur la construction des relations algébriques (*tâches 3 à 7*) sont très implicites.

On peut poser la question de la cohérence de cette résolution avec les principes physiques.

2.1.2 Cohérence de la résolution R1

La résolution de l'enseignant est tellement implicite et on ne voit pas quels systèmes sont étudiés. Le formalisme mathématique dans la résolution ne concorde pas avec l'utilisation du PDF car le PFD n'est pas appliqué à un solide déformable (ici M+m). Nous nous proposons de faire des hypothèses sur la résolution afin de rendre compte de la stratégie de l'enseignant. Pour chaque hypothèse, nous préciserons si une telle hypothèse est cohérente.

2.1.2.1 Première hypothèse sur la résolution R1

Supposons que l'enseignant procède de la manière suivante (Figure 23 et Tableau 8) :

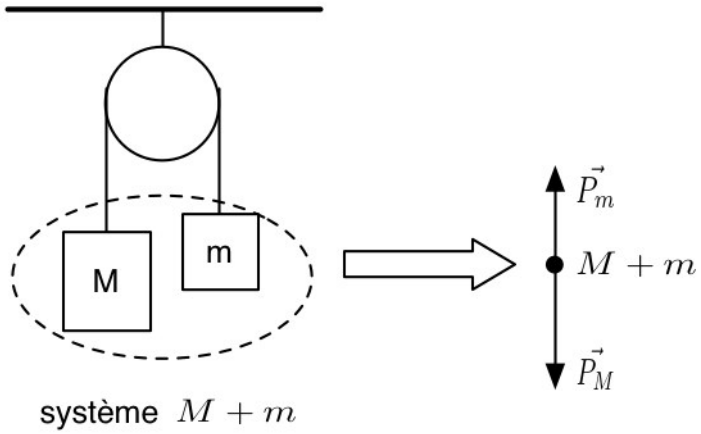


Figure 23: Définition du système et identification des forces extérieures d'après la première hypothèse

Tâche	Produits de la tâche
Tâche 2 : Définir le système	*M*+*m* -sans définir le centre de gravité des deux masses
Tâche 5 : Faire le bilan de forces appliquées au système	$\vec{P}_M$ et $\vec{P}_m$
Tâche 4: Choisir les axes du repère	Axe vertical dirigé vers le haut pour la masse m Axe vertical dirigé vers le bas pour la masse M

Tableau 8: Accomplissement de certaines tâches pour la première hypothèse

Nous travaillons en dynamique du point matériel. C'est-à-dire que l'on ne s'intéresse pas aux systèmes indéformables. Le choix du système n'est donc pas correct. Quant aux forces extérieures agissant sur ce système, il faut prendre en compte la corde qui relie les deux masses. Il doit donc y avoir une force de tension induite par les masses. Or, elle n'apparaît pas dans la résolution.

L'enseignant n'a probablement pas procédé de cette manière, car cette hypothèse de résolution n'est pas cohérente du point de vue de l'utilisation correcte du PFD.

2.1.2.2 Deuxième hypothèse sur la résolution R1

Supposons que deux masses (M et m) soient reliées par une corde inextensible et de masse négligeable, qu'elles soient posées sur une surface et qu'on néglige les frottements (Figure 24).

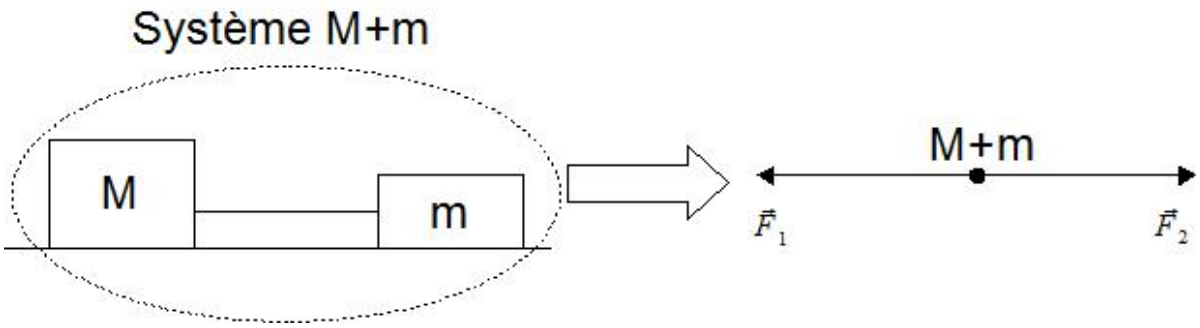


Figure 24: Analogie avec une autre situation

Le système serait indéformable lorsque la corde est tendue. Sa masse, *M+m*, est soumise aux forces extérieures appliquées au système : $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$. En faisant l'analogie avec la situation initiale, on peut écrire $\|\vec{F}_1\|=\|\vec{P}_M\|$ et $\|\vec{F}_2\|=\|\vec{P}_m\|$. Dans cette analogie, les forces de tension deviennent des forces intérieures au système. On écrit la force résultante $F_R=(M-m)g$. Les deux masses ont la même accélération *a* et on obtient $(M-m)g=(M+m)a$.

Cette hypothèse est conforme à la technique de l'utilisation du PFD. Il se peut que l'enseignant raisonne comme dans cette hypothèse. C'est probablement pour mettre en avant 2 aspects : l'inertie du système (M+m) et l'écart par rapport à la situation d'équilibre *F≠(M-m)g*. Mais l'enseignant ne décrit pas une telle stratégie.

2.1.2.3 Troisième hypothèse sur la résolution R1

On peut plus facilement résoudre le problème de la machine d'Atwood par les équations d'Euler-Lagrange (sans tenir compte de forces de tension). On écrit l'expression de Lagrange par les différences des énergies cinétiques et des énergies potentielles du système (l'ensemble des deux masses) : $L=\frac{1}{2}M\,\dot{x}^2+\frac{1}{2}m\dot{x}^2-(M-m)g$ dans le cas où on néglige l'inertie de la poulie.

Les équations d'Euler-Lagrange s'écriront :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right)-\frac{\partial L}{\partial x}=0$$

Al la fin du calcul, on obtiendra $(M-m)g=(M+m)a$.

Là encore, la stratégie n'est pas explicité. L'enseignant « *glisserait* » du champ de l'énergie vers le champ de la dynamique newtonienne sans l'expliciter. Le formalisme mathématique ne devient pas la stratégie de résolution adoptée par l'enseignant. L'étudiant ne peut faire le lien entre les relations proposées et les lois de Newton.

2.1.3 Conclusion -R1

La stratégie de l'enseignant n'est pas claire. Le formalisme mathématique utilisé dans la résolution de l'enseignant n'est pas en rapport avec la stratégie probable.
L'étudiant verrait une incohérence probable entre tâches accomplies, stratégie de l'enseignant

et cadre théorique concerné. La résolution inciterait l'étudiant, en face de cette résolution, à raisonner comme nous l'avons proposé dans l'hypothèse H1 : le système unique composé de deux masses et deux forces extérieures appliquées au système, les poids des deux masses.

2.2 Résolution R2

La résolution a été présentée dans la figure 25.

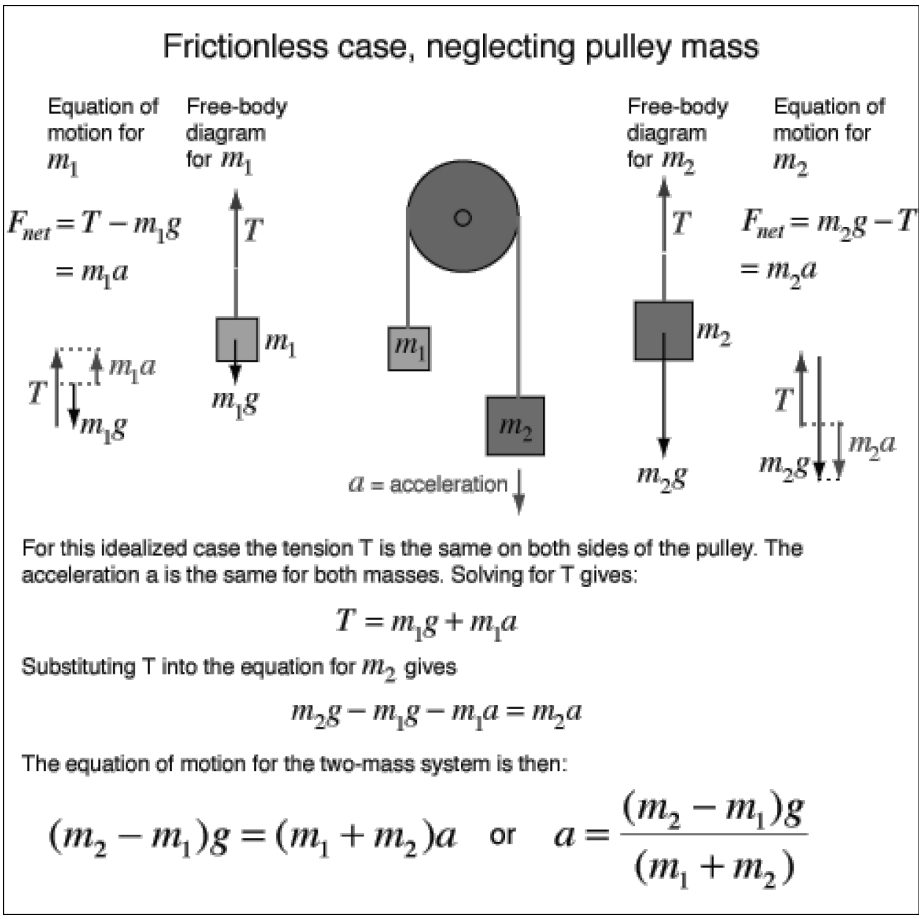


Figure 25: Résolution du problème de la machine d'Atwood trouvée sur le site internet Hyperphysics de l'université de Georgia State (protocole d'enseignement à distance aux Etats-Unis)

2.2.1 Raccourcis dans la résolution R2

Cette résolution peut être aisément rapportée à la résolution de l'expert de référence. Tous les raccourcis sont présents :

- La résolution de l'enseignant est centrée sur la résolution quantitative du problème.
- Le nombre de systèmes étudiés est minimum : la masse M et la masse m dont l'étude est régie par l'organisation du praxéologique de l'utilisation du PFD.
- Les systèmes qui ne sont pas étudiés sont totalement passés sous silence.
    - Dans le cas de la relation entre les accélérations, la tâche n'apparaît pas non

plus : la relation entre les accélérations n'est pas écrite, l'auteur utilise simplement le même symbole pour désigner le module de l'accélération de chacune des masses.
    - Pour les forces de tension, l'auteur adopte une approche non formelle dont les intrants sont vagues et incomplets.
- L'organisation praxéologique liée à l'utilisation du PFD pour les deux systèmes étudiés est très réduites :
    - la définition du référentiel d'étude n'est pas abordée (*tâche 1*)
    - les systèmes étudiés sont définis implicitement sur un schéma (*tâche 2*).
    - Le repère n'est pas défini explicitement (tâche 4). Un expert se rendra compte que le repère est différent pour les deux systèmes étudiés.
    - L'accélération n'apparaît que dans l'expression du PFD projetée sur l'axe (*tâche 3*)
    - Le bilan de forces est réduit à un schéma (*tâche 5*).
    - Il n'y a pas d'écriture vectorielle du PFD (*tâche 6*). Par contre le PFD figure sous une forme algébrique et schématique.
    - La résolution algébrique du système des deux équations établies est relativement explicite.

On peut supposer a priori que les tâches omises sont considérées par cet enseignant comme non problématiques (ne faisant pas partie du contrat didactique).

2.2.2 Conclusion -R2

Comme précédemment, cette résolution ne met en jeu que la résolution quantitative, est prédictive, et porte sur une situation déjà modélisée sans aucun lien avec une situation réelle expérimentale.

La stratégie de l'enseignant repose sur deux tâches seulement faisant référence implicitement au PFD (ce problème se trouve dans un chapitre dédié aux lois de Newton). La technique pour ces deux tâches est réduite à l'écriture de la projection du PFD. Il n'intègre pas dans sa stratégie les autres tâches qui établissent les relations entre les accélérations et les forces de tensions. La première tâche est totalement inexistante et la seconde est réduite à une approche non formelle incomplète.

La stratégie de l'enseignant est simple, mais loin de permettre un apprentissage du fonctionnement de la physique, qui est, d'après Tiberghien [4], d'analyser et d'interpréter les situations matérielles . Les faits du réel ne sont pas discutés. A quoi sert de négliger les frottements au niveau de la poulie et de la masse de la poulie ? Cela sert-il à affirmer l'égalité des forces de tension ? Ou bien à affirmer l'égalité des accélérations des masses. Cette stratégie de résolution ne permet pas de dégager des indices pour répondre.
Pour l'étudiant qui prend connaissance avec cette résolution, la stratégie de l'enseignant consiste uniquement à utiliser le PFD pour deux systèmes physiques et à résoudre un système algébrique d'équations.

2.3 Résolution R3

La résolution ci-dessous (Figure 26) a été tirée du manuel d'Alonso-Finn.
Nous ferons les remarques suivantes en ce qui concerne l'énoncé du problème :

- il manque des informations nécessaires à la résolution quantitative du problème. On ne dit rien sur les propriétés de la corde utilisée dans le dispositif. Alors que dans la résolution, l'enseignant précise que l'on suppose la corde comme inextensible.
- Le bilan de forces est déjà fait dans l'énoncé sur la figure qui représente le « réel » du dispositif de la machine d'Atwood. La figure du dispositif de la machine d'Atwood étant plus proche du réel (par rapport à celui qu'on rencontre dans la feuille du TD), il y a une confusion entre le champ du réel et le champ de la théorie.

EXEMPLE 7.5. Déterminer l'accélération avec laquelle se déplacent les masses m et m' de la Fig. 7–9. On suppose que la roue tourne sans frottement autour de O et on néglige tous les effets dus à la masse de la roue (ces effets seront considérés plus tard, au chapitre 10).

▼ Supposons que le mouvement se fasse dans la direction indiquée par la flèche, de sorte que la masse m tombe et que la masse m' s'élève. Les deux masses se déplacent avec la même accélération a si la corde est inextensible, comme nous le supposons. Une interaction s'exerce entre les masses par l'intermédiaire de la corde, et on désigne par F la force qu'elles exercent l'une sur l'autre. Le mouvement de descente de m avec l'accélération a est $mg - F = ma$, et le mouvement de montée de m' avec la même accélération a est $F - m'g = m'a$. En ajoutant les deux équations, nous éliminons F et obtenons

$$a = \frac{m - m'}{m + m'} g$$

pour valeur de leur accélération commune. La tension de la corde est alors

$$F = \frac{2mm'}{m + m'} g.$$

Un dispositif semblable à celui de la Fig. 7–9, et qu'on appelle *machine d'Atwood*, est quelquefois utilisé pour étudier les lois du mouvement uniformément accéléré. Un des avantages du système est qu'en choisissant m très voisin de m', on peut rendre très petite l'accélération a, ce qui rend plus facile l'observation du mouvement. ▲

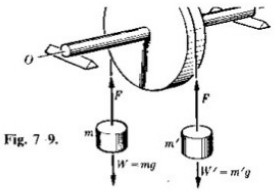


Fig. 7 9.

Figure 26: Résolution R3

2.3.1 Raccourcis dans la résolution R3

Tous les raccourcis sont présents :

- La résolution de l'enseignant est centrée sur la résolution quantitative du problème.
- Le nombre de systèmes étudiés est minimum : la masse M et la masse m dont l'étude est régie par l'organisation du praxéologique de l'utilisation du PFD.
- Les systèmes qui ne sont pas étudiés sont totalement passés sous silence.
  - La relation entre les accélérations est justifiée par une argumentation. L'enseignant est conscient qu'il est en train de faire une hypothèse. Il écrit « *les masses se déplacent avec la même accélération si la corde est inextensible*, *comme nous le supposons* ». Cette hypothèse ne modifie pas la stratégie de résolution de l'enseignant qui ne donne aucun statut hypothétique au résultat trouvé. Or, l'enseignant précise que les deux masses se déplacent avec la même accélération bien que l'accélération soit une grandeur physique vectorielle[61].
  - Dans le cas de la relation entre les forces de tension, que l'auteur définit comme « *force d'interaction que les masses exercent l'une sur l'autre* », l'enseignant fait référence, dans l'énoncé du problème, à la mécanique du solide pour rappeler

61 On ne peut pas affirmer l'égalité des accélérations des masses. Car l'accélération est une grandeur physique vectorielle. Il y a donc une erreur. Il faudrait écrire « les deux masses ont la même accélération en module et en direction mais de sens opposé.

les faits dont il faut tenir compte pour l'étude complète de la situation : « *la roue tourne sans frottement autour de l'axe de la poulie et on néglige tous les effets dus à la masse de la roue, ces effets seront abordés dans les chapitres ultérieurs.* ». Mais lors de la résolution, il ne précise pas que ces effets permettent d'affirmer l'égalité des forces de tension.

- L'organisation praxéologique liée à l'utilisation du PFD pour les deux systèmes étudiés est très réduite :
  - la définition du référentiel d'étude n'est pas abordée (*tâche 1*)
  - les systèmes étudiés sont implicitement définis (*tâche 2*) : à partir de deux équations du PFD, on déduit l'étude des deux systèmes par l'auteur.
  - Le repère n'est pas défini explicitement (tâche 4). Un expert se rendra compte que le repère est différent pour les deux systèmes étudiés.
  - Le bilan de forces est réduit à un schéma qui se trouve dans l'énoncé du problème (*tâche 5*).
  - Il n'y a pas d'écriture vectorielle du PFD (*tâche 6*).

Comme précédemment, on peut supposer a priori que les tâches omises sont considérées par l'auteur du manuel comme non problématiques (ne faisant pas partie du contrat didactique). A la fin de la résolution, on annonce le nom du dispositif, son objectif initial.

2.3.2 Conclusion -R3

Comme précédemment, cette résolution ne met en jeu que la résolution quantitative, est prédictive, et porte sur une situation déjà modélisée sans aucun lien avec une situation réelle expérimentale.

La stratégie de l'enseignant repose sur deux tâches seulement faisant référence au PFD. La technique pour ces deux tâches est réduite à l'écriture de la projection du PFD. Il n'intègre pas dans sa stratégie les autres tâches qui établissent les relations entre les accélérations et les forces de tensions.

2.4 Résolution R4

La résolution R4 est présentée dans la figure 27. Le dispositif « machine d'Atwood » est un problème à résoudre sous le rubrique « effort exercé sur un système matériel » sur le site l'Université en Ligne[62].

2.4.1 Raccourcis dans la résolution R4

Tous les raccourcis sont présents :

- La résolution de l'enseignant est centrée sur la résolution quantitative du problème.
- Le nombre de systèmes étudiés est minimum : la masse M et la masse m dont l'étude est régie par l'organisation du praxéologique de l'utilisation du PFD.
- Les systèmes qui ne sont pas étudiés sont totalement passés sous silence.

62 Pour voir le problème, entrer dans le navigateur : http://www.uelpcsm.education.fr/reference/physique/meca/index.htm ensuite cliquez sur les rubriques suivantes : S'exercer → Effort exercé sur un système matériel → Machine d'Atwood. Vous verrez l'énoncé du problème. Vous verrez également deux boutons dont « coupe de pouce » et « résolution ».

- Dans le cas de la relation entre les accélérations, la tâche n'apparaît pas non plus : la relation entre les accélérations n'est pas écrite, l'auteur utilise simplement le même symbole pour désigner le module de l'accélération de chacune des masses.
- Pour les forces de tension, l'auteur adopte une approche non formelle dont l'intrant est faux. L'auteur s'appuie sur un fait (corde inextensible) qui ne permet pas d'affirmer l'égalité des forces de tension.

1/ Comme dans les exercices précédents, écrivons la relation fondamentale de la dynamique en projection sur un axe vertical : à droite $T1 - m_2g = m_2g$ et à gauche $T2 - m_1g = m_1g$

La corde est inextensible et par conséquent $T_1 = T_2 = T$; en éliminant T entre les deux équations on trouve g :

$$\gamma = g\frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2}$$

Figure 27: Solution du problème de la machine d'Atwood sur le site de l'Université En Ligne (UEL). A noter qu'il y a des erreurs de frappes sur l'écriture de l'accélération dans les équations du PFD. Le « g » dans le membre droite des équations doit être considéré comme γ. On ne sait pas si « T_1 » est la force de tension appliquée à la masse m_2 ou m_1. Mais au-delà de ces erreurs de frappe, il y a en plus une erreur de signe dans l'une des équations du PFD, ce qui rend une résolution fausse. La résolution des équations donnera $\vec{\gamma} = -\vec{g}$.

- L'organisation praxéologique liée à l'utilisation du PFD pour les deux systèmes étudiés est très réduites :
  - la définition du référentiel d'étude n'est pas abordée (*tâche 1*)
  - les systèmes étudiés sont définis par rapport « à droite » et « à gauche » du dispositif (*tâche 2*).
  - Le repère défini est imprécis (tâche 4) : le sens de l'axe du repère n'est pas précisé.
  - L'accélération et le bilan de forces[63] n'apparaissent que dans l'expression du PFD projetée sur l'axe (*tâches 3 et 5*)
  - Il n'y a pas d'écriture vectorielle du PFD (*tâche 6*).
  - la forme projetée des équations vectorielles ne permet pas d'obtenir la solution du problème ($\|\vec{a}_M\| = \|\vec{a}_m\| = \frac{M-m}{M+m}g$).

On peut supposer a priori que les tâches omises sont considérées par cet enseignant comme non problématiques (ne faisant pas partie du contrat didactique).

2.4.2 Conclusion -R4

Comme précédemment, cette résolution ne met en jeu que la résolution quantitative, est prédictive, et porte sur une situation déjà modélisée sans aucun lien avec une situation réelle expérimentale.

63 L'enseignant fait un schéma sur lequel il fait apparaître les forces extérieures appliquées aux deux masses dans l'énoncé du problème. Sur ce schéma, on voit définit une seule force de tension (*T*) pour deux masses (Voir paragraphe V -Annexe B2).

Comme les résolutions R2 et R3, la stratégie de l'enseignant repose sur deux tâches seulement faisant référence au PFD. La technique pour ces deux tâches est réduite à l'écriture de la projection du PFD. La stratégie de l'enseignant n'inclut pas les autres tâches qui établissent les relations entre les accélérations et les forces de tensions. De plus, la proposition de la relation entre les forces de tension montre que ce n'est pas la nature de l'argument qui compte, mais le fait d'argumenter.

2.5 Résolution R5

La résolution R5 se trouve dans le corrigé de la feuille du TD de la dynamique du point matériel(Figure 28 et Figure 29). Elle est différente des autres résolutions et plus proche de la résolution de *l'Expert de Référence*.
A partir de maintenant, nous utiliserons le terme « enseignant du TD » pour désigner l'enseignant qui a effectuée la résolution R5 et avec qui nous avons travaillé pour réaliser notre expérimentation (Chapitres 6 et 7).

2.5.1 Raccourcis dans la résolution R5

Tous les raccourcis **ne sont pas présents.**
La résolution de l'enseignant n'est pas uniquement centrée sur la résolution quantitative du problème. Elle se compose de deux étapes (la résolution quantitative du problème et le contrôle de résultats).

Le nombre de systèmes étudiés est minimum : la masse M et la masse m dont l'étude est régie par l'organisation du praxéologique de l'utilisation du PFD.

Les systèmes qui ne sont pas étudiés sont totalement passés sous silence. Dans le cas de la relation entre les accélérations et les forces de tension, l'enseignant adopte une approche non formelle dont les **intrants** sont **complets**. La relation entre les accélérations est précisée sous le rubrique « *Mouvements* » et celle entre les forces de tension sous le rubrique « *Gestions des cordes et de la poulie* ». Nous étudierons les aménagements faits par l'enseignant du TD dans le paragraphe 2.5.2 ci-dessous.

L'organisation praxéologique liée à l'utilisation du PFD pour les deux systèmes étudiés est explicite réduites :

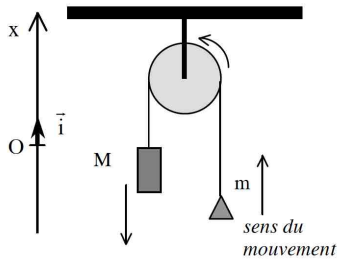
- La définition du référentiel d'étude est abordée (*tâche 1*)
- Les systèmes étudiés sont explicitement définis (*tâche 2*). L'enseignant justifie son choix d'étudier deux masses sous le rubrique « *choix des systèmes à étudier* ».
- L'accélération est écrite vectoriellement et instanciée dans le système de coordonnées choisi (*tâche 3*)

- Le repère et le système de coordonnées sont explicitement définis (tâche 4). Ils sont montrés sur le schéma et par les symboles - $R(O,\vec{i})$.
- Le bilan de forces est explicitement effectué : (*tâche 5)*
  - les catégories de forces sont évoquées (« *forces à distance* » et « *force de contact* »)

- les forces extérieures sont montrées sur un dessin à part.
- les forces extérieures sont instanciées suivant le système de coordonnées choisi

- Le PFD est écrit vectoriellement (*tâche 6*).
- Les équations vectorielles sont projetées suivant l'axe du repère choisi (*tâche 7*)

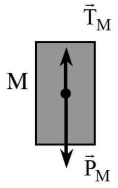
Référentiel : terrestre supposé galiléen (cf exo2)
Mouvements :
M : rectiligne, vertical, vers le bas (M est le plus lourd)
m : rectiligne, vertical, vers le haut
M et m sont liés par une corde tendue, inextensible. Donc si M descend de Δx en un temps Δt, m monte d'autant dans le même temps. Ils ont donc la même vitesse en norme et direction (sens opposé) à tout instant. La norme des vitesses variant de la même façon (les directions et sens ne changent pas), Leurs accélérations seront donc égales en norme et direction, et opposées en sens $\vec{\gamma}_M = -\vec{\gamma}_m$. *Si On note* $\gamma = \|\vec{\gamma}_M\| = \|\vec{\gamma}_m\|$ *la norme des accélérations, alors* $\vec{\gamma}_M = -\gamma\,\vec{i}$ *et* $\vec{\gamma}_m = \gamma\,\vec{i}$.



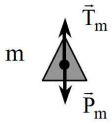
Repère : $R(O, \vec{i})$

Choix du système à étudier : Si l'on choisi {M + m} comme système, alors on écrira le Principe Fondamental de la Dynamique ***pour le centre d'inertie*** *de M et m. Comme M descend et m monte, le mouvement de leur centre d'inertie ne nous informera en rien sur le mouvement de M et celui de m. Ce système n'est donc pas intéressant (ainsi que tout autre système incluant des éléments fixes comme les poulies). Les seuls systèmes qui nous renseignent sur le mouvement de M et sur celui de m, sont respectivement {M} et {m}*

Système {M} de masse M
Forces extérieures :
A distance : Poids $\vec{P}_M = -M g_0 \vec{i}$
De contact : Tension de la corde $\vec{T}_M = \|\vec{T}_M\| \vec{i}$
PFD : $\vec{P}_M + \vec{T}_M = M\vec{\gamma}_M$
Projection sur Ox : $-M g_0 + \|\vec{T}_M\| = -M\gamma$ *(1)*



Système {m} de masse m
Forces extérieures :
A distance : Poids $\vec{P}_m = -m g_0 \vec{i}$
De contact : Tension de la corde $\vec{T}_m = \|\vec{T}_m\| \vec{i}$
PFD : $\vec{P}_m + \vec{T}_m = M\vec{\gamma}_m$
Projection sur Ox : $-m g_0 + \|\vec{T}_m\| = +m\gamma$ *(2)*



Nous avons donc un système de deux équations, (1) et (2), avec 3 inconnues γ, $\|\vec{T}_m\|$ *et* $\|\vec{T}_M\|$, *et seule γ nous intéresse.*

Gestion des cordes et de la poulie : Comme la corde est tendue, inextensible et de masse négligeable, la norme de la tension de la corde est la même sur tout le brin de corde entre M et la poulie, c'est à dire $\|\vec{T}_M\|$; *il en est de même pour la norme de la tension entre m et la poulie, qui vaut* $\|\vec{T}_m\|$. *D'autre part, si les frottements sont très faibles à l'axe de la poulie et que la poulie a une masse très faible (pas d'effort à fournir pour faire tourner la poulie), la tension de la corde sera identique de part et d'autre de la poulie. (On remarquera qu'il faut fournir un effort plus important pour mettre en rotation une poulie lourde que pour faire tourner une poulie légère).*

Figure 28: Résolution R5

En faisant toutes ces hypothèses, on peut alors écrire que la norme de la tension est la même tout le long de la corde, et que par conséquent $\|\vec{T}_m\| = \|\vec{T}_M\| = T$.

Le système a résoudre n'a plus que deux inconnues :

$$\begin{cases} -M g_0 + T = -M\gamma \\ -m g_0 + T = +m\gamma \end{cases} \qquad \text{en éliminant T, on obtient : } (M-m)\, g_0 = (M+m)\,\gamma$$

$$D'où\ \gamma = \frac{M-m}{M+m} g_0 \qquad et\ donc\ \vec{\gamma}_m = \frac{M-m}{M+m} g_0\, \vec{i} = -\vec{\gamma}_M$$

Vérifications du résultat :

- Si M = m, alors $\vec{\gamma}_m = -\vec{\gamma}_M = \vec{0}$. *D'après le principe d'inertie, les deux masses seront immobiles en équilibre si elles étaient immobiles au départ (et en mouvement rectiligne uniforme si on leur donne une vitesse au départ). Le cas de deux masses égales en équilibre, est une situation que l'on appréhende assez bien intuitivement. Envisager ce cas particulier et facile, est une manière de contrôler le résultat obtenu.*

- On constate que le signe de γ *, qui est une norme, est bien positif comme il se doit.*

A vous de contrôler :

- Envisager également le cas m=0 : que doit on obtenir intuitivement ? Est-ce cohérent avec le résultat trouvé ?

- vérifier que γ *est bien homogène à une accélération.*

- idem avec M < m . Quel est le problème ?

- Comparer γ *et* g_0 *: qu'en pensez-vous ? Quel peut être l'usage de la machine d'Atwood ?*

Prolongement : Calculer la tension de corde et comparez-la avec les poids de M et m. En reprenant les résultats de l'exercice 7, comparez les tensions de corde lorsqu'il y a ou non mouvement. Examinez le cas particulier d'un mouvement alors que M=m.

Figure 29: Suite de la résolution R5

Après la résolution quantitative du problème, l'enseignant passe à l'étape de contrôles de la solution. Dans cette étape, l'enseignant accomplit trois types de tâches « vérifier les signes des solutions », « vérifier l'homogénéité dimensionnelle des solutions », « étudier les cas limites de la situation » :

- il étudie d'abord l'un des cas limites de la situation, à savoir M=m
- il fait le contrôle du signe de l'équation obtenue
- sous la rubrique « A vous de contrôler », il demande d'abord de contrôler le résultat par
  - l'autre cas limite (m=0)
  - l'analyse dimensionnelle
- enfin, il demande de comparer l'accélération des masses avec l'accélération gravitationnelle pour donner du sens à la relation algébrique.

Nous nous intéresserons maintenant aux aménagements effectués par l'enseignant qui remplacent les organisations praxéologiques dans la résolution de *l'Expert de Référence* -organisations praxéologiques permettant d'établir les relations entre les accélérations et les forces de tension(Figure 21, pp.106).

2.5.2 Relations entre les accélérations et les forces de tension

Egalité en norme des accélérations

L'enseignant étudie le mouvement dans le dispositif et introduit la relation entre les accélérations des masses.

Dans le tableau 9, nous comparons les parties concernant l'égalité des accélérations dans la résolution de *l'Expert de Référence* et celle de l'enseignant.

L'enseignant traduit l'étude quantitative de *l'Expert de Référence* en langue naturelle :

- il ne paramètre pas la longueur de la corde (il précise que la corde est inextensible),
- il ne dérive pas la longueur de la corde afin d'obtenir la vitesse des masses, (il exprime qualitativement le déplacement des deux masses et il traduit l'expression $\vec{v_M} = -\vec{v}_m$ en langue naturelle)
- il traduit également l'expression $\vec{a_M} = -\vec{a}_m$ en langue naturelle.

Nous allons faire la même analyse pour l'égalité des forces de tensions.

Résolution de *l'Expert de Référence*	Résolution R5
l=cte	M et m sont liés par **une corde tendue, inextensible**
$l = x_M + x_m + \pi R$ $\frac{d\,x_M}{dt} = -\frac{d\,x_m}{dt} \rightarrow \vec{v_M} = -\vec{v_m}$	Donc, si **M** descend de Δx en un temps Δt, **m** monte autant dans le même temps. Ils **ont** donc **la même vitesse en norme et direction (sens opposé)** à tout instant. La norme des vitesses variant de la même façon (les directions et sens ne changent pas)
$\frac{d^2 x_M}{dt^2} = -\frac{d^2 x_m}{dt^2} \rightarrow \vec{a_M} = -\vec{a_m}$	**Leurs accélérations seront donc égales en norme et direction, et opposées en sens.**

Tableau 9: Comparaison de la résolution de l'Expert de Référence avec la résolution R5 : Etablissement des relations entre les accélérations des masses.

Egalité des forces de tension

Dans la résolution de *l'Expert de Référence*, l'égalité des tensions nécessite la mise en œuvre deux organisations praxéologiques liées à l'utilisation du PFD et à l'utilisation du théorème du moment cinétique (voir Figure 21, pp.106). L'enseignant adopte une approche non formelle dont les intrants sont complets.

Dans le tableau 10 ci-dessous, nous comparons les parties concernant l'égalité des forces de tensions dans les résolutions de l'expert de référence et de l'enseignant.

Résolution de *l'Expert de Référence*	Résolution R5
Etape 2.2.4 Utiliser le PFD pour le système « brin de corde vertical » $\vec{T} + \vec{T}' = \underbrace{dm_{corde}}_{0}\vec{a}$ $\|\vec{T}\| = \|\vec{T}'\|$ (Equation 4)	*Comme* ***la corde est tendue, inextensible et de masse négligeable, la norme de la tension de la corde est la même sur tout le brin de la corde entre M et la poulie****, c'est-à-dire* $\|\vec{T}_M\|$ *; il en est de même pour la norme de la tension entre m et la poulie, qui vaut* $\|\vec{T}_m\|$ *.*
Etape 2.2.5 Utiliser le théorème du moment cinétique pour la poulie	*[…]si* ***les frottements sont très faibles à l'axe de la poulie et que la poulie a une masse très faible*** *[…]* ***La tension de la corde***

$\underbrace{\frac{d}{dt}}_{I\ddot{\theta}\to 0}\vec{L} = \underbrace{M(\vec{T}_1)}_{rT_1} + \underbrace{M(\vec{T}_2)}_{-rT_2} + \underbrace{M(\vec{F}_{frott})}_{0}$ ↓ $T_1 = T_2$ (Equation 5)	***sera identique de part et d'autre de la poulie […]***.
$\|\vec{T}\| = \|\vec{T}_1\| = \|\vec{T}_M\| = \|\vec{T}'\| = \|\vec{T}_2\| = \|\vec{T}_m\|$ ↓ $\vec{T}_M = \vec{T}_m$ (Equation 6)	*En faisant toute ces hypothèses, on peut alors écrire que* ***la norme de la tension est la même tout le long de la corde*** *est par conséquent* $\|\vec{T}_M\| = \|\vec{T}_m\|$

Tableau 10: Comparaison de la résolution de l'Expert de Référence avec la résolution R5 : Etablissement des relations entre les tensions.

Comme nous avons constaté pour l'égalité des accélérations, l'enseignant traduit l'étude quantitative de *l'Expert de Référence* en langue naturelle.

2.5.3 Conclusion -R5

Comme les autres résolutions, cette résolution est prédictive, et porte sur une situation déjà modélisée sans aucun lien avec une situation réelle expérimentale. Mais, contrairement aux autres résolutions, elle ne met pas en jeu uniquement la résolution quantitative, elle contient une étape de contrôle de la solution.

Cette résolution met en évidence la transposition didactique opérée par l'enseignant. Il traduit avec précisions et exactitude en langue naturelle les opérations formelles de *l'Expert de Référence*. Une partie de la transposition didactique consiste dans ce cas à

- ne pas formaliser le raisonnement qui conduit à établir les relations entre les forces de tension et les accélérations,
- exprimer en langue naturelle la démarche de *l'Expert de Référence*
- éviter de traduire en langage algébrique les étapes de sa démarche.

En fait, l'enseignant du TD formule en toute rigueur une approche non formelle, étant donnée que les conditions (les intrants) sont complètes. L'enseignant est capable de démontrer que les forces de tensions exercées sur M et sur m sont égales. Mais la démonstration de cette relation est réservée à un expert, il n'est pas accessible à l'étudiant novice, qui en particulier ignore les principes de la mécanique du solide. Cela reste pour lui à l'état d'une affirmation de l'enseignant. Pour l'étudiant, cette relation ne peut donc avoir que valeur d'hypothèse. Ainsi, il ne peut percevoir précisément la signification des prémisses de cette affirmation.

2.6 Autres résolutions

Nous avons présenté et analysé 5 résolutions. Mais, nous en avons trouvé beaucoup d'autres. Nous en présentons en Annexe B2.

Par exemple, une résolution encore simplifié suit la résolution R2 sur le site appelé « Hyperphysics », donné sous la rubrique « Further Discussion ». Elle correspond à la résolution R1. L'enseignant cherche à expliquer la résolution en faisant référence à l'énergie

sans le dire. Une autre résolution trouvée dans un article scientifique publié par VanLehn [26] correspond exactement à la résolution R3 : l'auteur discute l'égalité en norme des accélérations mais il ne discute pas l'égalité des tensions, il définit une seule force de tension *T* pour deux masses.

Dans toutes ces résolutions, nous constatons l'utilisation de nombreux de raccourcis étudiés dans ce chapitre.

3 Conclusion

Nous avons fait les hypothèses suivantes lors de l'étude a priori (cf paragraphe 1) sur la résolution du problème de la machine d'Atwood par les enseignants :

Hypothèse 1 : Les résolutions classiquement proposées par les enseignants ne comportent elles aussi que la partie de résolution quantitative.

Hypothèse 2 : On peut donc s'attendre a priori à ce que les résolutions actuelles que nous allons rencontrer reposent sur des situations déjà modélisées sans lien explicite avec une situation réelle expérimentale.

Hypothèse 3 : On peut donc s'attendre à ce que les problèmes résolus par les enseignants actuels soient également dans ce même type d'approche prédictive, en particulier si l'on suppose que ce choix est fortement contraint par le paradigme de la mécanique newtonienne et son évolution.

Notre étude dans ce chapitre nous permet de conclure que

- Toutes les résolutions (ou presque) ne mettent en jeu que la résolution quantitative.
- Elles portent sur une situation déjà modélisée sans aucun lien avec une situation réelle expérimentale.
- Elles sont prédictives.

Nous validons ainsi les hypothèses émises dans l'étude a priori. Quant au rapport institutionnel des enseignants à la résolution du problème de la machine d'Atwood, ce sont plus particulièrement les intentions et les stratégies des enseignants qui déterminent le rapport institutionnel des enseignants à la résolution du problème de la machine d'Atwood. Nous développerons ci-dessous ces deux aspects.

La diversité des résolutions trouvées montre que les enseignants prennent des écarts par rapport à la résolution proposée par *l'Expert de Référence*. De tels écarts s'expliquent par la transposition didactique qui amène les enseignants à simplifier et à aménager la résolution du problème de la machine d'Atwood proposée par *l'Expert de Référence*. Et le rapport institutionnel des enseignants à la résolution du problème de la machine d'Atwood– R_I*(Ens, RMA)*- n'est pas celui de *l'Expert de Référence – R(ExpRef, RMA)*.

Dans les résolutions proposées, l'une des intentions des enseignants est identique à celle de *l'Expert de Référence* (intention scientifique) : ils cherchent tous les deux à se placer dans une perspective de prévision de l'accélération des deux mobiles, dont la valeur algébrique sera exprimée en fonction de l'accélération de la pesanteur. *L'expert de Référence* et l'enseignant supposent que la valeur prévue sera proche des résultats expérimentaux.

Cette intention est une contrainte tellement importante que les auteurs (des résolutions) n'imaginent pas qu'il puisse exister dans la stratégie de résolution des étapes dans laquelle il est fait appel à un raisonnement autre que déductif. Ainsi, lorsque certains enseignants se voient acculer de proposer une relation qui n'est pas issue d'une démonstration, il préfère occulter le raisonnement qui leur permet de l'obtenir ; ils préfèrent ne pas fournir d'explication et présenter la relation comme allant de soi.
Cette intention de prévision est intégrée par l'enseignant comme elle l'est par *l'Expert de Référence*. Mais *l'Expert de Référence* a les moyens de ses ambitions : il peut mobiliser tous les concepts, les lois et les principes dont il a besoin et les traduire sous forme de relations algébriques.

La deuxième intention des enseignants (intention pédagogique -1) est donc de présenter aux étudiants une démarche qui soit la plus proche possible de celle de l'expert. Ainsi, aucun auteur n'envisage par exemple de présenter la relation entre les forces de tension comme hypothétique, puis de vérifier que son expression algébrique est compatibles tout d'abord avec cette hypothèse et ensuite avec la valeur des deux tensions dans les cas limites : où m=M ou m=0 et M non nulle.

L'enseignant a une autre contrainte qui entraîne des intentions complémentaires (intention pédagogique 2). La nécessité de transposition didactique est perçue par l'enseignant, qui est conscient de l'impossibilité d'effectuer une résolution exhaustive du problème. Cette intention se traduit chez les enseignants par une volonté de simplification qui va à l'encontre des intentions précédentes. Ces intentions apparaissent incompatibles. Par exemple, l'égalité des tensions n'est pas démontrée et elle ne peut être que justifiée, alors toutes les propriétés de la corde sont évoquées. Et ce n'est plus la nature de l'argument qui compte, mais le fait d'argumenter. On est très loin de la démarche formelle de l'expert, démarche souhaitée par l'enseignant.

Les choix effectués et la stratégie qui en résulte ne sont pas explicités par l'enseignant à l'étudiant au cours de la correction tant est forte la contrainte qui veut que la seule utilisation des principes doit conduire au résultat. Même, dans la résolution R5, qui était différente des autres résolutions (elle est plus détaillée et structurée que les autres résolutions), l'enseignant s'appuie sur le cadre théorique de la mécanique du solide sans l'expliciter. L'enseignant cherche à donner l'impression qu'il s'appuie sur des principes même si ceux-ci sont inconnus des étudiants.

Ainsi, les enseignants donnent l'impression que la résolution se compose uniquement de parties déductives (la mise en œuvre des organisations praxéologiques liées aux principes physiques), les parties où l'on utilise de manière algorithmique les principes. C'est la référence de l'enseignant. En réalité, dans les résolutions proposées par l'enseignant, il y a formellement deux parties : une partie algorithmique et une partie qui ne l'est pas. Pour l'enseignant, la partie non algorithmique est une traduction langagière de la résolution algorithmique de *l'Expert de Référence*. Pour l'étudiant, la relation proposée reste hypothétique et surtout il ne peut percevoir la cohérence entre la stratégie de résolution et les intentions de l'enseignant.

L'ensemble des tâches peut retrouver une cohérence si la relation établie entre les tensions est présentée comme hypothétique et si l'établissement de la relation est suivie par une activité de contrôle et si l'enseignant considère que la transposition didactique

- ne se limite pas à présenter des raccourcis
- implique une modification de la stratégie de résolution
- suppose une présentation explicite de la différence entre les intentions et la stratégie de l'expert et celles de l'enseignant.

Ainsi, pour être cohérent, l'enseignant devrait présenter la stratégie de résolution avec ses deux types de phases – la partie algorithmique et la partie hypothétique- et un prolongement : à l'issue des phases de résolution du système d'équation devrait se greffer une partie qui permet la discussion de la pertinence des hypothèses effectués (Figure 30). En l'absence de cette présentation, nous pouvons prévoir de nouvelles difficultés pour les étudiants (Chapitres 6 et 7) :

- difficultés pour décoder les intentions des enseignants
- difficultés pour donner une cohérence à la stratégie de l'enseignant.

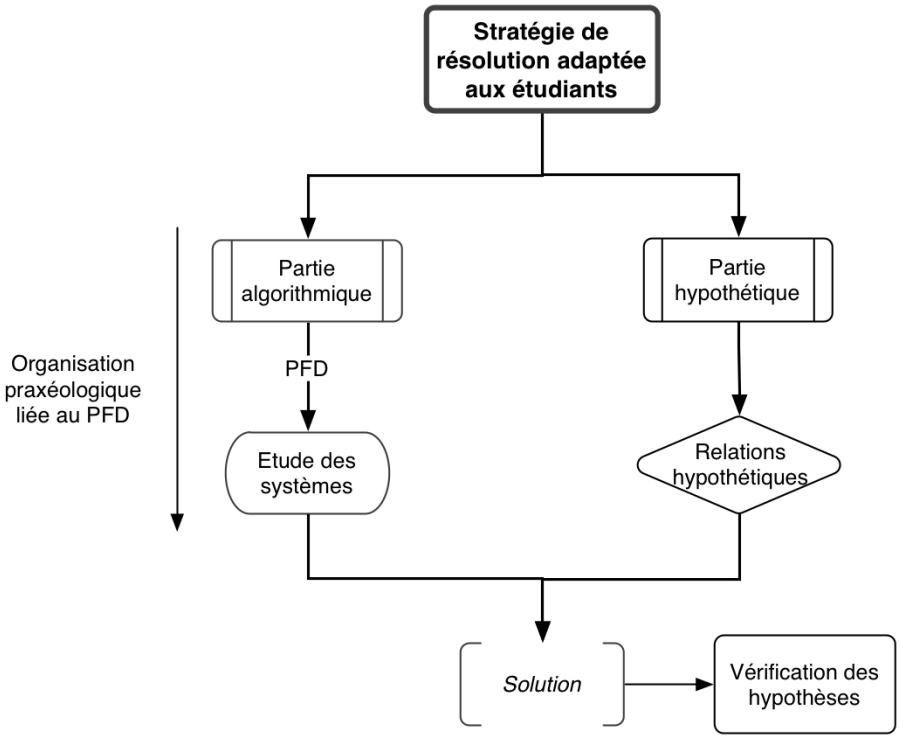


Figure 30: Stratégie de résolution adaptée aux étudiants pour la résolution du problème de la machine d'Atwood

Chapitre V

Rapport institutionnel des enseignants aux difficultés et aux besoins des étudiants

Chapitre V Rapport institutionnel des enseignants aux difficultés et aux besoins des étudiants

Dans le chapitre précédent (Chapitre 4), nous avons mis en évidence le rapport institutionnel des enseignants à la résolution du problème de la machine d'Atwood à travers l'étude des résolutions de ce problème proposées par les enseignants dans divers contextes. Nous allons adapter un point de vue complémentaire à ceux présentés aux chapitres précédents (Chapitres 3 et 4). Ainsi, nous compléterons notre étude portant sur les enseignants et dans le chapitre suivant (Chapitre 6), nous passerons à l'étude du rapport personnel des étudiants à la résolution du problème de la machine d'Atwood.

Notre étude bibliographique sur les résolutions de problèmes montre que de nombreux chercheurs en didactique insistent sur le fait que les étudiants ont des difficultés lors de la résolution « quantitative » du problème et qu'ils ont besoin des aides méthodologiques pour résoudre les problèmes (voir paragraphe 2 au chapitre 1). Les chercheurs en didactique donnent une importance à une étape de construction et de la mise en place de la procédure de la résolution. Certains chercheurs, comme Reif [7] proposent d'expliciter les procédures de la résolution.

L'étude de ce chapitre porte sur les méthodes de résolution proposées par les enseignants. Nous utiliserons le terme « méthode » dans le sens suivant. Une méthode[64] « *répond à une question pratique : comment faire, quoi entreprendre afin d'atteindre un but donné ; elle permet de dériver des résultats de même forme à partir des propriétés communes* ». Une méthode est aussi « *un algorithme défini préalablement aux questions d'une classe donnée, et qui, à toute question de classe, fournit, au bout d'un nombre fini d'étapes, une solution soit par une réponse affirmative ou négative, soit par le calcul d'une valeur numérique* »[61].

Pour la recherche des méthodes de résolution proposées aux étudiants, nous nous sommes référés à la feuille du TD de la mécanique du point matériel utilisé en première année universitaire de l'Université Joseph Fourrier et aux plusieurs manuels de la mécanique du point matériel de diverses maisons d'édition[65]. Dans ce chapitre, nous nous centrerons sur la feuille du TD et sur le manuel de Bréal 2003 [67].

Nous avons vu à partir de l'étude des manuels que les enseignants proposent parfois des conseils (indices) dans l'énoncé de certains problèmes. Ces conseils sont, la plupart du temps, un rappel de tâches à accomplir de la technique de l'utilisation du PFD (Annexe B3,

64 A l'origine, le mot "méthode", *d'origine grecque, signifie chemin, celui tracé à l'avance, qui conduit à un résultat. [61]*.

65 Ces manuels sont : dont

- les manuels de la maison d'édition Bréal : Bréal 1985 [65], Bréal 1996 [66], Bréal 2003 [67], Bréal 2005 [68]
- ceux d'Ellipses : Ellipses 2000 [63], Ellipses 2005 [64]
- les manuels de PUF : Puf 2000 [69],
- celui deVuibert : Nickel 1997 [62],
- celui de Dunod : l'ouvrage de Alonso-Finn [58].

paragraphe I.1). L'enseignant peut aussi renvoyer l'étudiant, à l'aide d'une conseil, au cours théorique (Annexe B3, paragraphe I.2). Quand nous avons regardé les autres indices données dans les énoncés de problèmes, nous avons eu l'impression que « donner un indice aux étudiants » ne relève pas souvent d'un choix stratégique. Par exemple, pour la résolution du problème de la machine d'Atwood que nous avons trouvée sur le site de l'UEL (résolution R4 analysée au chapitre 4), on donne l'indice suivant : « appliquer deux fois le PFD » (voir paragraphe 1.3 – Annexe B3). Certes, l'indice « appliquer deux fois le PFD » peut aider l'étudiant pour définir deux systèmes. Mais la difficulté principale des étudiants ne proviendrait-elle que du choix du système ? On pourrait proposer d'autres indices : par exemple l'égalité des forces de tension appliquées aux deux masses, ou l'égalité en norme des accélérations des deux masses, aider à l'accomplissement des tâches (fixer par exemple le repère et demander de projeter chacun des vecteurs par rapport à ce repère, …). C'est la raison pour laquelle nous ne développerons pas plus les indices donnés aux étudiants dans ce chapitre et nous nous centrerons sur les méthodes de résolution. .

1 Méthodes de résolution dans l'enseignement de la dynamique du point matériel

Avant de présenter les méthodes de résolution, nous voulons souligner quelques changements intervenus par rapport aux méthodes de résolution. Ensuite, nous présenterons les méthodes de résolution trouvées dans *le manuel de Bréal 2003* [67] *et* dans la feuille de TD.

1.1 Changement des noms de manuels

L'usage du mot « méthode » est devenu fréquent dans les manuels récemment parus. Par exemple, le manuel publié en 1985 dans la collection « *Précis* » de Bréal [65] est intitulé « *Mécanique : Cours et exercices résolus* », tandis que le manuel publié en 2003 dans la collection « *Les Nouveaux Précis* » de Bréal [67] est intitulé « Mécanique du point : Cours, ***Méthodes*** et Exercices ».

Quand on regarde les autres manuels, on voit aussi ce changement. Par exemple, le manuel de mécanique du point matériel dans la collection « taupe niveau » publié en 2000 par la maison d'édition « Ellipses » est intitulé « Mécanique newtonienne du point : Exercices corrigés » [63]. Alors que le manuel publié dans la même collection par la maison d'édition « Ellipses » 5 ans après (en 2005) est intitulé « Mécanique : ***Fiches***, ***Méthodes*** et Exercices corrigés » [64].

1.2 S'agit-il du changement de la stratégie des enseignants dans les dernières décennies ?

Nous présenterons ci-dessous deux résolutions d'un même problème aussi connu que la machine d'Atwood : c'est la résolution du problème « plan incliné ». Un objet de masse M glisse sur un plan incliné (avec ou sans frottement). On demande d'écrire l'équation du mouvement.

Les résolutions sont tirées des deux manuels publiés dans les mêmes collections chez la même maison d'édition, mais de dates différentes. Il s'agit des collections « Précis » et « Les Nouveaux Précis » de la maison d'édition « Bréal ». Le premier manuel date de 1985 [65],

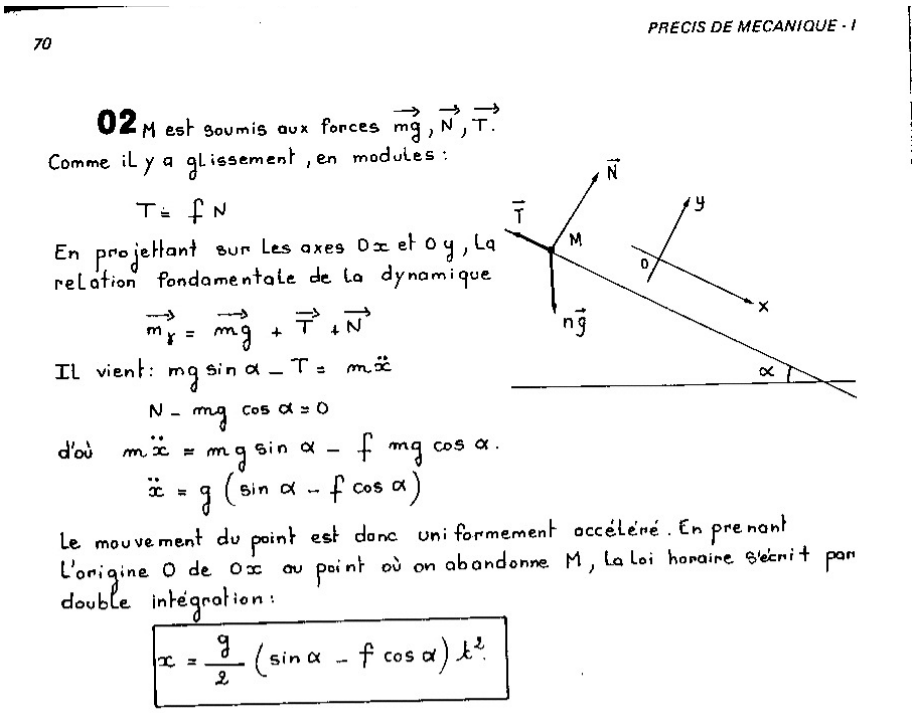
tandis que le deuxième, le plus récent, date de 2003[67].

La résolution du problème « plan incliné » dans le manuel de Bréal 1985 [65] est présentée dans la figure 31 et celle dans le manuel de Bréal 2003 est présentée dans la figure 32.

Nous soulignons aussi les évolutions entre 2 éditions :

- la deuxième édition est plus explicite que la première.
- les tâches effectuées sont nommées et annoncées, par exemple « système: », « référentiel: »,…
- les grandes lignes de la résolution sont numérotées, notamment : le système, le référentiel, le bilan de forces, l'écriture vectorielle du PFD, la projection du PFD[66].

Rappelons la résolution R5 analysée dans le chapitre 4 (voir paragraphe 2.5 au chapitre 4). L'enseignant résolvait de la même manière que l'auteur du manuel qui fait la résolution du plan incliné ci-dessus. Les changements entre deux résolutions (Figure 31 et Figure 32) sont liés à l'usage d'une méthode de résolution qui oblige l'auteur de la résolution dans la figure 32 à accomplir de manière explicite les tâches de la technique de l'utilisation du PFD.



70 PRECIS DE MECANIQUE - I

02 M est soumis aux forces $\overrightarrow{mg}$, $\overrightarrow{N}$, $\overrightarrow{T}$.
Comme il y a glissement, en modules :

$T = fN$

En projetant sur les axes Ox et Oy, la relation fondamentale de la dynamique

$\overrightarrow{m_{\mathcal{R}}} = \overrightarrow{mg} + \overrightarrow{T} + \overrightarrow{N}$

Il vient: $mg\sin\alpha - T = m\ddot{x}$

$N - mg\cos\alpha = 0$

d'où $m\ddot{x} = mg\sin\alpha - fmg\cos\alpha$.

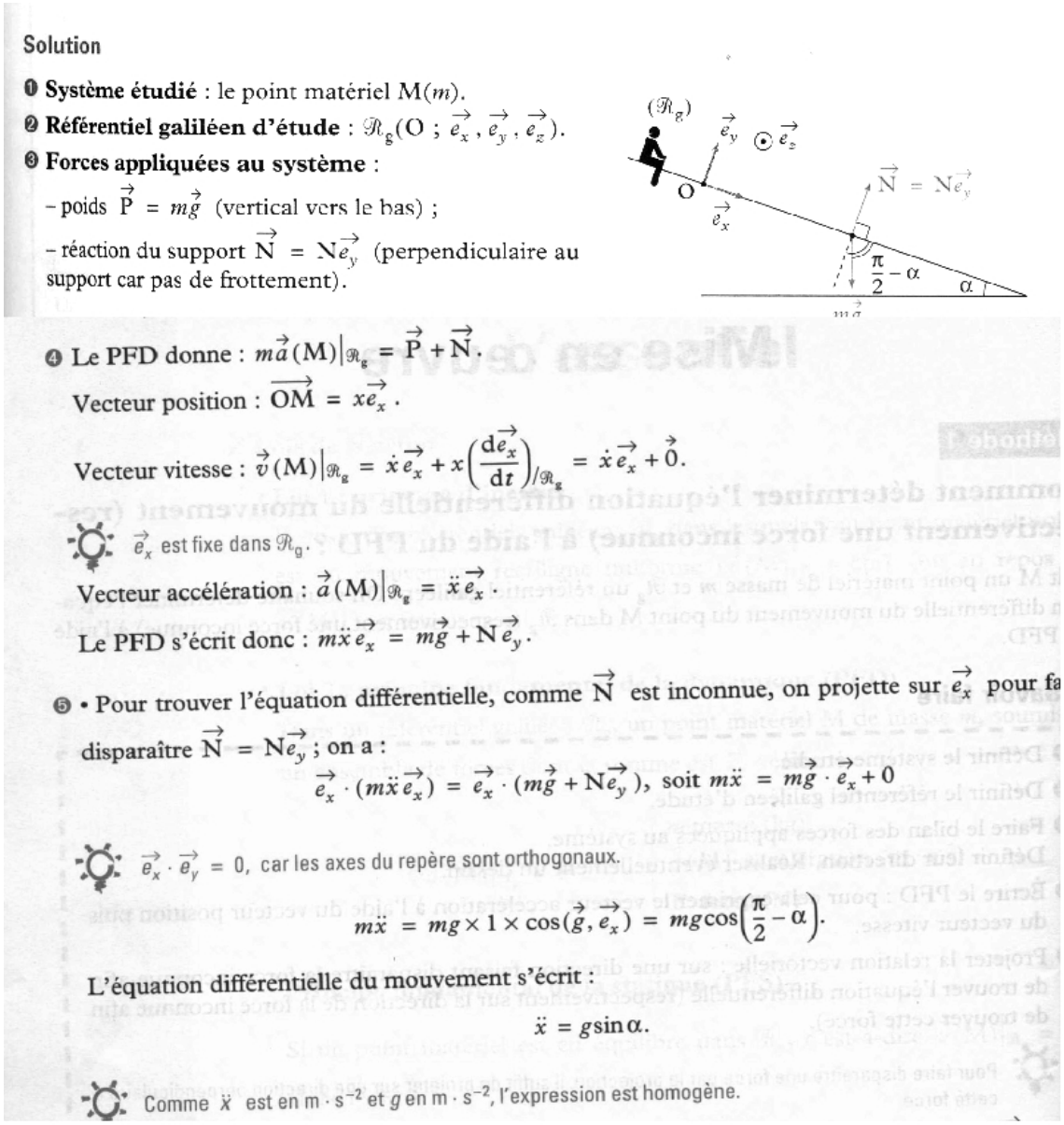
$\ddot{x} = g(\sin\alpha - f\cos\alpha)$

Le mouvement du point est donc uniformement accéléré. En prenant l'origine O de Ox au point où on abandonne M, la loi horaire s'écrit par double intégration :

$$x = \frac{g}{2}(\sin\alpha - f\cos\alpha)t^2$$

Figure 31: Résolution du problème « plan incliné » tirée du manuel Bréal 1985 [65]

66 Il y a aussi un autre changement entre deux résolutions : le contrôle de résultats. On vérifie, à plusieurs occasions, l'homogénéité des expressions calculées.



Solution

❶ **Système étudié** : le point matériel M(m).

❷ **Référentiel galiléen d'étude** : $\mathcal{R}_g(O ; \vec{e_x}, \vec{e_y}, \vec{e_z})$.

❸ **Forces appliquées au système** :

– poids $\vec{P} = m\vec{g}$ (vertical vers le bas) ;

– réaction du support $\vec{N} = N\vec{e_y}$ (perpendiculaire au support car pas de frottement).

❹ Le PFD donne : $m\vec{a}(M)|_{\mathcal{R}_g} = \vec{P} + \vec{N}$.

Vecteur position : $\overrightarrow{OM} = x\vec{e_x}$.

Vecteur vitesse : $\vec{v}(M)|_{\mathcal{R}_g} = \dot{x}\vec{e_x} + x\left(\frac{d\vec{e_x}}{dt}\right)_{/\mathcal{R}_g} = \dot{x}\vec{e_x} + \vec{0}$.

$\vec{e_x}$ est fixe dans $\mathcal{R}_g$.

Vecteur accélération : $\vec{a}(M)|_{\mathcal{R}_g} = \ddot{x}\vec{e_x}$.

Le PFD s'écrit donc : $m\ddot{x}\vec{e_x} = m\vec{g} + N\vec{e_y}$.

❺ • Pour trouver l'équation différentielle, comme $\vec{N}$ est inconnue, on projette sur $\vec{e_x}$ pour fa

disparaître $\vec{N} = N\vec{e_y}$; on a :

$$\vec{e_x} \cdot (m\ddot{x}\vec{e_x}) = \vec{e_x} \cdot (m\vec{g} + N\vec{e_y}), \text{ soit } m\ddot{x} = m\vec{g} \cdot \vec{e_x} + 0$$

$\vec{e_x} \cdot \vec{e_y} = 0$, car les axes du repère sont orthogonaux.

$$m\ddot{x} = mg \times 1 \times \cos(\vec{g}, \vec{e_x}) = mg\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right).$$

L'équation différentielle du mouvement s'écrit :

$$\ddot{x} = g\sin\alpha.$$

Comme $\ddot{x}$ est en m · s^{-2} et g en m · s^{-2}, l'expression est homogène.

Figure 32: Résolution du problème du plan incliné dans le manuel Bréal 2003 [67]

1.3 Présentation des méthodes de résolution

A la suite de notre étude, nous nous limiterons à la présentation et l'analyse de deux méthodes de résolution :

- la méthode de résolution trouvée dans le manuel *Bréal 2003 [67]* (***MR-Bréal 2003)***[67]
- *la méthode utilisée* à l'UJF (***MR-UJF)***.

Les deux méthodes sont présentées dans les figures 33 et 34.

67 Il existe un autre manuel publié par Bréal (Bréal 2005 [68]) qui s'adresse aux étudiants de terminale où on trouve une méthode de résolution pour la résolution de problèmes de dynamique du point. Cette méthode de résolution a été présentée dans l'annexe (Annexe C3, paragraphe II.2).

Mise en œuvre

Méthode 1

Comment déterminer l'équation différentielle du mouvement (respectivement une force inconnue) à l'aide du PFD ?

Soit M un point matériel de masse m et $\mathcal{R}_g$ un référentiel galiléen. On souhaite déterminer l'équation différentielle du mouvement du point M dans $\mathcal{R}_g$ (respectivement une force inconnue) à l'aide du PFD.

→ Savoir faire

❶ Définir le système étudié.
❷ Définir le référentiel galiléen d'étude.
❸ Faire le bilan des forces appliquées au système.
Définir leur direction. Réaliser éventuellement un dessin.
❹ Écrire le PFD : pour cela exprimer le vecteur accélération à l'aide du vecteur position puis du vecteur vitesse.
❺ Projeter la relation vectorielle : sur une direction faisant disparaître la force inconnue afin de trouver l'équation différentielle (respectivement sur la direction de la force inconnue afin de trouver cette force).

Pour faire disparaître une force par la projection, il suffit de projeter sur une direction perpendiculaire à cette force.

Figure 33: Méthode de résolution proposée dans le manuel Bréal 2003 [67]

RÉSOUDRE UN PROBLÈME DE DYNAMIQUE

A- Définir le référentiel, le(s) système(s) à étudier.

Pour chaque système :
B- Identifier et faire la liste des forces extérieures appliquées au système.

C- Ecrire la relation fondamentale de la dynamique.

D- A quel type de mouvement a-t-on à faire? En conséquence choisir le repère et le système de coordonnées les plus appropriés.

E- Dans ce système de coordonnées, exprimer les vecteurs position, vitesse et accélération, puis les conditions initiales.

F- Ecrire l'expression de chaque force dans ce même système de coordonnées.

G- Repérer parmi toutes les expressions (écrites en E et F), les variables connues, inconnues et demandées.

H- Projeter la relation fondamentale suivant les axes du repère choisi. S'il est bien choisi, la projection permet de séparer les forces inconnues des forces connues.

I- Résoudre les équations différentielles du mouvement. Exprimer les coordonnées du système en fonction du temps et des données du problème (équations du mouvement).

J- Si vous n'avez utilisé qu'une (ou deux) des trois équations obtenues par projection de la relation fondamentale (H) pour trouver la (ou les) équation(s) du mouvement, vous allez pouvoir utiliser la (ou les) équation(s) restante(s) avec le résultat obtenu en (I) pour déterminer les caractéristiques des forces inconnues.

FAIRE UN (ou plusieurs) **DESSIN**

Figure 34: Méthode de résolution utilisée à l'UJF

Dans le manuel de Bréal, chaque chapitre se compose de trois grandes lignes : cours

théorique, méthodes et essentiel, exercices. On donne une grande importance aux méthodes. On précise dans la préface que

> *«… les pages Méthodes contiennent deux rubriques indispensables à la progression personnelle : l'Essentiel permet de mémoriser rapidement tout ce qu'il faut retenir du chapitre , et la Mise en œuvre expose les grandes méthodes afin d'acquérir les bons « réflexes » en situation ».*

Dans le manuel de Bréal, les méthodes se trouvent après la partie « cours théorique » et avant les « exercices corrigés ». Une application succède la présentation de la méthode (la résolution du problème du plan incline présentée dans la figure 32).
La méthode se compose de trois partie :

- le titre est une question et donné par des caractères en gras. Le titre de la méthode est le type de tâches pour lesquels on décrit une organisation praxéologique liée à l'utilisation du PFD.
- l'objectif de la méthode succède au titre. L'objectif de la méthode est une justification partielle de la technologie de la technique concernée.
- les tâches sont données dans le cadre intitulé "savoir-faire" et elles sont numérotées.

La méthode utilisée à l'UJF a été proposée par un enseignant[68] et n'est pas une exigence de l'institution. L'enseignant en fait usage personnellement et la méthode se trouve derrière la feuille du TD. Elle contient plus d'étapes que les deux autres méthodes (10 étapes). Les étapes sont désignées par des lettres[69].

2 Analyse des méthodes de résolution

En nous appuyant sur les méthodes présentées et sur les résultats des interviews effectuées avec l'enseignant du TD et l'auteur du manuel, nous chercherons à répondre aux questions suivantes :

- Qu'est-ce qu'une méthode de résolution ?
- Pourquoi proposent-t-ils des méthodes de résolution ?
- Quels usages font-ils des méthodes dans les résolutions de problèmes ?
- Quelles sont les contraintes et difficultés générées par l'emploie de méthodes de résolution ?

2.1 Qu'est-ce qu'une méthode de résolution ?

Une méthode de résolution décrit *à l'échelle globale* comment résoudre un problème de dynamique du point. Autrement dit, une méthode de résolution explicite un certain nombre de tâches à accomplir dans une organisation praxéologique physique donnée (dans le cas présent le PFD)[70]. De ce point de vue, une méthode de résolution peut être considérée comme un algorithme (partiel ou complet) à suivre lors de la résolution de problèmes de la dynamique du

68 Le même enseignant propose d'autres méthodes de résolution pour la résolution de problèmes par la conservation de la quantité de mouvement et par l'énergie (Annexe B3, paragraphe III.2).

69 Il y a aussi des étapes non énumérées. Par exemple, on demande de faire des dessins sans qu'on n'énumère. Cela est fort probablement lié au fait que le dessin intervient à plusieurs niveaux dans la résolution. On fait des dessins pour montrer le(s) système(s) défini(s), pour analyser le mouvement, pour définir les axes du repère, pour faire apparaître les forces extérieures appliquées au système, …

70 On préfère souvent présenter les méthodes de résolution sous forme d'étapes et on numérote chaque étape dans le but de rendre la méthode plus compréhensible, plus mémorisable, donc plus efficace.

point matériel. Dans le tableau 11 ci-dessous, nous avons rassemblé les tâches conseillées aux étudiants dans deux méthodes afin de montrer cet aspect.

Etapes de la méthode MR-Bréal 2003	Tâches de la technique de l'utilisation du PFD	Etapes de la méthode MR-UJF	Tâches de la technique de l'utilisation du PFD
1	2	A	1 et 2
2	1 et 4	B	5
3	5	C	6
4	3 et 6	D	4
5	7	E	3
		F	3
		G	8
		H	7
		I, J	8

Tableau 11: Identification des tâches conseillées dans les méthodes de résolution. Les tâches de la technique de l'utilisation du PFD sont données au paragraphe 5.2.2.1 du chapitre 2.

Par sa définition (une méthode contient un nombre fini d'étapes), on ne peut pas expliciter toutes les tâches nécessaires à la résolution dans une méthode ni les techniques associées à chacune des tâches données dans la méthode.

2.1.1 MR-Bréal 2003

La méthode MR-Bréal 2003 contient les tâches sur la discussion des conditions d'utilisation du principe (PFD) et celles sur la construction de la relation algébrique de la technique de l'utilisation du PFD. La partie « résolution des équations » n'est pas détaillée. Elle est limitée à la tâche de la projection (Etape 5 de de la méthode MR-Bréal 2003). Dans cette étape, les auteurs donnent une technique particulière pour la projection des équations. Il s'agit de projeter l'équation vectorielle suivant l'axe perpendiculaire à une force inconnue que l'on veut faire disparaître pour résoudre l'équation.
Dans le chapitre de la dynamique du point matériel, les auteurs du manuel propose aux étudiants 10 exercices à résoudre et dans 8 exercices sur 10[71], les forces inconnues interviennent et on les fait disparaître par la technique de projection décrite ci-dessus (voir paragraphe IV, Annexe B3).

Dans les corrigés, les auteurs du manuel respectent l'ordre d'exécution des étapes de la méthode de résolution. Ceci est visible dans la résolution du problème de « plan incliné » présentée dans la figure 32. Cet ordre de l'accomplissement des tâches est bien respecté dans toutes les résolutions des autres problèmes de dynamique du point matériel (voir paragraphe IV – Annexe B3).

Cette méthode convient particulièrement aux problèmes de dynamique du point matériel

71 Dans le manuel, un exercice est centré sur l'analyse dimensionnelle d'une expression donnée. Dans l'autre exercice il ne s'agit pas de forces inconnues à faire disparaître par la projection.

quand on a un seul système d'étude possible et quand il est possible de faire disparaître une (force) inconnue par projection sur l'axe perpendiculaire à celle-ci.

2.1.2 MR-UJF

Quant à la méthode MR-UJF, elle contient les trois catégories de tâches : les tâches sur la discussion de condition d'utilisation du principe, celles sur la construction des relations algébriques et celles sur la gestion des systèmes d'équations. Comme précédemment, l'enseignant décrit la technique de certaines tâches accomplies pour utiliser le PFD. Par exemple, dans l'étape C de la méthode MR-UJF, on précise que l'analyse du mouvement permet de choisir les axes du repère et le système de coordonnées les plus appropriés. Dans l'étape I de la même méthode, on explique comment résoudre les équations différentielles du mouvement en disant : « *Exprimer les coordonnées du système en fonction du temps et des données du problème (équations temporelles du mouvement) ».*
Nous voulons attirer plus d'attention sur l'étape G de la méthode. C'est une tâche de l'algèbre qui amène à étudier les autres systèmes suivant les organisations praxéologiques dans le cas de la résolution du problème de la machine d'Atwood par *l'Expert de Référence* ou à argumenter de manière non formelle les relations entre accélérations et forces de tension dans le cas des résolutions de ce problème par les enseignants. La technique liée à cette tâche est uniquement limitée par la projection des équations vectorielles afin de faire disparaître les inconnues (souvent les forces) dans les équations. Aucune autre technique qui doit relever, pour les étudiants, d'une partie non algorithmique et hypothétique n'est décrite dans cette méthode.

L'enseignant du TD accomplit de manière explicite les tâches de la technique de l'utilisation du PFD dans ses résolutions (comme nous l'avons vu dans sa résolution de la machine d'Atwood, la résolution R5 au chapitre 4), même si l'ordre d'accomplissement des tâches n'est pas celui de la méthode de résolution (paragraphe V – Annexe B3). Par exemple, dans la résolution du problème de la machine d'Atwood par cet enseignant, l'enseignant définit d'abord le référentiel (étape A, MR-UJF), puis il fait l'analyse du mouvement (étape D, MR-UJF). Il choisit les axes du repère et le système de coordonnées (étape D, MR-UJF). Il définit les systèmes à étudier (étape A, MR-UJF). L'étape C de la méthode (écriture du PFD) est une tâche accomplie dans la résolution après le bilan de forces (qui correspond à l'étape F de la méthode).
Ainsi, la méthode permet de mémoriser les tâches à effectuer plus qu'on les ordonne de manière stricte. L'enseignant prend des libertés pour montrer que l'utilisation de la méthode est moins contraignante que ce qui est annoncé.

2.2 Comment les méthodes ont-elles été créées ?

L'enseignant du TD et l'auteur du manuel se place sur le même plan pour la préparation des méthodes de résolution. Tous les deux cherchent à expliciter et organiser l'organisation praxéologique liée au PFD.

L'enseignant du TD évoque l'organisation des conseils donnés aux étudiants (qui sont les tâches à accomplir pour résoudre en général les problèmes de dynamique du point matériel) et leur impact sur la résolution de problèmes de mécanique par les étudiants :

> *Je donnais [aux étudiants] un certain nombre de conseils[72], j'ai décidé de les organiser. […] J'ai fait une première tentative d'écriture et puis je l'ai essayée sur des problèmes. Et ça m'a paru extrêmement intéressant. Donc ça m'a permis aussi d'affiner cette méthode. (lignes 6-10, Annexe B4)*

L'auteur du manuel se réfère à la recherche de «points communs » entre les problèmes posées en dynamique du point matériel. Voici ce qu'en dit l'auteur du manuel :

> *on a dégagé les points communs dans un certain nombre d'exercices, on a essayé de les classer. » (Lignes 4-6, Annexe B5)*

2.3 Pourquoi propose-t-on des méthodes ?

Une méthode de résolution peut être conçue à l'initiative personnelle d'un enseignant (dans le cas de la MR-UJF) ou bien ce peut être une exigence de la part de l'institution (maison d'édition) -comme dans les manuels de Bréal.

Enseignant du TD

L'enseignant du TD a proposé la méthode MR-UJF pour

- répondre aux difficultés et aux besoins des étudiants dans la résolution de problèmes *(lignes (lignes 4-11 et 24-25, Annexe B4)*
- mieux rendre compte de leur difficultés *(lignes 50-52, Annexe B4)*
- donner une référence et une structure aux étudiants

Voici ce qu'en l'enseignant du TD :

> *Bien qu'il y ait une méthode, souvent elle est complètement implicite. Ce n'est pas souvent une obligation de l'avoir explicitée et écrite. Et je me suis dit : je suis un fil. Et j'ai voulu l'expliciter pour pouvoir donner une référence et une structure aux étudiants.(lignes 354-357, Annexe B4)*

Auteur du manuel

L'intention de l'auteur du manuel de proposer des méthodes de résolution provient :

- des exigences de la maison d'édition[73] et des étudiants de classe préparatoire (*ligne 31, Annexe B5).*
- du travail « d'enseignement » de l'enseignant *(lignes 117-120, Annexe B5)*
- du niveau de connaissances acquises des étudiants actuels.

présentation de méthodes est aussi liée aux attentes des étudiants de classe préparatoire :

> *« l'étudiant, même en classe préparatoire, attend qu'on on lui dise : voilà si tu apprends ça, ça va marcher dans tous les cas. Il n'y aura pas de problème. Forcément, à partir du moment où on décide de faire des méthodes, pour lui, ça va être vraiment quelque chose de positif. On va résoudre sûrement certaines natures de questions que les étudiants posent habituellement. C'est-à-dire mon professeur a fait 20 exercices dans cette fiche de TD. Comment résout-il ? Il faut que j'apprenne pour le devoir.* (*lignes 47-53, Annexe B5*)

Il considère même les méthodes de résolution comme outil pour compenser le niveau des

72 « Les conseils » évoquées par l'enseignant sont présentés dans l'Annexe B3, paragraphe III. Il s'agit de la forme primitive de la méthode MR-UJF actuellement utilisée.

73 (Lignes 33-35, Annexe B5)

étudiants :

> *A mon avis le problème est que, en même temps on leur donne des moyens facilitant les résolutions des exercices, en même temps on constate qu'ils font de moins en moins de physique. Ils ont de plus en plus de mal. On essaie de compenser en leur apportant des outils facilitant leur vie sachant que, les étudiants ont moins de prérequis (lignes 94-98, Annexe B5)*

La mise en évidence de la méthode peut être considérée comme à la charge de l'étudiant, mais, l'auteur du manuel nous explique que :

> *il y a de moins en moins d'étudiants qui sont capables de faire des liens et qui sont capables de faire le travail qu'on est censé attendre d'un étudiant : à travers des dizaines d'exercices être capable de dégager ce qui lui paraît important. Il n'y en a pas beaucoup qui font des dizaines d'exercices, et il n'y en a pas beaucoup qui font cet effort-là. (lignes 226-230, Annexe B5)*

2.4 Changement de la stratégie de résolution

Les méthodes de résolution changent la manière de résoudre les problèmes dans la classe ou dans les corrigés. Une méthode de résolution

Quand nous avons posé à l'enseignant du TD la question : « *avez-vous utilisé la méthode dès le début de votre enseignement ?* », nous avons eu la réponse :

> *non je ne l'ai pas utilisée au départ parce qu'au départ quand j'ai commencé à enseigner, j'étais vraiment totalement débutante dans l'enseignement. La discipline ça faisait un petit moment que je l'ai pas vue. Il a fallu que j'y remette. Ça ne se fait pas du jour au lendemain. (lignes 29-34, Annexe B4)*

Quand on a posé la question à l'auteur du manuel Bréal 2003 : « *résolviez-vous de la même manière avant la méthode ?* », nous avons eu la réponse :

> *« Pas forcément formalisé autant que ça. Maintenant, je prends les points [les tâches conseillées dans la méthode de résolution] un par un et je suis un peu plus exigeant sur les différentes étapes. Quelques fois dans les bouquins de classe préparatoire on est allé un peu plus vite sur le système, sur le référentiel, ... Ça se faisait en une ligne. Maintenant je passe en vue toutes ces étapes-là. » (lignes 75-80, Annexe B5)*

Mais les deux enseignants précisent qu'ils suivent des méthodes qu'ils proposent pour préparer leur corrigé. L'enseignant nous a précisé :

> *Si je fais des corrigés dans lesquels je ne respecte pas ces règles-là [les tâches conseillées dans les méthodes], les étudiants ne vont pas sentir concernés par la méthode de résolution proposée (lignes 67-69, Annexe B4)*

Et l'auteur du manuel :

> *Si le but est que l'étudiant retienne la méthode de résolution, il faut l'utiliser un maximum de fois dans les exercices. (lignes 71-72, Annexe B5)*

2.5 Contraintes et difficultés liées aux méthodes de résolution

Enseignant du TD

L'enseignant évoque plutôt deux contraintes pour les méthodes de résolution :

- la gestion des détails dans les résolutions *(lignes 161-163, Annexe B4)*
- l'institutionnalisation des aides proposées aux étudiants.

L'enseignant détaille sa résolution[74] : une première question se pose au niveau de la gestion des détails. La définition du référentiel est un exemple donné par l'enseignant du TD. Il discute en détail la définition du référentiel lors de la résolution du premier problème[75] et pour les problèmes suivants il renvoie l'étudiant à celle-ci *(lignes 142-155, Annexe B4)*.

L'enseignant propose une méthode de résolution de son initiative personnelle et il veut que les étudiants acquièrent et utilisent cette méthode, mais pourtant cette méthode n'est pas une exigence dans les examens et n'est pas utilisé par les autres enseignants (lignes 398-401, Annexe B4). Ceci est une contrainte d'institutionnalisation des outils proposés aux étudiants (lignes 447-450, Annexe B4).

Auteur du manuel
L'auteur du manuel se plaint du fait qu'une méthode proposée impose souvent les choix des exercices. Car les exercices choisis doivent être à la portée de la méthode pour que celle-ci s'applique aux exercices.

Il nous a précisé :

> *[Proposer des méthodes de résolution] c'est le concept commun à tous les précis. Alors, de nous même, je ne suis pas sûr qu'on l'aurait présenté comme ça. C'est-à-dire essayer de dire que tous les exercices, quasiment tous, vont utiliser ce concept-là.(lignes 26-29, Annexe B5)*

Et

> *Mais globalement c'est vrai que quelques fois on a dû se forcer pour entrer dans ce concept-là [la portée de la méthode de résolution]. (Lignes 40-42, Annexe B5)*

Rappelons que la technique de projection donnée dans la méthode MR-Bréal a une portée dans presque tous les problèmes posés dans ce manuel (voir paragraphe 2.1.1)

3 Conclusion

Diverses raisons, en particulier les difficultés et les besoins des étudiants liées à l'organisation praxéologique de l'utilisation de principes, amènent les enseignants à proposer des méthodes de résolution. Les enseignants sont supposés répondre à des difficultés et besoins des étudiants en leur apportant (ou proposant) des méthodes de résolution. C'est une intention (pédagogique) qui amène l'enseignant à modifier sa stratégie de résolution faisant partie de son rapport institutionnel à la résolution de problèmes en dynamique du point matériel.

L'usage des méthodes de résolution rend explicite la résolution des enseignants et permet d'éviter à l'enseignant de diminuer certains raccourcis non contrôlés dans l'organisation praxéologique liée à l'utilisation du PFD, tels que les raccourcis pour les tâches du choix des systèmes, du bilan de forces appliquées à chaque système, du choix des axes du repère et de la projection des équations vectorielles.

74 Voir les résolutions proposées dans l'annexe B3, paragraphe V.

75 Voir la résolution du deuxième problème du TD à l'annexe B3, paragraphe V, figure 9. Dans les autres exercices résolus, on renvoie l'étudiant à l'exercice 2 en ce qui concerne la définition du référentiel.

On pourrait penser que l'usage répétitif des tâches dans diverses résolutions de problèmes de la dynamique du point matériel permettra à l'étudiant la mémorisation des tâches et l'acquisition d'une algorithme de résolution (Chapitres 6 et 7).
Mais, une méthode est par définition « générique » et a une portée limitée. Par exemple, les méthodes de résolution que nous avons étudiées dans ce chapitre ne décrivent pas une stratégie de résolution pour un problème complexe comme celui de la machine d'Atwood dans lequel l'étudiant doit faire référence à d'autres types de raisonnement que le raisonnement déductif (algorithmique).

Chapitre VI

Rapport personnel des étudiants à la résolution du problème de la machine d'Atwood

Chapitre VI Rapport personnel des étudiants à la résolution du problème de la machine d'Atwood

Nous avons étudié les différentes résolutions de la machine d'Atwood dans les différents chapitres : la résolution de l'Expert de Référence (Chapitre 2), celle des enseignants anciens (Chapitre 3) et celle des enseignants actuels (Chapitre 4). Mais, comment les étudiants résoudront-ils ce problème ? Pour terminer notre étude didactique, nous nous intéresserons dans ce chapitre (et le chapitre suivant) au rapport personnel des étudiants à la résolution du problème de la machine d'Atwood.

Nous avons vu que la résolution des enseignants est guidée par des algorithmes c'est-à-dire des techniques (ou une partie de la technique) répétitives dans les résolutions de problèmes et pilotées chacune par un principe physique ; la résolution des enseignants occulte fréquemment une partie non algorithmique correspondant au recours à des relations hypothétiques ; Ces relations se justifieraient par des principes inconnus des étudiants et donc que l'enseignant peut difficilement rendre explicites. On peut donc s'attendre à ce que les étudiants ne puissent percevoir la totalité de la stratégie des enseignants.

Nous formulons alors les questions suivantes :

- Quel est le rapport personnel des étudiants à la résolution du problème de la machine d'Atwood ?
- Quelle stratégie est mise en œuvre par les étudiants ? La stratégie de résolution de l'enseignant est-elle perçue par les étudiants? Si oui est-elle perçue en totalité ou partiellement ? Comment est- elle perçue ?
- Quelles sont leurs difficultés ?
  - Ont-elles pour origine l'organisation praxéologique liée à l'utilisation du PFD ?
  - Ont-elles pour origine la non perception de l'intention et la stratégie de l'enseignant ?

Ainsi, notre étude est centrée d'une part sur les difficultés des étudiants et d'autre part sur les impacts des pratiques des enseignants sur les rapports personnels des étudiants à la résolution du même problème.

Nous avons mis en place une expérimentation avec l'enseignant que nous appelons « l'enseignant du TD », c'est à dire l'enseignant qui a produit la résolution R5 analysée au chapitre 4- et qui a proposé l'aide méthodologique pour la résolution de problèmes de dynamique (méthode MR-UJF présentée au chapitre 5). Nous avons recueilli les productions des étudiants de cet enseignant pendant trois années. La deuxième année, nous avons recueilli les productions des étudiants en tout début de TD, dans les conditions habituelles du TD. La troisième année nous avons mis en place un dispositif plus complexe, en modifiant l'énoncé et produisant des aides complémentaires. Ces données seront présentées et analysées au chapitre 7.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux productions recueillies la deuxième année.

L'énoncé du problème de la machine d'Atwood posé aux étudiants, correspond à l'énoncé présenté au paragraphe 1 du chapitre 2 et résolu par *l'Expert de Référence*. C'est l'énoncé habituel du TD. Les productions recueillies et analysées ici, correspondent aux conditions suivantes : l'exercice a été donné en tant que devoir de la maison aux étudiants d'un groupe de travaux dirigés lors de la toute première séance du TD. Par conséquent, l'influence de la stratégie de cet enseignant particulier reste limitée. Cependant, dans cette même séance du TD, l'enseignant du TD a résolu un autre exercice (paragraphe VII, Annexe B3) où les forces de tension interviennent, de manière à donner des éléments aux étudiants pour construire la relation entre les forces de tension pour l'exercice de la machine d'Atwood.

Cet exercice (paragraphe VII, Annexe B3) est résolu par l'enseignant en classe : il faut établir une relation entre les forces de tension, comme pour le problème de la machine d'Atwood.
Les productions des étudiants recueillies (16 au total) ont été collectées lors de la séance suivante, une semaine après.
Les étudiants disposent de la méthode de résolution présentée au chapitre précédent (Chapitre 5). Dès la première séance du TD, l'enseignant du TD a présenté la méthode de résolution MR-UJF et a résolu les problèmes concernés en faisant des références explicites à cette méthode. Par ailleurs nous avons vu qu'il prépare avec cette méthode les corrigés de TD qui sont mis à la disposition des étudiants en bibliothèque dès qu'une feuille de TD a été entièrement vue en classe (Chapitre 5).

L'organisation du chapitre 6 est détaillée dans la figure 35.
Nous commencerons par faire une analyse a priori de la résolution des étudiants à partir des résultats des chapitres antérieurs, plus particulièrement des résolutions des enseignants analysées au chapitre 4. Nous présenterons tout d'abord les résultats globaux de notre analyse des résolutions des étudiants. Pour cela, nous allons procéder en deux temps : d'abord nous présenterons les résultats concernant la partie algorithmique, puis la résolution non algorithmique dans les résolutions des étudiants. Cette première analyse permettra de dégager les difficultés récurrentes des étudiants dans les deux parties de leurs résolutions.

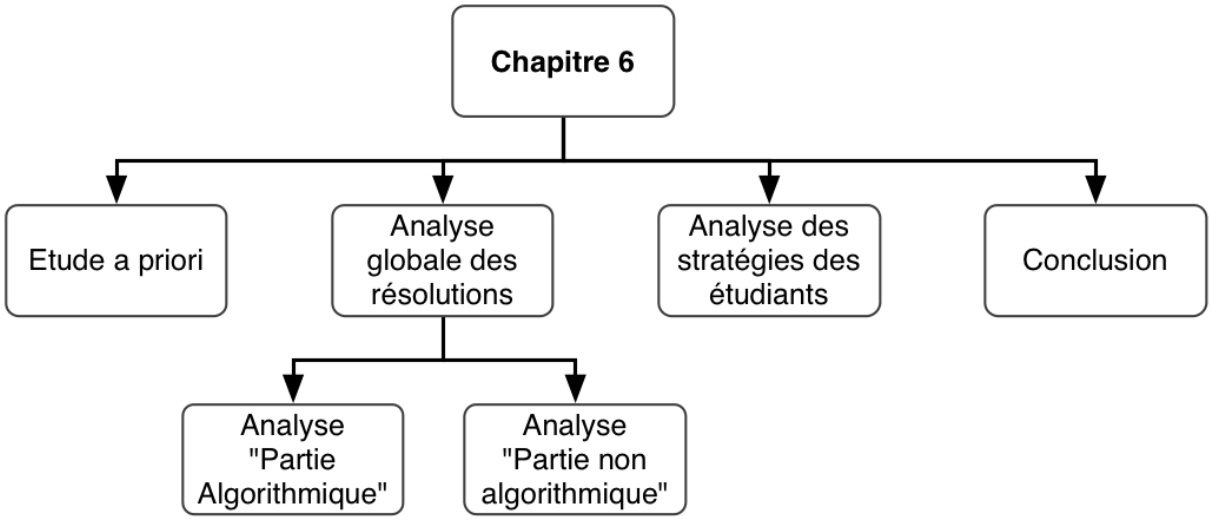


Figure 35: Organisation du Chapitre 6

Dans un second temps nous analyserons les stratégies des étudiants mises en œuvre par les étudiants en nous appuyant sur quelques copies. Cette analyse nous permettra de rechercher comment les étudiants perçoivent la stratégie de résolution.

1 Analyse a priori pour la résolution du problème de la machine d'Atwood par les étudiants

Pour l'analyse a priori de la résolution du problème de la machine d'Atwood par les étudiants, nous nous appuierons sur l'ensemble des chapitres précédents :

- certaines difficultés récurrentes des étudiants lors de la résolution de problèmes en physique et certaines caractéristiques des résolutions des étudiants identifiées par des chercheurs en didactique (Chapitre 1),
- les intentions des enseignants actuels et le paradigme dans lequel ils se placent (Chapitres 3 et 4),
- la diversité des résolutions des enseignants et les aménagements faits par les enseignants pour réduire la complexité et la longueur de la résolution en référence à celle de l'Expert de Référence (Chapitre 4),
- l'utilisation explicite d'une méthode de résolution pour la résolution de problèmes de la dynamique du point matériel par l'enseignant du TD (Chapitres 4 et 5) et la mise à la disposition des étudiants d'une fiche méthodologique résumant cette méthode.

Les aménagements effectués par les enseignants par rapport à la résolution de *l'Expert de Référence* (Chapitre 4), réduisent la longueur et la complexité de la résolution. Nous pouvons raisonnablement supposer que les résolutions des étudiants n'entreront pas dans plus de détails (a priori ils n'ont pas accès à l'information qui a été aménagée). Les aménagements communs à toutes les résolutions d'enseignants devraient donc se retrouver dans les résolutions des étudiants. On peut supposer que ces résolutions d'enseignants constituent des références essentielles pour les étudiants en matière de résolution de problème de mécanique, à travers les TD, les polycopiés, les manuels, les sites internet.
Par conséquent, pour la partie algorithmique de la résolution, nous pouvons nous attendre à ce que

- la résolution des étudiants soit centrée sur la résolution « quantitative » du problème (centration sur la résolution quantitative)
- le nombre de systèmes étudiés soit réduit à deux systèmes : la masse M et la masse m
- les étudiants accomplissent certaines tâches de la technique de l'utilisation du PFD sous la forme d'un schéma, par exemple la définition du système, du repère, le bilan des forces … (Voir paragraphe VI, Annexe B3)
- certains étudiants accomplissent de manière implicite certaines tâches de la technique de l'utilisation du PFD décrite dans la fiche méthode (tâches fréquemment implicites dans les résolutions d'enseignants : par exemple la définition du référentiel, du système, du repère …)
- certains étudiants accomplissent de manière explicite les tâches de la technique de l'utilisation du PFD décrite dans la fiche méthode, parce qu'ils disposent de cet outil et que leur enseignant de TD les incitent à l'utiliser (contrat didactique[76] [71]).
- certains étudiants nomment les tâches qu'ils effectuent comme l'enseignant du TD :

76 Brousseau [70] définit le contrat didactique comme suivant : « *Dans toutes les situations didactiques, le maître tente de faire savoir à l'élève ce qu'il veut qu'il fasse, mais ne peut pas le dire d'une manière telle que l'élève n'ait qu'à exécuter une série d'ordres. Ce contrat fonctionne, dit-il, comme un système d'obligations réciproques qui détermine ce que chaque partenaire, l'enseignant et l'enseigné, a la responsabilité de gérer, et dont il sera d'une manière ou d'une autre, responsable devant l'autre*. »

l'enseignant du TD explicite les tâches qu'ils effectuent dans ses résolutions en écrivant : *« Référentiel : », « systèmes : » « Bilan de forces : »* (paragraphe V, Annexe B3), ce qui permet une explicitation de la structure de leur résolution[77]

Pour la partie algorithmique de la résolution, nous pouvons nous attendre à ce que

- les étudiants adaptent une approche non formelle, à la place des études des autres systèmes, qui ont pour produit les relations entre les tensions et les accélérations des masses et que nous appelons la partie non algorithmique.
- la nécessité d'argumenter ces relations compte plus que la nature des arguments utilisés.

Difficultés des étudiants dans la partie algorithmique de la résolution

D'après la résolution de *l'Expert de Référence* et notre analyse sur cette résolution (Chapitre 2), nous savons que, quelle que soit la nature de l'accomplissement de tâches (accomplissement implicite ou explicite), il devrait y avoir des cohérences entre les tâches accomplies d'un point de vue des intrants et des produits de certaines tâches : les intrants de certaines tâches sont les produits des tâches antérieures (Voir paragraphe 6.2.3 au chapitre 2). De ce point de vue,

- certains intrants des tâches du bilan de forces, de l'écriture de l'accélération du système et de l'écriture vectorielle du PFD sont les produits de la tâche de la définition du système.
- certains intrants de la tâche de la projection des équations vectorielles sont les produits de la tâche du choix des axes du repère et du système de coordonnées.

Si l'étudiant n'est pas conscient de cette relation de précédence (intrant/produit) ces tâches peuvent lui devenir problématiques.

Difficultés des étudiants dans la partie non algorithmique de la résolution

En ce qui concerne la partie non algorithmique dans la résolution, les étudiants argumenteraient les relations dont ils ont besoin. Si les étudiants ont bien mémorisé les conseils de l'enseignant pour l'établissement des relations entre les tensions et entre les accélérations des masses, on peut s'attendre à l'utilisation des arguments utilisés par l'enseignant.

Mais il paraît même difficile d'attendre la justification (arguments) fournie par l'enseignant du TD, car elle est assez longue. Il base son argumentation sur trois faits. Rappelons les arguments utilisés pour la justification des forces de tension[78] :

« La norme de toute force de tension est la même en tout point d'une corde donnée, aux conditions suivantes :

- *la corde considérée est de masse négligeable*
- *le mouvement de la poulie qui agit sur cette corde n'est pas gêné : pas de frottements sur l'axe.*
- S'il y a mouvement, la poulie doit avoir une masse négligeable »

Or les étudiants ne peuvent pas percevoir la signification des faits utilisés dans l'argumentation. Et comme certains enseignants (Chapitre 4), le fait d'argumenter compterons plus que la nature des arguments (ou la pertinence des arguments sélectionnés).

77 La structuration de la résolution paraît importante car les chercheurs précisaient que les étudiants se mettent tout de suite à écrire le principe sans faire une étude détaillée.

78 Cette argumentation de l'enseignant est identique à celle qui est précisée dans la résolution du problème de la machine d'Atwood.

2 Analyse globale des résolutions des étudiants

Dans ce paragraphe, nous exposons de manière globale les résultats de l'expérimentation effectuée avant de présenter des études de cas dans les paragraphes suivants. Nous présenterons d'abord la partie algorithmique dans les résolutions des étudiants, puis la partie non algorithmique et enfin les catégories de stratégies que nous avons établies en fonction des difficultés des étudiants et de l'existence ou non de la partie non algorithmique dans les résolutions.

Les étudiants utilisent différentes notations pour les forces et les accélérations. C'est la raison pour laquelle nous utiliserons les notations ci-dessous à la suite du paragraphe afin de faciliter la compréhension et la lecture :

- $\vec{T}_M$, $\vec{T}_m$ pour la force de tension appliquée à la masse M et celle appliquée à la masse m
- $\vec{P}_M$, $\vec{P}_m$ pour le poids de la masse M et pour celui de la masse m
- $\vec{a}_M$, $\vec{a}_m$ pour l'accélération de la masse M et pour celle de la masse m.

Nous désignerons les étudiants par un « E » et la totalité des productions des étudiants sont données en Annexe C1.

2.1 Partie algorithmique dans la résolution des étudiants

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à deux aspects qui permettent la présentation des résultats globaux dans la partie algorithmique de la résolution du problème. Ces aspects sont :

- la structure de la résolution des étudiants
- les difficultés que rencontrent certains étudiants lors de l'accomplissement de certaines tâches de la technique de l'utilisation du PFD.

2.1.1 Structure de la résolution des étudiants

La plupart des tâches de la technique de l'utilisation du PFD sont explicitement accomplies par les étudiants à travers le dessin et/ou le texte. Nous présentons à travers le tableau 12 ci-dessous les résultats pour l'ensemble des étudiants concernant l'accomplissement explicite des tâches.

Tâches	Nombre d'étudiants ayant accompli explicitement la tâche
Tâche 1 : Définir le référentiel galiléen	12
Tâche 2 : Définir le système à étudier	16
Tâche 3 : Ecrire l'accélération du système	**4**
Tâche 4 : Choisir un axe du repère et un système de coordonnées	**9**
Tâche 5 : Faire le bilan de forces	16
Tâche 6 : Ecrire vectoriellement le PFD pour le système étudié	16

Tâche 7 : Projeter l'équation vectorielle suivant les axes du repère	**12**

Tableau 12: Tâches explicitement accomplies de la technique de l'utilisation du PFD par les étudiants (au total 16)

D'après le tableau 12, on peut conclure que tous les étudiants définissent explicitement le système d'étude, font un bilan de forces extérieures appliquées aux systèmes en jeu, écrivent vectoriellement le PFD, même si le choix du système n'est pas adéquat pour l'utilisation du PFD et les autres tâches ne sont pas correctement accomplies.

L'analyse des productions des étudiants concernant la partie algorithmique nous permet également de constater que

- Sauf un étudiant (E1), les étudiants nomment certaines tâches qu'ils accomplissent : ce sont le plus souvent les tâches de la définition du système, du référentiel, du bilan de forces et de l'écriture vectorielle du PFD.
- Sauf un étudiant (E6), les étudiants font un dessin sur lequel il accomplit un certain nombre de tâche : le plus souvent les tâches de la définition du système, du choix de l'axe du repère et du bilan de forces.
- la majorité des étudiants (12 étudiants sur 16) structurent leur résolution en fonction de deux algorithmes : l'algorithme utilisé par l'enseignant du TD et l'algorithme qu'on trouve dans la plupart des manuels de la mécanique du point matériel
  - ils accomplissent de manière explicite les tâches de la technique de l'utilisation du PFD et ils les nomment. C'est-à-dire qu'ils écrivent : « système : », « référentiel : », … (voir le tableau 12 où nous présentons le nombre d'étudiants qui ont accompli les tâches de manière explicite).
  - la résolution de ces 12 étudiants commence souvent par un dessin qui traduit la plupart du temps l'accomplissement des tâches du bilan de forces, du choix des axes du repère et de définition du système (entourer la masse qui constitue le système).

Montrons ces aspects à travers quelques extraits de copies. .
Par exemple, la résolution de l'étudiant E12 (36) commence par une figure où on voit l'accomplissement de 4 tâches : la tâche de la définition du système, celle de l'écriture des accélérations des systèmes, celle du choix de l'axe du repère et celle du bilan de forces. Dans la figure 37, nous avons reconstruit la figure de cet étudiant afin de mettre en évidence une série de tâches liées à la présentation sous formes de schéma de l'organisation spatiale du dispositif qui constitue un algorithme.

Après le dessin, cet étudiant précise à nouveau les systèmes à étudier, puis il fait une liste de forces extérieures appliquées à chaque système. Il prend chacun des systèmes et écrit le PFD pour ces systèmes et il projette les équations vectorielles. C'est le deuxième algorithme lié à l'utilisation du PFD.

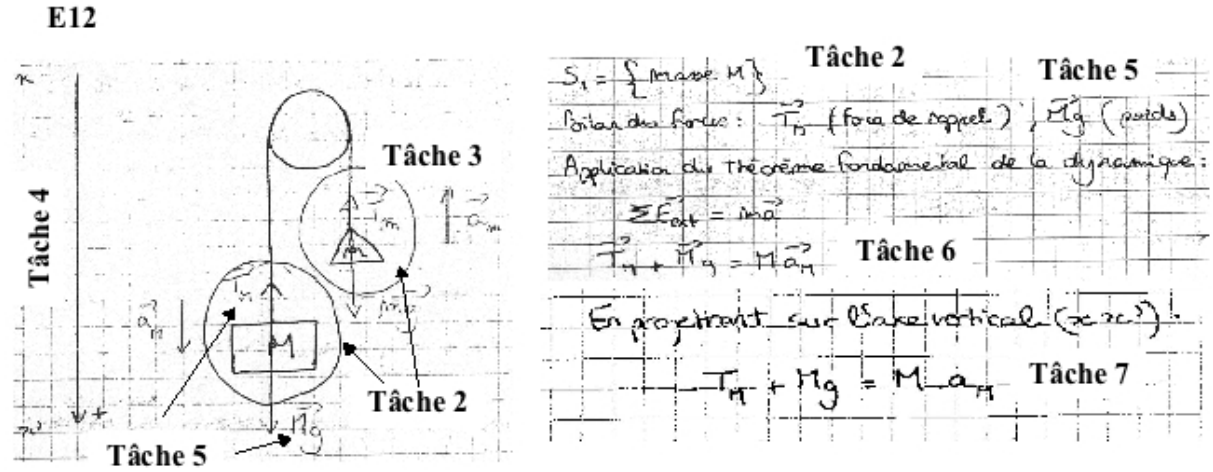


Figure 36: Extrait de la copie de l'étudiant E12.

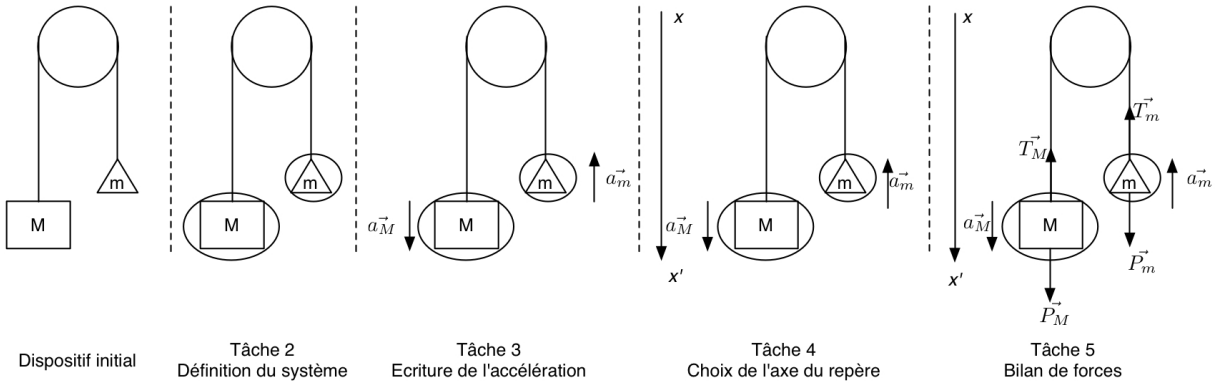


Figure 37: Reconstitution de la figure de l'étudiant E12 afin de mettre en évidence l'algorithme constitué par l'accomplissement d'une série de tâches. L'étudiant construit le dessin en cinq étapes en partant du dessin initial donné dans l'énoncé du problème.

Deuxième exemple, la résolution de l'étudiant E8 (figure 38) commence par un dessin qui traduit l'accomplissement de la tâche du choix de l'axe du repère. Après le dessin, l'étudiant exécute un autre algorithme lié à l'utilisation du PFD : il définit le référentiel et le système. Il fait une liste de forces extérieures appliquées au système. Il écrit le PFD pour le système et il projette l'équation vectorielle. L'étudiant ne projette pas le vecteur poids de la masse m suivant l'axe du repère précisé sur le dessin. L'étudiant justifie sa projection en considérant le poids de la masse m comme étant une force de rappel.
La résolution de cet étudiant met bien en évidence diverses difficultés liées à l'accomplissement des tâches sur lesquelles nous reviendrons ci-dessous lors de l'analyse globale de l'accomplissement de chacune des tâches.

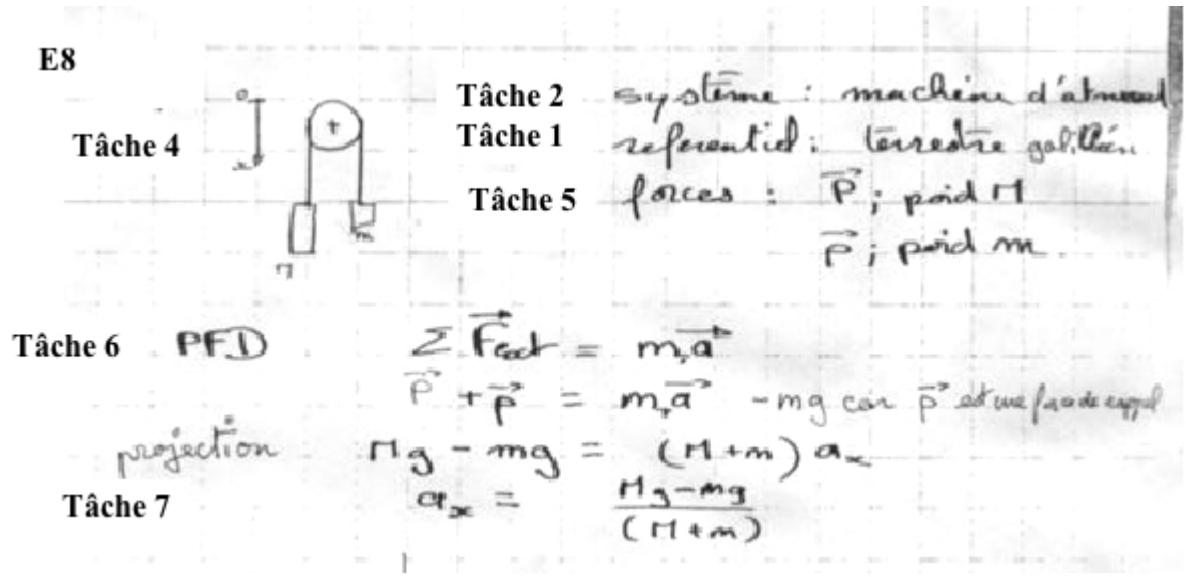


Figure 38: Extrait de la copie de l'étudiant E8

Troisième exemple, la résolution de l'étudiant E13 (figure 39) commence par un dessin qui traduit l'accomplissement de deux tâches : la tâche de la définition du système et la tâche du bilan de forces. Après le dessin, l'étudiant passe à l'exécution de l'algorithme de l'utilisation du PFD. Il définit le référentiel, puis les systèmes à étudier. Il fait une liste de forces extérieures appliquées à chaque système. Il écrit le PFD pour chaque système.
Cet étudiant ne projette pas les équations vectorielles et sa résolution n'est constituée que de partie algorithmique. Nous analyserons une résolution proche de cette résolution au paragraphe 3.4.1.

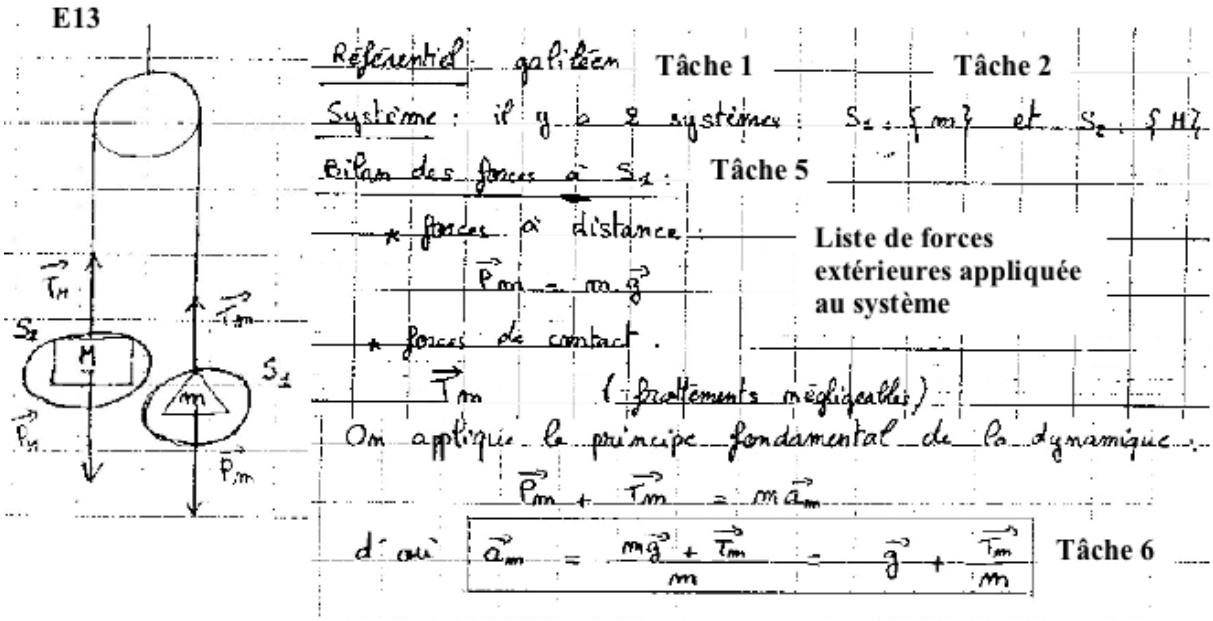


Figure 39: Extrait de la copie de l'étudiant E13

2.1.2 Difficultés des étudiants concernant les tâches

Nous ferons les conclusions suivantes pour l'accomplissement de chacune des tâches.

Tâche 1 (Définir le référentiel) : la plupart des étudiants définit le référentiel d'étude, même si le problème ne nécessite pas de changement de référentiel. Nous recensons différentes définitions du référentiel dans les copies des étudiants. (Tableau 13).

Référentiel précisé	Nombre d'étudiants
Terrestre supposé galiléen	4
Terrestre galiléen	3
Terrestre	1
Galiléen	1
Terrestre donc galiléen	1

Tableau 13: Référentiels utilisés par les étudiants

Dans ce tableau nous constatons également que, si on lit du haut vers le bas, le terme souhaité étant « *terrestre supposé galiléen* », les étudiants délaissent certains mots. D'abord, nous voyons que le mot « *supposé* » est enlevé, ensuite le mot « *terrestre* », ou bien « *galiléen* ». Enfin, on a une réponse comme « *terrestre donc galiléen* » ; ceci met bien en évidence l'ambiguïté du référentiel chez les étudiants.

Tâche 2 (définir le système) : tous les étudiants définissent de manière explicite le système. Le mot « système » apparaît dans leur résolution et certains étudiants entourent les objets du dispositif pour désigner les systèmes.
Nous avons trouvé les réponses suivantes :

- 12 étudiants définissent correctement 2 systèmes : la masse M et la masse m
- 4 étudiants définissent un seul système soit 2 étudiants les masses (M+m) soit 2 étudiants « la machine d'Atwood » sans mieux préciser les éléments inclus dans cette dénomination.

La tâche elle-même ne pose pas problème aux étudiants mais le fait de prendre le produit de cette tâche comme intrants aux autres tâches qui leur posent problème. De ce point de vue, les étudiants qui ont définit un seul système éprouvent d'autres difficultés liées à l'accomplissement des tâches, notamment pour le bilan de forces et l'accélération du système (voir l'extrait de la copie de l'étudiant E8 dans la figure)[79].

Tâche 3 (Ecrire l'accélération des systèmes) : les étudiants n'ont pas d'habitude d'écrire l'accélération du système étudié avant l'écriture vectorielle du PFD (la tâche 3), mais cela entraîne rarement des difficultés chez les étudiants. Par exemple, l'étudiant E12 est parmi les quelques étudiants qui écrivent le vecteur accélération des systèmes étudiés avant l'écriture du PFD. Cet étudiant précise les vecteurs accélérations des deux systèmes sur le dessin. L'étudiant E13 n'écrit pas l'accélération de chacun des systèmes mais il accomplit

79 Nous analyserons à la suite de ce paragraphe la copie d'un étudiant qui tient compte d'un seul système constitué de la masse M et m et illustrerons ses difficultés pour les tâches qui dépendent du choix du système (voir paragraphe 3.2.1).

correctement cette tâche lors de l'écriture du PFD : l'étudiant instancie de manière correcte l'accélération de chaque système : $\vec{a}_M$ et $\vec{a}_m$ (voir l'extrait des copies des étudiants E12 et E13 dans les figures 38 et 39).

Tâche 5 (faire le bilan des forces extérieures appliquées aux systèmes) : tous les étudiants identifient les forces extérieures avant d'écrire vectoriellement le PFD (tâche 5) : ils dessinent les forces exercées sur les systèmes, ils font une liste de forces extérieures (voir l'extrait des copies des étudiants E12 et E13 dans les figures 38 et 39)

Tâche 6 (Ecrire vectoriellement le PFD) : tous les étudiants écrivent la forme vectorielle du PFD. Cette tâche ne pose pas problème aux étudiants, mais tout de même dans une seule copie (E10) nous avons constaté l'écriture suivante du PFD pour l'étude de la masse M $\vec{T}_M - \vec{P}_M = M\,\vec{a}_M$, alors qu'il s'agit de la somme vectorielle des forces appliquées au système et non pas de leur différence.

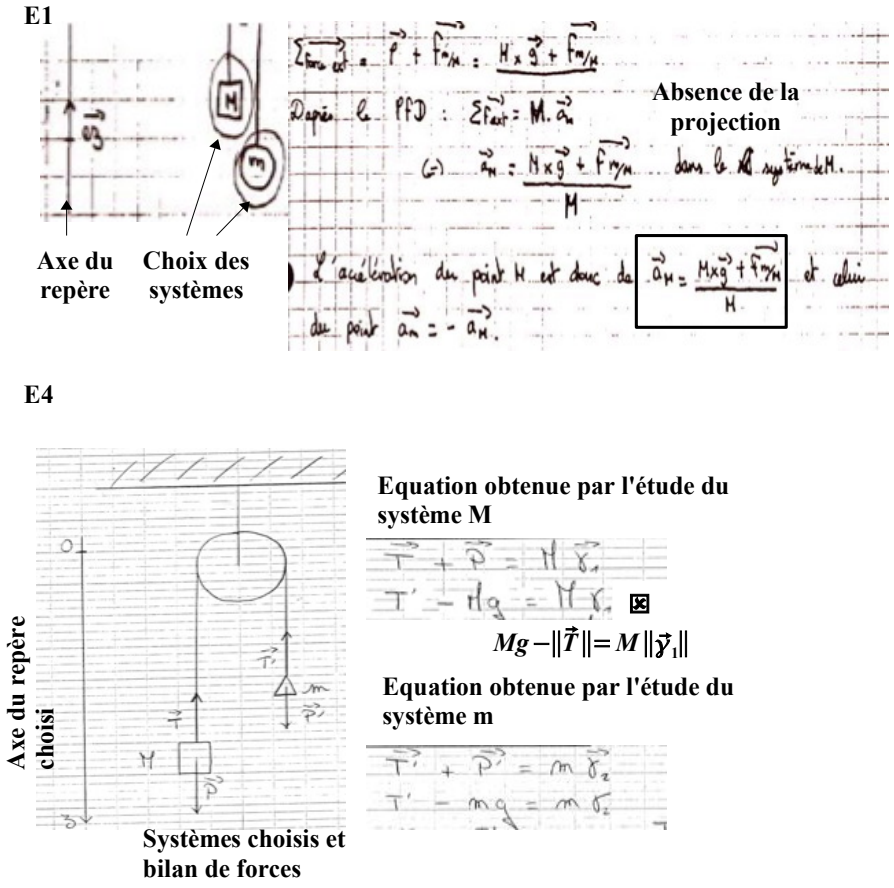


Figure 40: 2 extraits de la copie d'étudiant afin de montrer les difficultés liées à la tâche 7 (projeter les équations vectorielles).

L'étudiant E1 choisit un axe du repère et le montre sur le dessin, mais il ne fait aucun usage dans sa résolution. L'étudiant E4 choisit un axe du repère et le montre sur le dessin. Mais lors de la résolution, il ne projette pas l'équation vectorielle obtenue par l'étude du système M suivant l'axe du repère choisi.

Tâche 4 et tâche 7 : Même si la plupart des étudiants choisissent l'axe du repère (tâche 4) et

projettent les équations vectorielles, la tâche de la projection est problématique pour certains étudiants :

- certaines étudiants choisissent l'axe du repère mais le considèrent comme accessoire sur le dessin car faisant partie de l'algorithme de la résolution (voir l'extrait de la copie de l'étudiant E1 sur la figure 40). L'étudiant ne fait aucun usage de l'axe du repère choisi. C'est-à-dire que le produit de la tâche du choix des axes du repère ne devient pas l'intrant de la tâche de la projection.
- certains projettent les équations vectorielles en fonction d'autres critères non liés à l'axe du repère choisi (voir l'extrait de la copie de l'étudiant E4 sur la figure 40).

2.2 Partie non algorithmique dans la résolution des étudiants

Au total, 7 étudiants sur 16 font appel à une partie non algorithmique dans leur résolution. Ces étudiants argumentent, comme les enseignants, les relations qu'ils proposent en s'appuyant sur les faits explicités dans l'énoncé du problème.

Nous constatons une diversité des arguments lors de la proposition des relations. La référence au réel et la diversité des arguments sont bien visibles dans les tableaux 14 et 15 où nous présentons les arguments utilisés et les relations établies pour les accélérations des masses et les forces de tension.

Nature de l'argument	Relation proposée pour l'accélération des masses	Nombre d'étudiants
Corde tendue	Egalité en module des accélérations - $\|\vec{a}_M\|=\|\vec{a}_m\|$	2 (E12, E16)
Corde inextensible, sans masse, sans frottement sur l'axe	Egalité en module des accélérations - $\|\vec{a}_M\|=\|\vec{a}_m\|$	1 (E1)
Corde inextensible et sans masse, poulie sans masse, frottements négligés	Egalité vectorielle des accélérations - $\vec{a}_M=\vec{a}_m$	1 (E11)

Tableau 14: Arguments utilisés par les étudiants pour proposer une relation entre les accélérations des masses

Nature de l'argument	Relation proposée pour les forces de tension	Nombre d'étudiants
Poulie sans masse, corde sans masse, frottements négligés	$\vec{T}_M=\vec{T}_m$	2 (E12, E16)
	$\vec{T}_M=-\vec{P}_m$	1 (E5)
Corde homogène	$\vec{T}_M=\vec{T}_m$	1 (E7)
M>m	$\vec{T}_M=-\vec{P}_m$	1 (E4)

Tableau 15: Arguments utilisées par les étudiants pour proposer une relation entre les forces de tension

D'après les tableaux 14 et 15, on peut tirer les conclusions suivantes.

Diversité des arguments utilisés et diversité des relations proposées : Il y a une diversité des arguments et une diversité des relations proposées par les étudiants.

- Par exemple, l'étudiant E12 et E1 proposent l'égalité en module des accélérations des masses mais ils ne s'appuient pas sur les mêmes arguments (2e et 3e lignes du tableau 14). De même, les étudiants E7 et E12 proposent l'égalité des tensions en s'appuyant sur différents faits (1e et 3e lignes du tableau 15).
- Par exemple, les étudiants E12 et E15 s'appuient sur les mêmes faits mais ils en tirent des relations différentes[80].

Richesse (variété) de l'argumentation plus importante que la pertinence : Les étudiants utilisent souvent plusieurs arguments et il semble que ce soit leur accumulation qui assure le poids de l'argumentation, car la cohérence entre argumentation et traduction algébrique n'est souvent pas assurée.

- Par exemple, l'étudiant E11 s'appuie sur 4 faits et il propose l'égalité vectorielle des accélérations[81] (4e ligne du tableau 14), alors qu'un seul fait « corde inextensible » et tendue permet d'établir l'égalité en module des accélérations, et non pas leur égalité vectorielle.

Un seul argument pour une relation : Pour certains étudiants, l'essentiel semble de proposer un seul argument pour une relation algébrique.

- Par exemple, l'étudiant E7 s'appuie sur le fait que « *le fil est homogène* » et établit la relation $\vec{T}_M = \vec{T}_m$. Alors que le fait de négliger de la masse de la corde intervient pour établir l'égalité en module des accélérations $\|\vec{a}_M\| = \|\vec{a}_m\|$, et non pas l'égalité vectorielle des deux forces de tension.

Mobilisation d'une conception : un argument non identifié antérieurement fait son apparition (4e ligne du tableau 15), c'est le cas de l'étudiant E4. Selon lui, la corde transmet à la deuxième extrémité la force qui s'exerce sur la première extrémité. Voici son raisonnement : « *puisque la masse M étant supérieure à la masse m, on peut supposer que la petite masse serait entraînée par le poids de la grande masse. On a alors* $\vec{T}_m = -\vec{P}_M$ ».

- Si on renverse l'argument de l'étudiant, la grande masse transmet à la petite masse une force égale à son poids. Si l'on poursuit suivant ce raisonnement afin d'en éprouver la cohérence, on voit qu'inversement la petite masse transmet une force égale à son poids. On arrive donc au fait que deux tensions différentes peuvent coexister en tout point de la corde.
- Il faut également noter que cet étudiant est le seul qui est prudent lors de la proposition de la relation. La relation établie a un statut hypothétique. Il n'affirme pas que la relation qu'il propose est exacte ; il le suppose : « *on peut supposer que*

80 On est en présence d'un cas que nous avons retrouvé dans les résolutions des enseignants (voir le tableau 10 au chapitre 4). Dans les résolutions R3 et R4, les enseignants s'appuyaient sur le fait que la corde est inextensible mais dans la résolution R3 on a vu construire la relation entre les accélérations alors que dans la R4 la relation entre les forces de tension.

81 Il faut également noter que dans la résolution R3 analysée au chapitre 4 (la résolution retrouvée dans le manuel d'Alonso-Finn [58]), l'enseignant précisait que les deux masses se déplacent avec la même accélération.

... » et il utilise ultérieurement le conditionnel pour présenter le résultat : « *la petite masse serait entraînée par le poids de la grande masse* ». Nous analyserons l'ensemble de sa résolution ultérieurement (voir paragraphe 3.5)

Ainsi, il semble que les étudiants ne sachent pas sur quel cadre théorique il faut s'appuyer pour faire usage de tels faits et ni comment traduire chacun des faits dans ce cadre théorique. Les étudiants devraient percevoir le statut hypothétique des relations établies et la nécessité de conserver leur statut hypothétique dans la résolution du problème. C'est ce que nous discuterons ultérieurement.

2.3 Conclusion

Partie algorithmique

Certaines caractéristiques de résolutions des étudiants décrites dans les travaux de chercheur en didactique de la physique n'ont pas observé dans la population d'étudiants concernée (par exemple, l'une des caractéristiques de résolutions des étudiants était de commencer sans étude préalable des conditions pour appliquer les principes, et de centrer uniquement sur les manipulations algébriques à partir de l'expression algébrique des principes).

Les étudiants n'accomplissent pas de manière implicite les tâches fréquemment implicites dans les résolutions d'enseignants comme la définition du référentiel, du système, du repère , …

Ils ont acquis l'algorithme nécessaire pour l'utilisation du PFD, c'est-à-dire que les étudiants accomplissent de manière algorithmique et explicite les tâches de la technique de l'utilisation du PFD tout en cherchant à structurer leur résolution comme celle de l'enseignant du TD, bien que notre expérimentation soit effectuée tout au début de l'enseignement. Il semble que cette structure provient de l'enseignement antérieur.

Ils exécutent également une série de tâches qui constitue un autre algorithme, liées à la présentation sous formes de schéma de l'organisation spatiale du dispositif. L'utilisation du PFD met en œuvre les deux algorithmes décrits.

Quant aux difficultés des étudiants dans cette partie algorithmique,

Comme attendu, deux tâches (tâches de la définition du système et de la projection) posent problème à certains étudiants Ces étudiants ne sont pas conscients de relations de précédence (intrant/produit) pour ces deux tâches qui leur deviennent problématiques :

- Dans la copie de quatre étudiants, le système qui est défini ne permettrait pas à un expert de résoudre le problème. Mais ces étudiants ne font pas un usage de ce système pertinent avec la tâche d'écriture du PFD. Cette difficulté se retrouve pour les mêmes raisons dans les tâches du bilan de forces, de l'écriture de l'accélération du système.
- la projection des équations vectorielles ne concorde pas parfois à l'axe du repère choisi.

Partie non algorithmique

Cette partie n'existe pas dans toutes les copies d'étudiants. Certains étudiants argumentent, formalisent les relations qu'ils vont utiliser pour résoudre le problème en s'appuyant sur les faits. Les étudiants ne perçoivent pas la signification des faits utilisés dans l'argumentation. La diversité et la richesse des arguments comptent plus que la pertinence et la cohérence. Pour les étudiants qui argumentent, les relations établies n'ont en général pas de statut hypothétique

alors que cela devrait être pour assurer la cohérence de la résolution dans le cadre théorique de la mécanique.

L'analyse des productions des étudiants nous a permis de regrouper les résolutions des étudiants sous quatre catégories de stratégie en particulier à partir des difficultés dans la partie algorithmique de la résolution et de l'existence ou non d'une partie non algorithmique dans la résolution. Dans le paragraphe suivant, nous analyserons les stratégies de quelques étudiants pour l'ensemble de la résolution du problème de la machine d'Atwood.

3 Analyse détaillée de stratégies d'étudiants

3.1 Catégories de stratégie

Dans le tableau 16 ci-dessous, nous récapitulons les caractéristiques principales des stratégies des étudiants et précisons le nombre d'étudiants appartenant à chacune des catégories de stratégie.

Les résolutions d'enseignants que nous avons analysées dans le chapitre 4 se répartissent dans les 4 catégories de stratégie à l'exception la catégorie S3. La catégorie de stratégie S3 est propre aux étudiants puisqu'elle abouti à une situation de blocage de la résolution, et ne parvient pas à établir une solution; ces étudiants mettent en oeuvre une stratégie consistant uniquement à utiliser le PFD et qui n'arrivent pas à imaginer que dans la stratégie de résolution il peut y avoir des parties où l'on ait recours à autre chose que ce principe.

Dans ce paragraphe, nous analyserons au total 6 copies d'étudiants qui se répartissent ainsi dans les catégories de stratégies; le tableau 17 indique également nos objectifs lors de l'analyse des copies.

Stratégie	Caractéristiques de la stratégie	Nb. d'ét.
S1	– étude d'un seul système – non identification des forces de tension (3 étudiants) ou bien volonté de les faire disparaître à tout prix (1 étudiant) – difficultés dans la partie algorithmique de la résolution – absence de la partie non algorithmique	4
S2	– étude de deux systèmes (la masse M et la masse m) – supposition de l'égalité en module entre les tensions et les accélérations sans les discuter (sans les justifier ni les démontrer ou les argumenter)	1
S3	– étude de deux systèmes (la masse M, la masse m) – pas de difficulté, en général, dans la partie algorithmique de la résolution – absence de la partie non algorithmique de la stratégie de résolution – situation de blocage dans la résolution : absence d'une solution	5
S4	– étude de deux systèmes (la masse M et la masse m)	6

	– pas de difficulté, en général, dans la partie algorithmique de la résolution – proposition des relations avec au moins l'un des fais de la situation (forces de tension et/ou accélérations des masses)	

Tableau 16: Catégorie de stratégies identifiées à travers l'analyse des productions des étudiants

Stratégie	n° de copie	Objectifs principaux de l'analyse des copies
S1	E3	Mettre en évidence les difficultés rencontrées dans la partie algorithmique de la résolution
S2	E10	Montrer que les relations entre les accélérations et entre les forces de tensions ne nécessitent pas de justification.
S3	E9	Montrer ce que peuvent faire les étudiants si leur stratégie consiste uniquement à utiliser le PFD sans faire référence à une approche non algorithmique
	E15	
S4	E4	Montrer l'évolution du statut hypothétique de la partie non algorithmique
	E12	Montrer le statut non hypothétique des relations entre les tensions et entre les accélérations mais aussi le besoin de vérification du résultat

Tableau 17: Copies d'étudiant analysées dans le paragraphe 3 et les objectifs principaux lors de l'analyse des copies.

3.2 Stratégie de résolution S1

La stratégie S1 correspond au schéma dans la figure 41 suivante. Ce schéma résume aussi la résolution des étudiants dont la stratégie est S1.

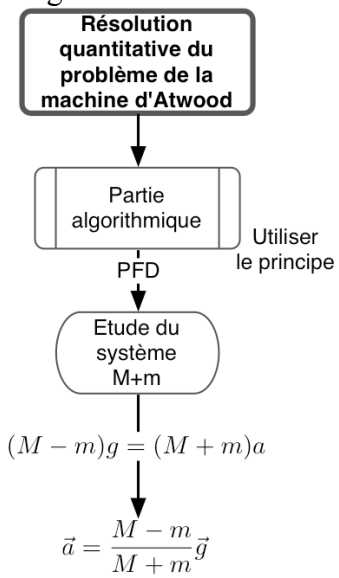


Figure 41: *Stratégie de résolution S1.*

Comme nous avons indiqué sur le tableau 16, cette stratégie de résolution consiste à :

- choisir un système formé de deux masses (M+m),
- identifier deux forces extérieures appliquées à ce système (le poids de la masse M et le poids de la masse m) en éliminant les forces de tension supposées internes au système choisi.
- obtenir tout de suite l'équation $(M-m)g=(M+m)a$ et en déduire la solution du problème.

3.2.1 Organisation des tâches dans la copie de l'étudiant E3

La résolution de l'étudiant E3 est résumée dans la figure suivante (). La copie de cet étudiant est organisée par l'algorithme de résolution car elle ne comprend que la partie algorithmique. Toutes les tâches 1 à 7 sont évoquées. Elles sont accomplies dans l'ordre présenté par l'enseignant.

La résolution de cet étudiant commence par l'analyse des mouvements des deux masses, puis il précise le référentiel d'étude : *terrestre galiléen* et le système à étudier : *la machine* -tâche 1 et tâche 2 (voir le rectangle 1 sur la figure 42). Mais il utilise le PFD à la fois pour 2 systèmes M et m, pour le système M+m.

L'étudiant fait un dessin sur lequel on voit apparaître l'accomplissement de trois tâches (voir le rectangle 2 sur la figure 42) :

- le bilan de forces sur le système, à savoir les forces appliquées à la machine d'Atwood (tâche 5)
- le choix de l'axe du repère (tâche 4)
- l'écriture de l'accélération des masses (tâche 3)

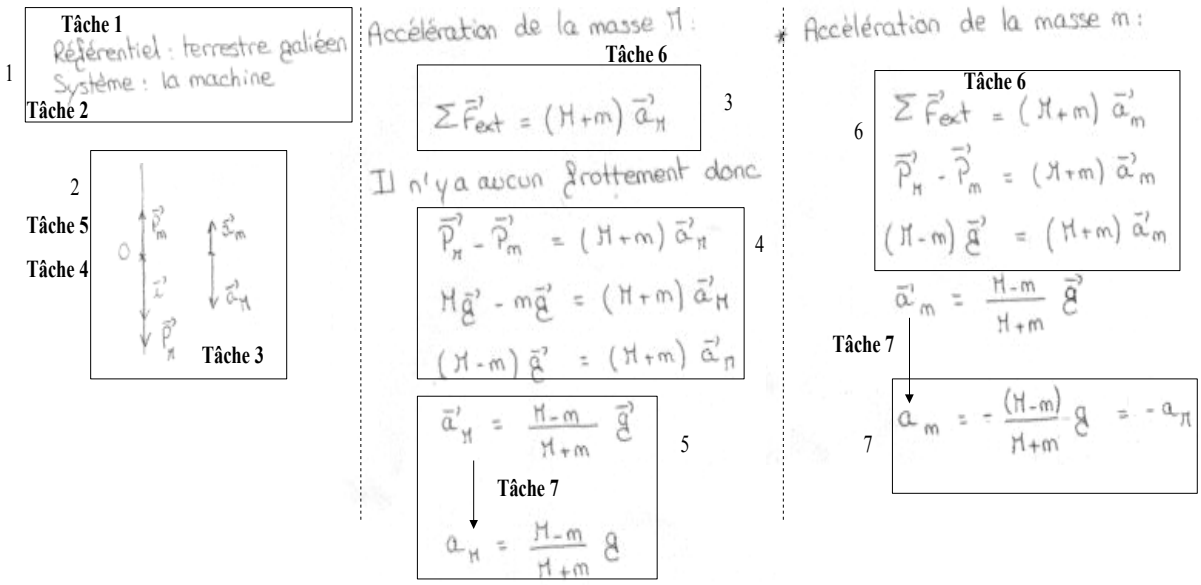


Figure 42: Extrait de la résolution de l'étudiant E3. Les rectangles numérotés montrent les difficultés de l'étudiant et sont expliquées dans le tableau .

Bien que l'étudiant définisse un seul système, « *la machine* », il s'intéresse à plusieurs systèmes :

- un premier matériel de masse (M+m) situé au centre de gravité de la charge m sur lequel s'exercent les forces extérieures au système (la définition du système faite par l'étudiant, la masse du système dans l'équation du PFD)
- deux points matériels M et m (l'accélération du système dans les équations du PFD : $\vec{a}_M$ et $\vec{a}_m$).

En mélangeant les produits de ces différents systèmes, il écrit le PFD pour le premier et le second point matériel et projette les équations vectorielles et obtient l'expression des accélérations des masses (voir les rectangles 5 et 7 sur la figure 42).

L'étudiant E3 se confronte à toutes les tâches, il connaît l'algorithme de la résolution, mais il a des difficultés dans l'accomplissement des tâches, en particulier dans l'identification du système en tant qu'intrant de certaines tâches. Dans le paragraphe suivant, nous étudierons les tâches qui lui posent des problèmes.

3.2.2 Difficultés de l'étudiant dans la partie algorithmique de la résolution

La résolution de l'étudiant est éloignée de celle de l'enseignant. Il a des difficultés pour toutes les tâches sauf la tâche 4 (choisir l'axe du repère et le système de coordonnées) :

- **tâche 2 (définir le système à étudier)** : Le système défini par l'étudiant n'est pas en cohérence avec le cadre théorique de la dynamique du point : il choisit un système déformable (voir le rectangle 1 sur la figure 42). En fait, il semble que cet étudiant ne perçoive pas du tout la place du système dans les différentes tâches qu'il effectue : l'apparition du système (définition, masses, forces appliquées au système, accélérations dans le PFD) est non cohérent dans la résolution , d'une part du point de vue du PFD (le système en tant qu'intrant de cette tâche), et d'autre part du point de vue de la cohérence entre les tâches (définition, bilan des forces, écritures du PFD).
- **tâche 3 (Ecrire l'accélération du système)** : Il représente correctement, sur le dessin, l'accélération de la masse M et celle de la masse m (voir le rectangle 2 sur la figure 42). Mais ces accélérations ne correspondent pas à celle du système défini dans la tâche 2.
- **tâche 5 (Faire le bilan des forces appliquées aux systèmes)** : Il fait un bilan de forces sur le dessin mais cela ne correspond ni au système défini ni à l'une des masses (voir le rectangle 2 sur la figure 42). De ce fait, les forces identifiées ne le sont pas de manière cohérente avec un système (bien qu'on puisse soupçonner qu'il s'agisse bien de M+m, d'après d'autres résolutions) ni avec les principes de la mécanique (le PFD en particulier.
- **tâche 6 (Ecrire vectoriellement le PFD)** : Il a des difficultés au niveau de l'écriture vectorielle du PFD (voir le rectangle 4 sur la figure 42) :
  - il n'écrit pas la somme vectorielle des forces qui sont produites par son bilan, mais la différence, bien qu'il annonce effectivement une somme à la ligne précédente par le symbole algébrique Σ (la machine). Cela peut être un problème de projection
  - l'accélération dans l'équation vectorielle n'est pas l'accélération du système mais l'accélération de chacune des masses, alors que la masse est celle de M+m.

C'est la raison pour laquelle il utilise deux fois le PFD en changeant l'accélération dans l'équation du PFD.

- **tâche 7 (Projeter l'équation vectorielle)** : Il a aussi une difficulté pour la projection des équations vectorielles. Le vecteur accélération des deux masses est le même mais le module des accélérations est différent la résolution ne comporte aucune raison, ni physique ni algébrique qui autorise le changement intempestif du signe. Le manque de cohérence ne l'empêche pas d'affirmer : « *les accélérations des deux masses sont dans des sens opposés* ». On peut supposer que l'étudiant a une idée précise du résultat qu'il doit obtenir, de la forme de l'algorithme de résolution, mais qu'il n'assure quasiment jamais la cohérence algébrique et physiques dans les tâches et entre les tâches (cohérences internes et externes des tâches).

3.2.3 Conclusion pour la Stratégie de résolution S1

Les autres étudiants de la catégorie de stratégie S1 (E2, E6, E8) ont des difficultés identiques à celles qu'on a mises en évidence dans la copie de l'étudiant E3. On peut dire

- la compréhension et l'utilisation du cadre théorique de la dynamique du point matériel sont imparfaites
- les tâches les moins formelles posent problèmes à ces étudiants : choix du système.
- par contre, ces étudiants connaissent la succession des tâches à accomplir. Ces étudiants ont-ils besoin d'une aide méthodologique ? Ou est-ce cette aide qui leur permet de surmonter cette difficulté ?
- les détails et subtilités de la stratégie semblent leur échapper totalement.

3.3 Stratégie de résolution S2

Nous rappelons que cette stratégie de résolution consiste à

- étudier de deux systèmes (la masse M et la masse m)
- supposer implicitement l'égalité en module des tensions et des accélérations sans les discuter ni justifier.

Il est possible de représenter la stratégie de résolution S2 par le schéma suivant (Figure 43).

Nous avons recensé un seul étudiant dont la résolution correspond à la stratégie désignée S2 : c'est l'étudiant E10. Dans la figure 44, nous présentons sa résolution.
L'étudiant n'a pas de difficulté considérable pour accomplir les tâches. Il définit d'abord le référentiel, puis les deux systèmes (la masse M et la masse m). Il fait une liste de forces extérieures appliquées à chaque système et les montre sur les dessins.

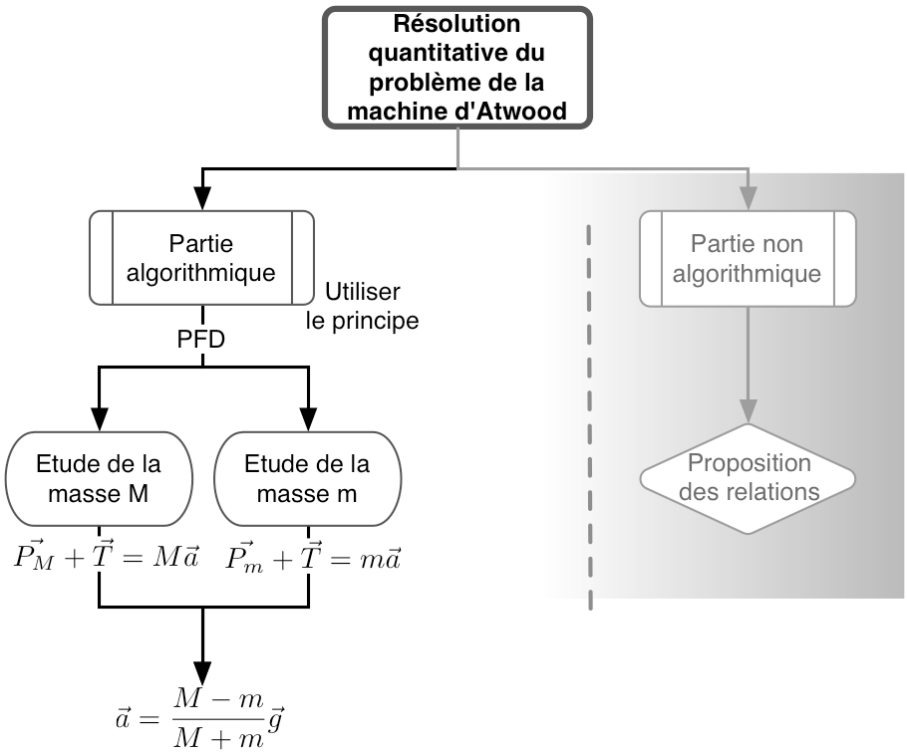


Figure 43: Stratégie de résolution S2. Dans cette stratégie de résolution, la résolution du problème est constituée uniquement de la partie algorithmique. La partie grisée de la figure signifie l'absence de la partie non algorithmique (l'absence de la discussion des propositions des relations entre les tensions et les accélérations).

L'étudiant écrit vectoriellement le PFD. Mais il confond probablement l'écriture vectorielle et sa projection. Le choix du repère est implicite : il semble qu'il choisisse un axe vertical dirigé vers le haut. Puisqu'il écrit la forme vectorielle du PFD en prenant en compte cet axe du repère implicite, et la projection consiste, pour lui, à enlever les signes de vecteur. Prenons par exemple l'équation donnée pour la masse m et la forme projetée de celle-ci. L'étudiant écrit $\vec{T} - \vec{P}_M = -M\,\vec{a}_M$. Cette équation contient déjà les signes dus à la projection sur l'axe du repère : la force de tension est dans le même sens que l'axe du repère, le poids de la masse et le vecteur accélération sont dans le sens inverse à l'axe du repère. Dans l'étape suivante de l'algorithme de la résolution qui correspond à la projection des vecteurs, l'étudiant enlève tout simplement les symboles de vecteurs.
L'étudiant précise explicitement l'égalité en norme des forces de tension et des accélérations sans les justifier, sans les argumenter et obtient l'accélération des masses. On peut finalement se demander comment il a établi les relations entre les accélérations et les forces de tension.

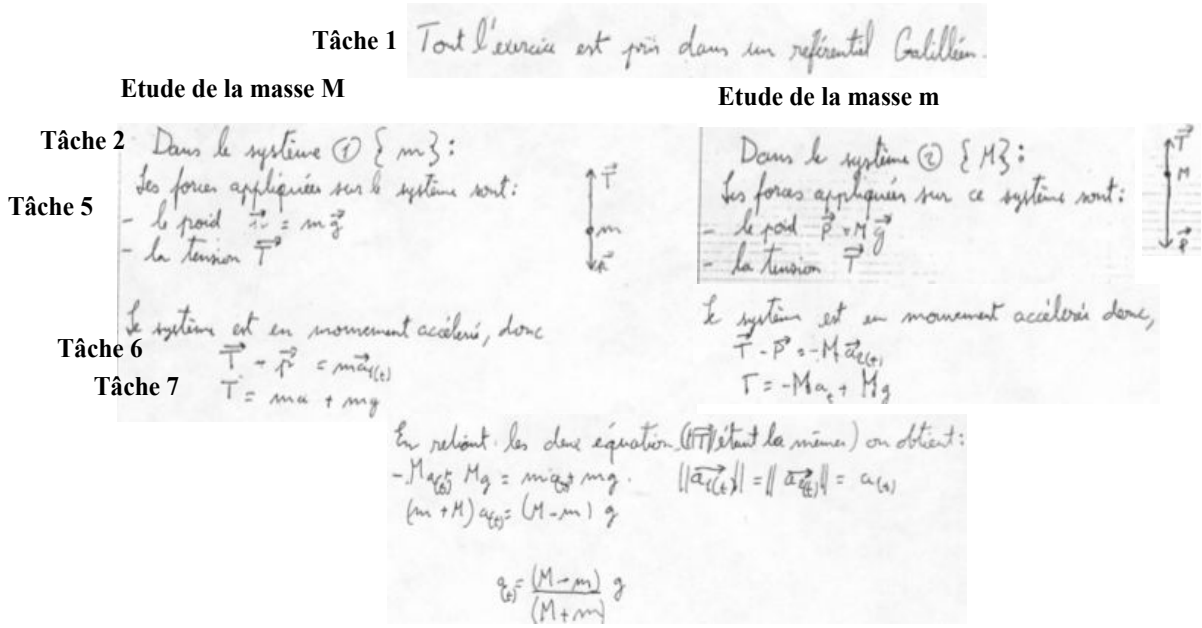


Figure 44: Résolution de l'étudiant E10

3.4 Stratégie de résolution S3

Pour la stratégie de résolution S3, la résolution du problème est également uniquement constituée de la partie algorithmique. La résolution des étudiants appartenant à cette catégorie de stratégie correspond, en général, au schéma dans la figure 45 ci-dessous.

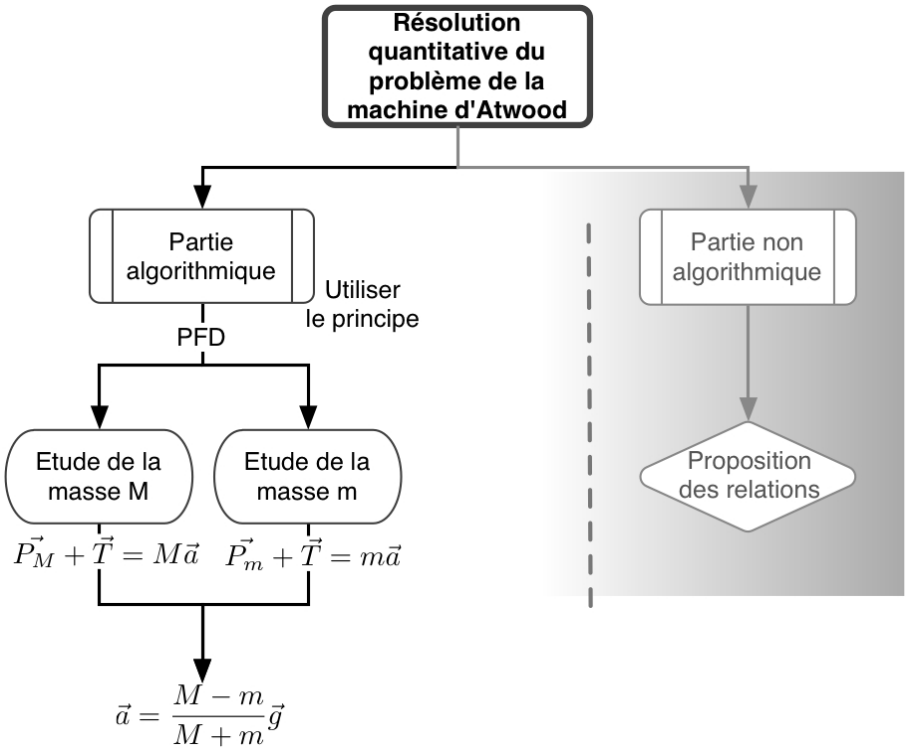


Figure 45: Stratégie de résolution S3. Les étudiants étudient deux systèmes (la masse M, la masse m) et ils n'ont pas de difficulté, en général, dans la partie algorithmique de la

résolution. La partie non algorithmique est absente dans leur résolution. Par conséquent, on constate le blocage des étudiants dans leur résolution qui entraîne l'absence d'aboutissement à une solution.

Prenons l'exemple de deux étudiants :

- les deux étudiants cherchent à asseoir toutes les relations dynamiques en s'appuyant sur des principes physiques (le PFD)
- pour l'étude du mouvement des deux masses, ils procèdent de manière logique. Ils définissent deux systèmes (la masse M et la masse m) et utilisent le PFD pour ces deux systèmes
- ils sont désorientés par la présence d'inconnues supplémentaires.

Pour trouver une relation entre les tensions, ils sont contraints à emprunter une voie peu orthodoxe :

- le premier étudiant (E9) définit un troisième système (l'ensemble des deux masses : $M+m$) il utilise le PFD pour ce nouveau système. Sa résolution s'achève avec trois équations vectorielles obtenues par l'étude de trois systèmes.
- le deuxième étudiant (E15) étudie d'abord l'équilibre du dispositif. Il en déduit les valeurs de $\vec{T}_M$ et $\vec{T}_m$. Puis, il transfère ces deux relations à l'étude des deux masses en mouvement. Il obtient la valeur de l'accélération $\vec{a}=2\vec{g}$

3.4.1 Analyse de la résolution de l'étudiant E9

La résolution de l'étudiant E9 commence par un dessin et le rappel des faits explicités dans l'énoncé du problème sous la rubrique « hypothèses » (voir Figure 46). Mais ces « hypothèses » restent accessoires dans sa copie car il n'en fait aucun usage dans sa résolution, il ne les traduit pas.

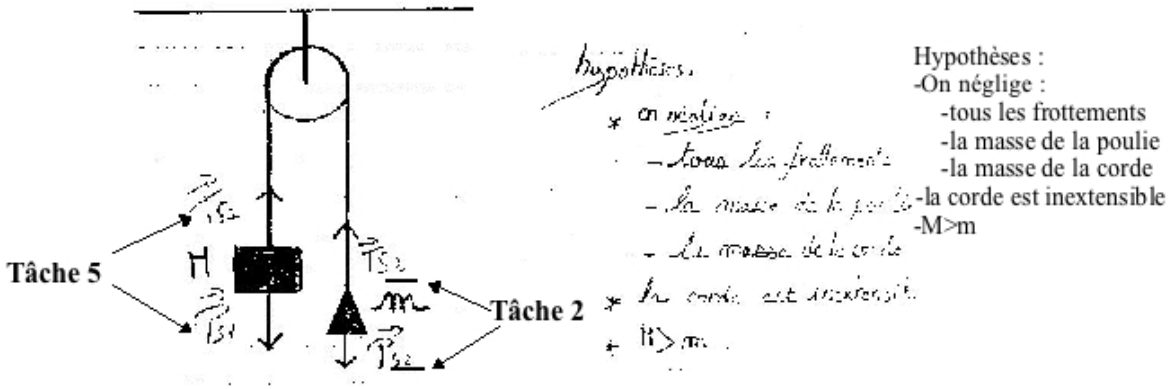


Figure 46: Extrait de la copie de l'étudiant E9

Après le dessin, l'étudiant passe à l'exécution d'un autre algorithme (Figure 47). Il définit correctement le référentiel, puis les systèmes à étudier : la masse M et la masse m. Il fait un bilan de forces appliquées à chaque système en faisant une liste de forces extérieures par des catégories de forces comme l'enseignant du TD. Il écrit correctement le PFD pour chacun des systèmes. Mais le choix de l'axe du repère est absent dans sa résolution et il ne projette pas les équations vectorielles. L'étude de ces deux systèmes lui permettent d'obtenir ces deux

équations vectorielles : $\vec{a}_M = \frac{\vec{T}_M}{M} + \vec{g}$ et $\vec{a}_m = \frac{\vec{T}_m}{m} + \vec{g}$.

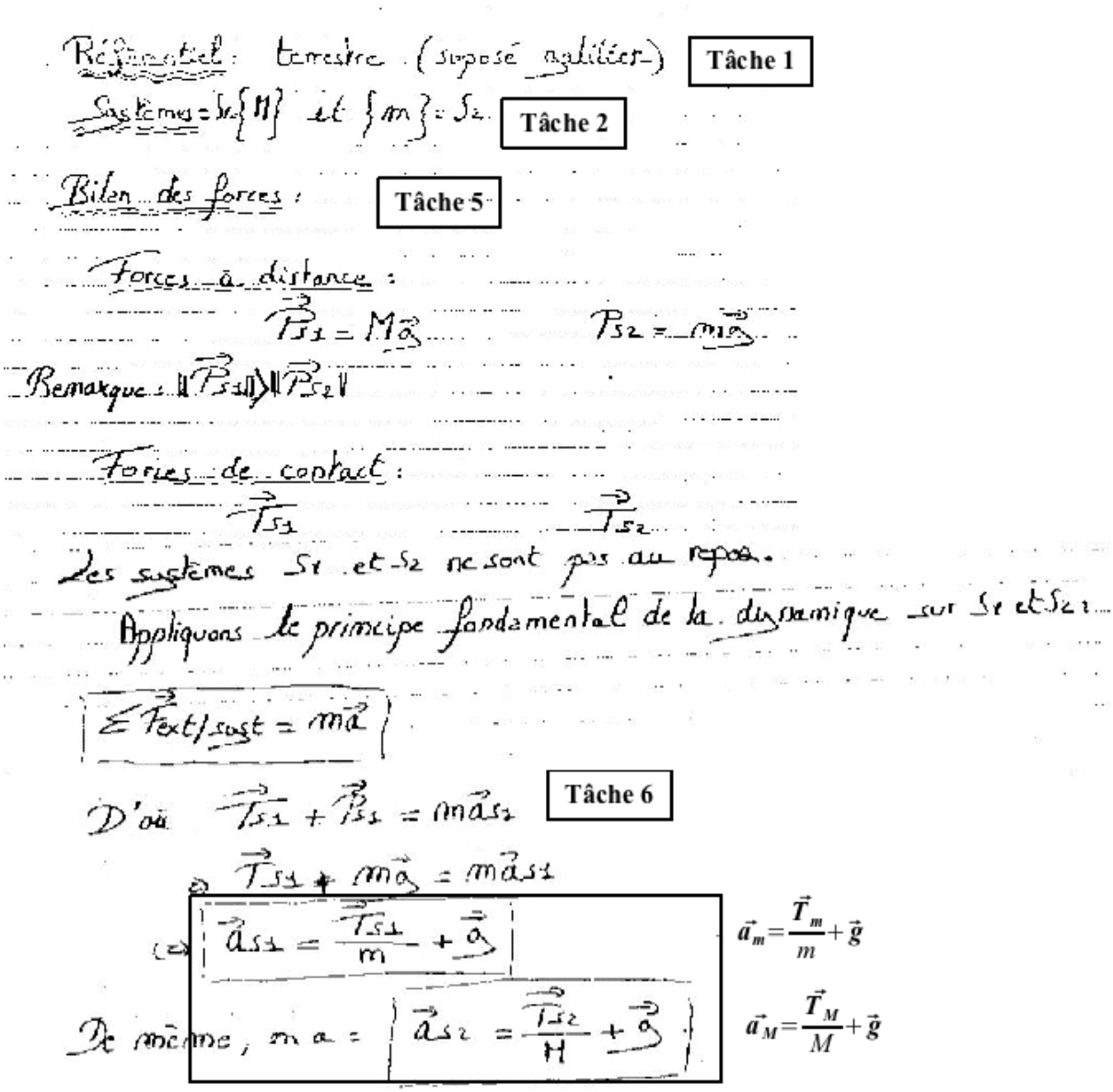


Figure 47: Extrait de la copie de l'étudiant E9. L'étudiant E9 d'abord d'utiliser le PFD pour la masse M et la masse m.

Il semble que l'étudiant est conscient qu'il n'arrive pas à obtenir la solution du problème, il définit un troisième système (M+m) pour lequel il suit le même algorithme que celui suivi pour les deux autres systèmes. Cet algorithme est exécuté correctement. L'étude de ce troisième système lui donne l'équation vectorielle $\vec{a}_{M+m} = \frac{\vec{T}_M + \vec{T}_m}{M+m} + \vec{g}$. Il est rebuté : sa résolution s'arrête avec trois équations vectorielles et sans solution (Figure 48).

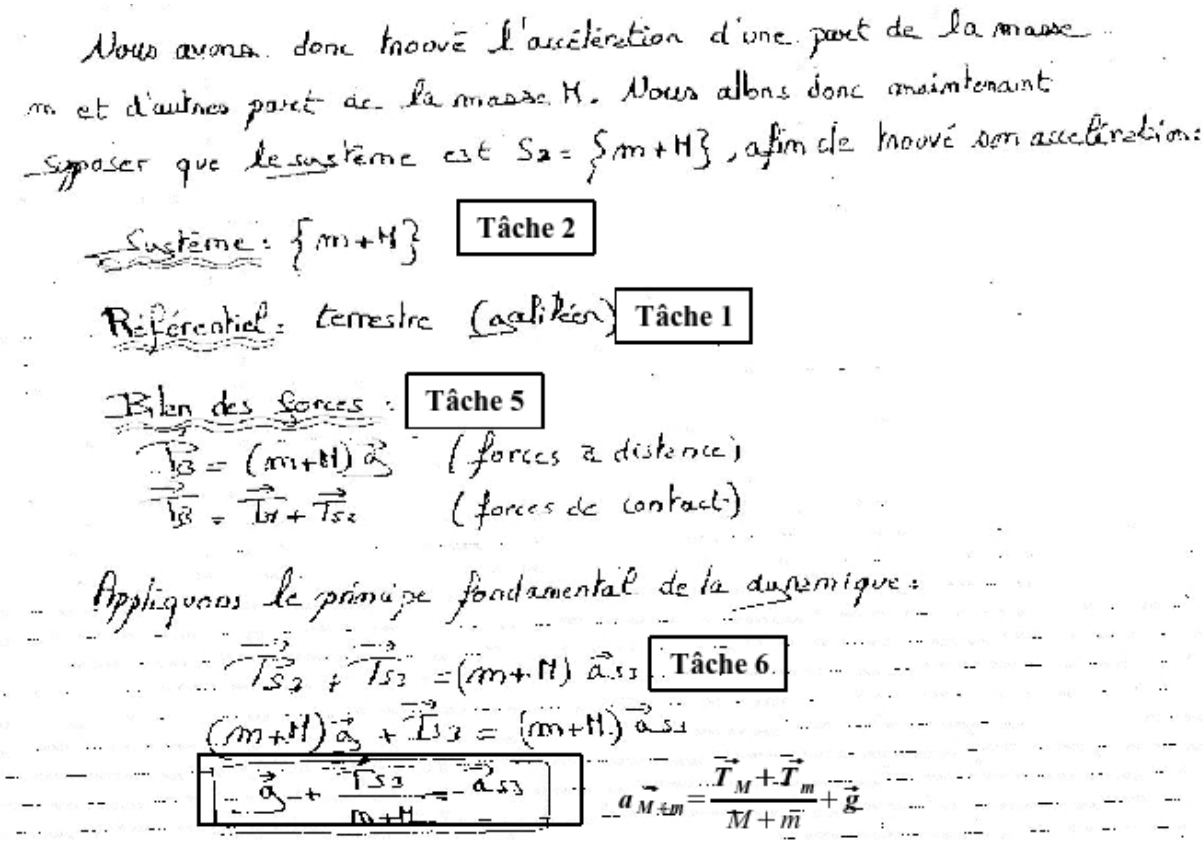


Figure 48: Etude du système (M+m) par l'étudiant E9

3.4.2 Analyse de la résolution de l'étudiant E15

Nous analyserons la résolution de l'étudiant E15. Dans la figure 49, nous présentons la copie de cet étudiant.

L'étudiant fait correctement le bilan de forces et écrit correctement le PFD. Ce bilan de forces manifeste aussi le choix des systèmes à étudier. Il n'instancie pas l'accélération pour chaque système, car il utilise le même symbole « $\vec{a}$ » pour deux systèmes. Il a normalement à résoudre le système d'équations :

$$\vec{P}_M + \vec{T}_M = M\,\vec{a}$$
$$\vec{P}_m + \vec{T}_m = m\,\vec{a}$$

L'étudiant, face à ce système d'équations, éprouve le besoin d'établir de nouvelles relations pour les forces de tension. Bien qu'il rappelle les faits explicités dans l'énoncé du problème au début de sa résolution, il n'en fait pas usage. Il veut établir une relation tout en utilisant le principe (PFD). Il étudie l'équilibre du dispositif qui lui permet d'exprimer les forces de tension en fonction des poids des masses.

Après cette étude de l'équilibre du dispositif, il change de situation, et passe à la situation proposée où les masses sont en mouvement tout en transférant les deux relations obtenues pour la première situation à l'étude des deux masses en mouvement. Il remplace les tensions dans les équations vectorielles du PFD par les expressions des tensions obtenues pour

l'équilibre. Ce faisant, il fait une erreur lors de la projection des équations avec la valeur absolue. Ses calculs hasardeux lui permettent finalement d'obtenir une accélération deux fois supérieures à l'accélération gravitationnelle : $\vec{a}=2\vec{g}$. Il obtient donc un résultat contradictoire avec la finalité du dispositif : le dispositif avait pour objectif de ralentir des mouvements des deux masses.

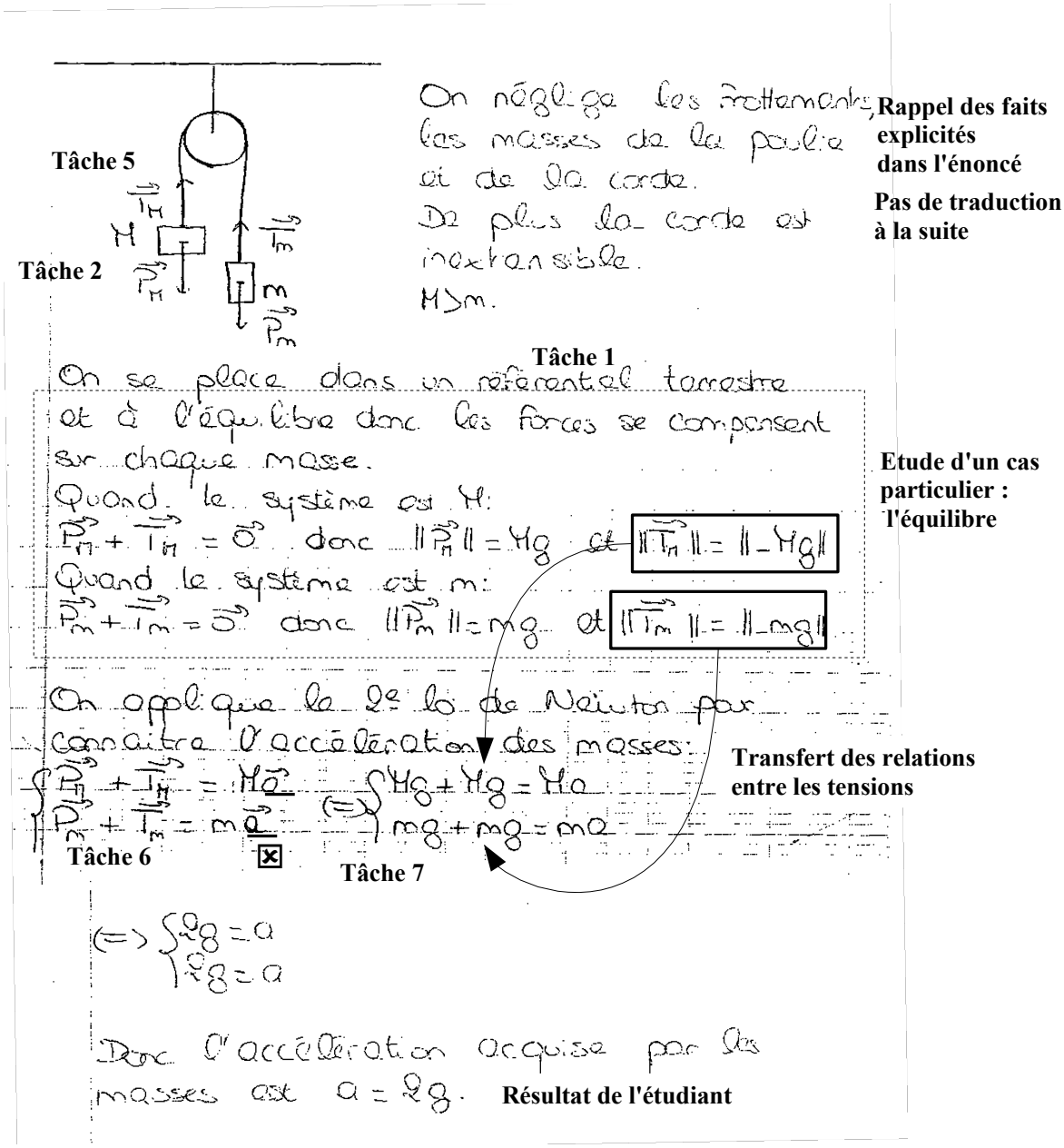


Figure 49: Copie de l'étudiant E15. Sa résolution commence, comme celle de l'étudiant E9, par le dessin et le rappel des faits explicités dans l'énoncé du problème. Comme l'étudiant E9, il n'en fait aucun usage. Il cherche à résoudre le problème en utilisant uniquement le PFD.

3.4.3 Conclusion pour les résolutions des étudiants E9 et E15

Dans les figures 50 et 51, nous représentons les résolutions des deux étudiants en termes de

stratégie de résolution.

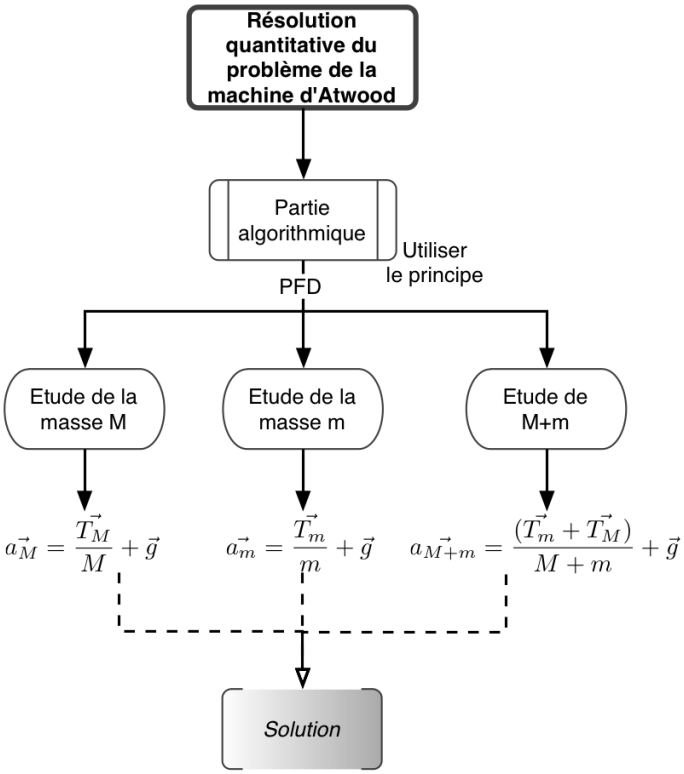


Figure 50: Stratégie de l'étudiant E9

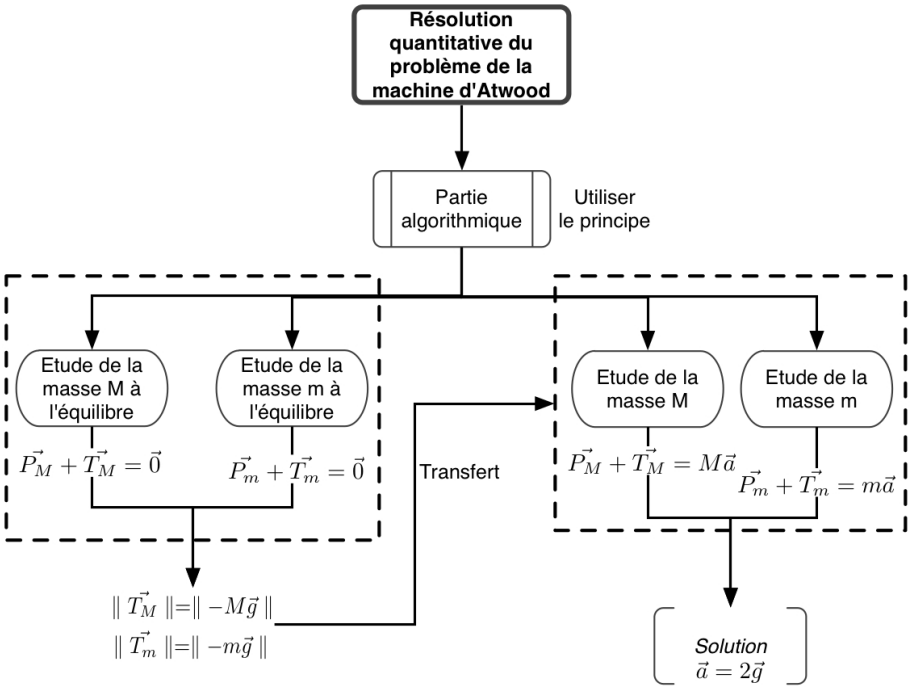


Figure 51: Stratégie de l'étudiant E15

Leur résolution est uniquement constituée de la partie algorithmique. L'algorithme de

résolution est connu, utilisé de manière pertinente. La succession des tâches ne pose pas de problème. Il y a encore ça et la pour différentes tâches des problèmes qui apparaissent :

- l'étudiant E9 n'a pas de difficulté dans la partie algorithmique de la résolution sauf que deux tâches sont absentes : le choix de l'axe du repère et la projection des équations vectorielles.
- L'étudiant E15, comme l'autre étudiant, ne choisit pas l'axe du repère mais pourtant il projette les équations vectorielles. Il a une difficulté pour la tâche de projection.

Les étudiants ont perçu l'intention affichée, présentée de la mécanique comme une science déductive. L'utilisation des principes doivent permettre d'anticiper sur les résultats expérimentaux. Un seul principe a été présenté aux étudiants. Donc toutes les relations doivent provenir de l'utilisation de ce principe. Par conséquent, leur stratégie est uniquement constituée des étapes algorithmiques. C'est aussi leur difficulté principale qui réside sur les tentatives pour trouver une relation sans se référer à une approche non algorithmique. Ils cherchent à tout prix un arrangement quel qu'il soit :

- l'étudiant E9 utilise successivement le PFD d'abord pour 2 systèmes, puis un autre système, non défini au début de la résolution mais défini ultérieurement.
- l'étudiant E15 cherche à établir une relation pour les forces de tension tout en étudiant l'équilibre du dispositif à travers l'utilisation du PFD.

On peut dire que ces étudiants ont un souci de cohérence très fort : leurs résolutions dans leur ensemble sont organisées par le principe épistémologique affiché.

3.5 Stratégie de résolution S4

Nous rappelons que pour la stratégie S4, la résolution du problème contient une partie algorithmique où on utilise le PFD et une partie non algorithmique où on propose des relations (forces de tension et/ou accélérations des masses) que l'on justifie en s'appuyant sur l'un des faits de la situation. En général, les stratégies des étudiants dans la catégorie de stratégie S4 correspond au schéma de la figure 52 suivante.

Nous analyserons à la suite deux copies d'étudiants (E4 et E12) où la résolution du problème est constituée de deux parties :

- la partie algorithmique où les étudiants utilisent le PFD pour la masse M et pour la masse m, cette partie ne pose pas problème à ces étudiants
- la partie non algorithmique où
  - l'étudiant E4 propose une relation pour la force de tension qui a un statut hypothétique qui est ensuite perdu et ne permet pas l'obtention du résultat pertinent
  - l'étudiant E12 propose une relation entre les deux forces de tension et une relation entre les accélérations des deux masses, les relations n'ont pas un statut hypothétique mais on voit la vérification du résultat obtenu.

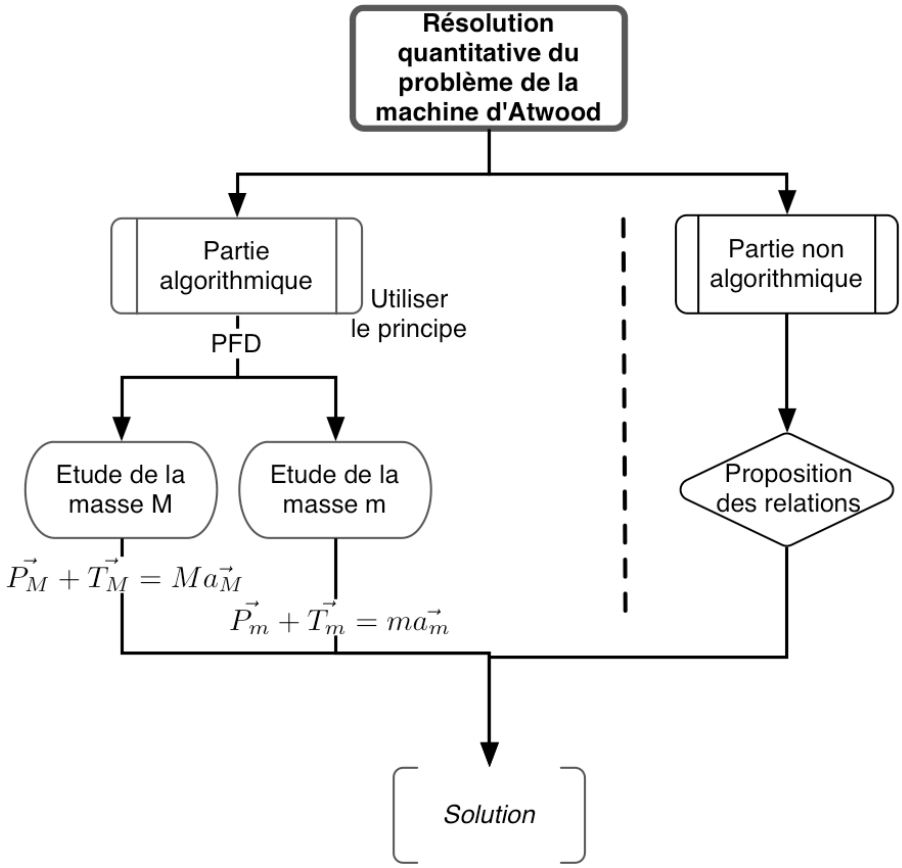


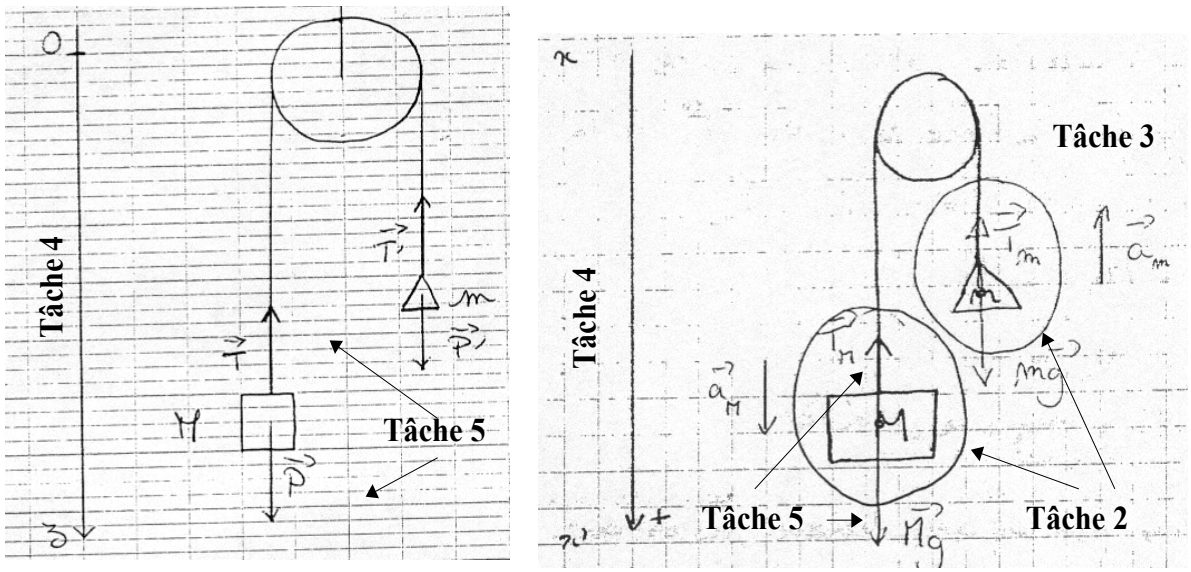
Figure 52: Stratégie de résolution S4. La résolution du problème est constituée de deux parties : la partie algorithmique concernant l'utilisation du PFD pour les deux masses et la partie non algorithmique concernant la proposition des relations entre les tensions et/ou les accélérations. Les étudiants pourraient avoir des difficultés dans la partie algorithmique lors de l'accomplissement de certaines tâches ou bien dans la partie non algorithmique (par exemple la proposition des relations non attendues), ce qui pourrait entraîner différents résultats dans les résolutions. C'est la raison pour laquelle nous écrivons la « solution » au lieu d'écrire l'expression algébrique des accélérations des masses.

3.5.1 Partie algorithmique dans les résolutions des étudiants E4 et E12

La résolution des deux étudiants (E4, E12) commence par un dessin qui correspond à l'accomplissement de plusieurs tâches. Dans la figure 53, nous montrons les tâches accomplies à travers les dessins des étudiants.

Dans les copies des deux étudiants, l'accomplissement des tâches dans la partie algorithmique de la résolution se ressemblent. Les deux étudiants accomplissent les tâches de la même manière, sauf que l'étudiant E4 a une difficulté pour la tâche de la projection alors que l'étudiant E12 n'a aucune difficulté sur ce point. C'est la raison pour laquelle nous nous référerons à la copie de l'étudiant E4 pour illustrer la partie algorithmique de la résolution. Les tâches accomplies par l'étudiant E4 sont montrées dans la figure . Lors de l'analyse de la partie non algorithmique de la résolution, nous nous référerons à nouveau à la copie de l'étudiant

E12.



Etudiant E4 **Etudiant E12**

Figure 53: Dessins qui se trouvent tout au début des copies des étudiants E4 et E12. Leurs dessins traduisent l'accomplissement des tâches 2.2 (définir le système), 2.4 (choisir les axes du repère), tâche 5 (faire le bilan de forces appliquées aux systèmes. Dans le dessin de l'étudiant E12, on voit de plus l'accomplissement de la tâche 3 (écrire l'accélération des systèmes). Cet étudiant entoure aussi les masses pour désigner les systèmes à étudier.

L'étudiant E4 précise les systèmes étudiés et le référentiel d'étude (tâche 1 et tâche 2). Puis, il fait une liste de forces extérieures appliquées à chacun des systèmes (tâche 5). Il précise à nouveau l'axe du repère choisi et le principe qu'il va utiliser, le PFD, en écrivant la forme générale du PFD. Il écrit vectoriellement le PFD pour deux systèmes (tâche 6) et il projette les équations du PFD (tâche 7).

3.5.2 Partie non algorithmique dans les résolutions des étudiants E4 et E12

Dans la figure 54, nous présentons la relation qu'il propose ainsi que le reste de sa résolution.

C'est la seule partie vraiment rédigée dans le registre de la langue naturel de la copie de l'étudiant E4. L'étudiant E4 est prudent dans sa réponse. Il n'affirme pas que la relation qu'il propose est exacte ; il le « suppose » et il emploie ultérieurement le conditionnel pour présenter le résultat « *la petite masse serait entraînée par le poids de la grande masse* ».

L'étudiant E4 ne postule qu'une seule relation : la relation entre la force de tension appliquée à la masse m et le poids de la masse M, à savoir $\|\vec{T}_m\|=\|\vec{P}_M\|$ [82] . On trouve la conception exprimée antérieurement[83] : la corde transmet à l'une des extrémités les forces qui s'exercent

82 McDermott et ses collègues [24] ont étudié les conceptions des étudiants sur la force de tension pour les dispositifs proches de la machine d'Atwood et pour la machine d'Atwood dans leur travail qui date de 1994. Ils précisent que les étudiants considèrent souvent que la tension appliquée à la masse plus lourde est plus petite que celle appliquée à la masse plus légère, mais ils ne parlent de la relation algébrique telle qu'elle est établie par l'étudiant E4 $\|\vec{T}_m\|=\|\vec{P}_M\|$.

83 Voir le paragraphe 2.2 (pp. 153).

sur l'autre extrémité (Figure 55).

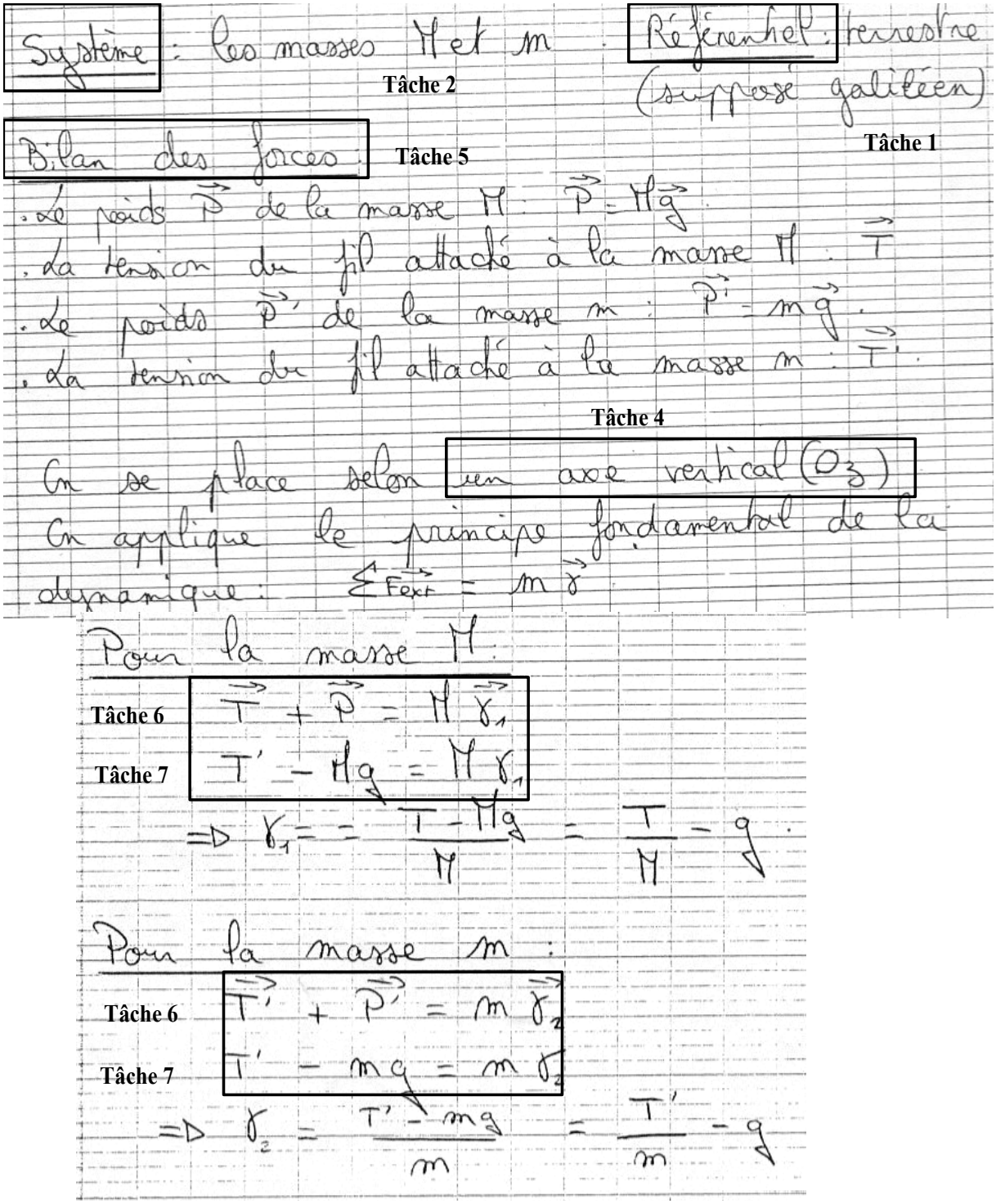


Figure 54: Extrait de la résolution de l'étudiant E4. L'étudiant accomplit de manière explicite toutes les tâches.

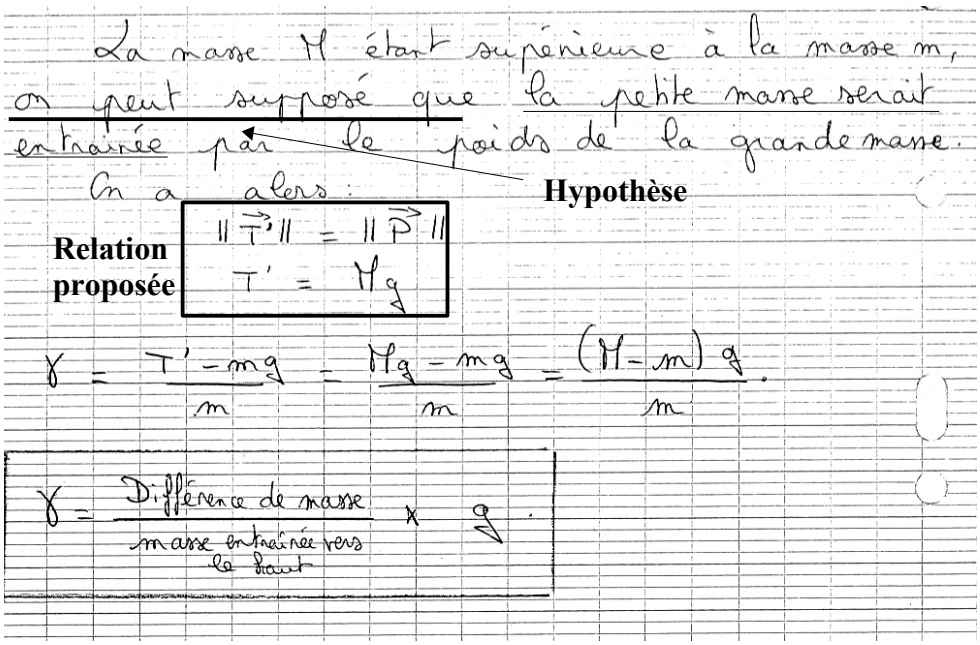


Figure 55: Proposition de la relation pour la force de tension $\vec{T}_m$ par l'étudiant E4

Il formalise de manière mathématique la relation qu'il a construite et il en tire un résultat conforme à ses hypothèses. Mais il ne semble pas avoir gardé en mémoire la trace du statut hypothétique de la relation, des opérations et du résultat obtenu. Il ne semble pas non plus éprouver le besoin d'analyser plus finement la pertinence du résultat obtenu (Figure 55).

La mécanique pour cet étudiant (E4) semble avoir le statut de science déductive – toute relation s'appuie sur des principes-. Dans la pratique, il fait appel à deux types de principes, ceux issus de la physique et à défaut ceux du sens commun.

La stratégie de l'étudiant est donc constituée de parties algorithmiques s'appuyant sur des principes physiques. A défaut, il est possible de proposer des relations au statut fortement hypothétique. Mais ce statut hypothétique semble oublié ensuite lors de la manipulation des relations algébriques.

Ainsi l'étudiant semble avoir bien décodé la pratique de l'enseignant : la relation introduite ne repose sur aucun principe connu de l'étudiant, elle est hypothétique. Soulignons que le caractère hypothétique de la relation construite n'est pas apparent dans la stratégie de l'enseignant.

Cependant, l'étudiant E12 argumente et formalise la relation attendue entre les tensions et entre les accélérations (Tableau 18).

Argumentation de l'étudiant E12	Relation établie
« Puisque la masse de la poulie, celle de la corde et les frottements sont négligés, la force de tension est la même en tout point de la corde »	$\vec{T}_M = \vec{T}_m$
« M et m sont reliés par une corde tendue, ils ont donc la même accélération en norme (mais de sens contraire) »	$\vec{a}_M = -\vec{a}_m$

Tableau 18: L'étudiant E12 se réfère aux faits explicités dans l'énoncé du problème afin de postuler les relations algébriques.

A la fin de la résolution, il éprouve le besoin de contrôler la pertinence du résultat obtenu : le fait que l'accélération calculée est inférieure à l'accélération gravitationnelle assure la pertinence de son résultat (voir Figure 56).

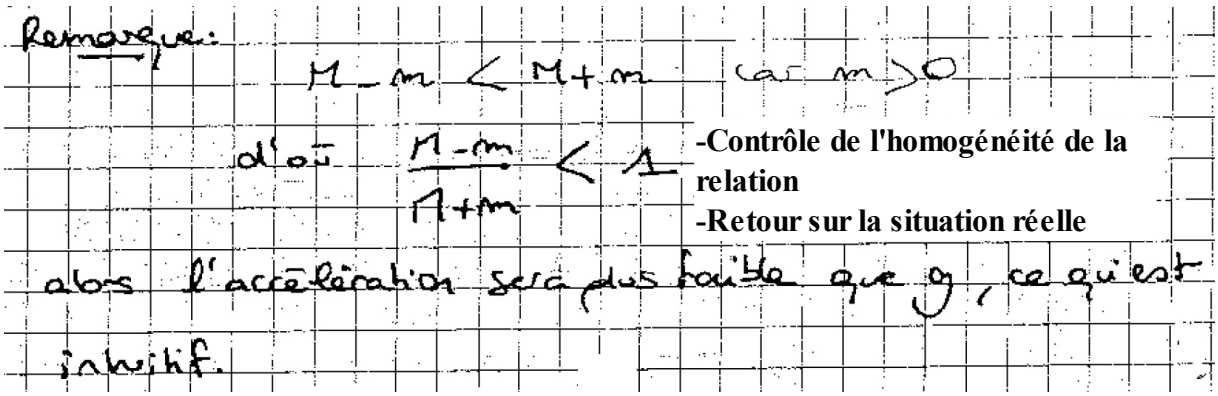


Figure 56: L'étudiant E12 vérifie la cohérence du résultat obtenu : il compare l'accélération des masses avec l'accélération gravitationnelle.

L'étudiant a perçu que pour l'enseignant la discussion d'un résultat suppose un retour sur la situation réelle. La référence est ici la chute libre, avec une accélération maximale g, tout mouvement impliquant des masses entraînées par leur propre poids ne peut dépasser cette accélération limite.

3.5.3 Conclusion pour les résolutions des étudiants E4 et E12

Les étudiants s'appuient sur le cadre théorique de la dynamique du point matériel et la résolution des deux étudiants est constituée de deux parties dont la partie algorithmique et non algorithmique. Leur résolution en termes de stratégie de résolution a été représentée dans les figures 57 et 58.

La partie algorithmique de la résolution est bien acquise par les étudiants et elle ne pose aucun problème à deux étudiants.

Les étudiants décodent de manière différente la pratique de l'enseignant :

- Dans la copie de l'étudiant E4, la partie non algorithmique a un statut hypothétique bien que la relation supposée dans cette partie relève d'une conception, mais il ne semble pas garder le statut hypothétique de la relation proposé à la fin de la résolution car ne vérifie plus finement la pertinence du résultat obtenu.
- L'étudiant E12 utilise la relation *ad hoc* proposée par l'enseignant ($\vec{T}_M = \vec{T}_m$) en la

justifiant par des arguments mais il éprouve le besoin de vérifier la pertinence du résultat obtenu à travers deux vérifications.

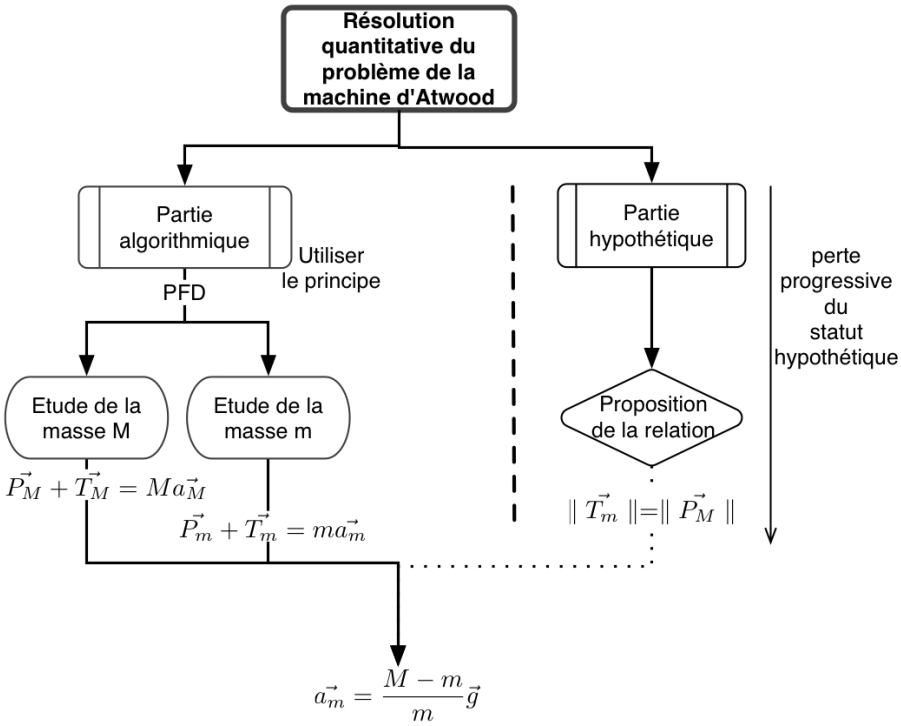


Figure 57: Stratégie de l'étudiant E4

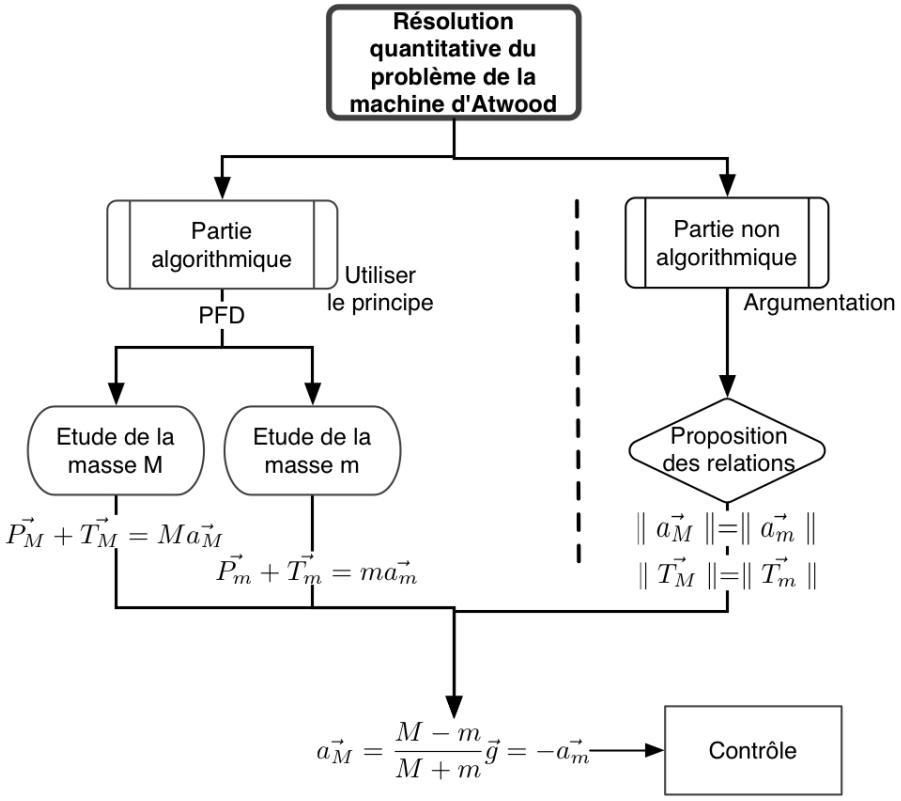


Figure 58: Stratégie de l'étudiant E12

3.6 Conclusion sur les stratégies des étudiants et leur difficultés

Nous avons prévu au début de ce chapitre (pp.143) que *« la résolution des enseignants occulte fréquemment une partie non algorithmique correspondant au recours à des relations hypothétiques », que « ces relations se justifieraient par des principes inconnus des étudiants […] » et que « on peut donc s'attendre à ce que les étudiants ne puissent percevoir la totalité de la stratégie des enseignants ».* Nous constatons par l'étude présente que les étudiants ne perçoivent pas la totalité de la stratégie de résolution des enseignants.

Pour la majorité des étudiants, la stratégie de résolution est très rudimentaire : elle est constituée uniquement de la partie algorithmique. L'analyse des copies des étudiants sous la catégorie S1, S2 et S3 met bien en évidence l'existence d'une seule partie dans la résolution. Dans ces trois catégories de stratégie, la référence aux faits explicités dans l'énoncé du problème est presque absente, sauf que dans certaines copies d'étudiant la référence au réel se fait par le rappel des faits explicités dans l'énoncé du problème mais les faits ne sont pas traduits dans le registre algébrique dans leur résolution.
Certains étudiants (dont nous avons analysé les copies sous la catégorie S4), ont perçu qu'il est nécessaire de traduire la contrainte de la situation particulière. Ils cherchent à tout prix un expédient. Comme les enseignants, les étudiants argumentent les relations qu'ils supposent. Ils s'appuient souvent sur les faits explicités dans l'énoncé du problème, sans tenir compte de la pertinence des faits sélectionnés et de leur traduction algébrique. Pour ces étudiants, bien que la stratégie de résolution se compose de deux parties : la partie algorithmique et la partie non algorithmique, sauf un étudiant, aucun étudiant n'envisage que cette partie non algorithmique pourrait avoir un statut hypothétique et qu'elle devrait le conserver jusqu'au bout de la résolution.

4 Conclusion

Nous avons posé les questions suivantes :

- Quel est le rapport personnel des étudiants à la résolution du problème de la machine d'Atwood ?
- Quelle stratégie est mise en œuvre par les étudiants ? La stratégie de résolution de l'enseignant est-elle perçue par les étudiants? Si oui est-elle perçue en totalité ou partiellement ? Comment est- elle perçue ?
- Quelles sont leurs difficultés ?
  - Ont-elles pour origine l'organisation praxéologique liée à l'utilisation du PFD ?
  - Ont-elles pour origine la non perception de l'intention et de la stratégie de l'enseignant ?

Rapport personnel des étudiants à la résolution du problème de la machine d'Atwood
Pour le rapport personnel des étudiants à la résolution du problème de la machine d'Atwood, nous ferons les conclusions suivantes :

- les résolutions des étudiants sont centrées sur la résolution quantitative du problème
- les étudiants s'appuient sur un seul cadre théorique de la physique : la mécanique du point matériel
- les étudiants n'accomplissent pas de manière implicite les tâches fréquemment

implicites dans les résolutions d'enseignants comme la définition du référentiel, du système, du repère …

- ils ont acquis l'algorithme nécessaire pour l'utilisation du PFD, c'est-à-dire que les étudiants accomplissent de manière algorithmique et explicite les tâches de la technique de l'utilisation du PFD tout en cherchant à structurer leur résolution comme celle de l'enseignant du TD, bien que notre expérimentation soit effectuée tout au début de l'enseignement. Il semble que cette structure provient de l'enseignement antérieur.
- ils exécutent également une série de tâches qui constitue un autre algorithme, liées à la présentation sous formes de schéma de l'organisation spatiale du dispositif. L'utilisation du PFD met en œuvre les deux algorithmes décrits.
- Comme nous avons vu dans les résolutions de certains enseignants au chapitre 4, pour les étudiants, le fait d'argumenter et la richesse des arguments comptent plus que la nature des arguments (ou la pertinence des arguments sélectionnés).
- les étudiants ont plusieurs intentions dont une est manifeste : ils se placent dans une perspective prédictive, ils cherchent à anticiper les résultats tout en utilisant les lois de la mécanique du point matériel.
- Ces intentions ne permettent pas aux étudiants de construire une stratégie de résolution complète et cohérente. Elle les empêchent d'imaginer une stratégie de résolution qui devrait être constituée d'une partie algorithmique liée à l'utilisation du PFD et d'une partie hypothétique.

Difficultés des étudiants

En ce qui concerne les difficultés des étudiants, les difficultés des étudiants se varient.

Certains étudiants ont des difficultés lors de l'accomplissement de certaines tâches de la technique de l'utilisation du PFD. Le cheminement emprunté par les étudiants qui ont des difficultés majeures dans la partie algorithmique de la résolution ne peut pas être qualifié de stratégie.

Certains n'ont aucune difficulté concernant la technique de l'utilisation du PFD. Ces étudiants n'ont pas en général de difficulté majeure dans la partie algorithmique de la résolution. Mais pour ces étudiants la partie non algorithmique n'est pas intégrée dans la stratégie de résolution comme il faut.

Impact des pratiques des enseignants sur le rapport personnel des étudiants

Ce qui est l'objet de l'enseignement (tâches et méthodes) est perçu par les étudiants. Ce qui est implicite est partiellement décodé, mal perçu et peu intégré par les étudiants dans une stratégie d'ensemble.

Il y a dans ce cas particulier une distance trop importante entre les actes des enseignants et leurs intentions affichées pour que l'étudiant puisse les décoder. La transposition didactique devrait présenter de manière claire les stratégies, ce qui permettrait à l'enseignant d'être plus à même d'expliciter ce qu'il fait et à l'étudiant de percevoir l'intégration des parties algorithmiques et non algorithmiques des stratégies, de diversifier la stratégie de résolution proposée des problèmes de mécanique.

Chapitre VII

Proposition d'une stratégie de résolution aux étudiants et analyse des données

Chapitre VII Proposition d'une stratégie de résolution aux étudiants et Analyse des données

Dans le chapitre précédent (Chapitre 6), à travers la résolution du problème de la machine d'Atwood, nous avons vu que les étudiants ont du mal de décoder les intentions et les stratégies de résolutions des enseignants et qu'ils ne sont pas capables de construire une stratégie de résolution complète et cohérente. Dans ce chapitre, nous avons pour objectif de répondre aux questions suivantes :

- Quelle aide faut-il proposer aux étudiants pour qu'ils construisent une stratégie ?
- Quel sera le rapport personnel de l'étudiant à la résolution du problème ? Quelle stratégie est perçue et mise en œuvre par l'étudiant ?

Pour discuter ces questions, nous avons mis en place une expérimentation dans un groupe de travaux dirigés au cours de l'année 2005. Nous avons conçu un problème proche du celui de la machine d'Atwood étudié dans le chapitre précédent. Le problème a été donné aux étudiants en tant que devoir de la maison. Nos données d'analyse proviennent des productions écrites de 23 étudiants.

L'organisation du chapitre 7 est détaillée dans la figure 59 ci-dessous.

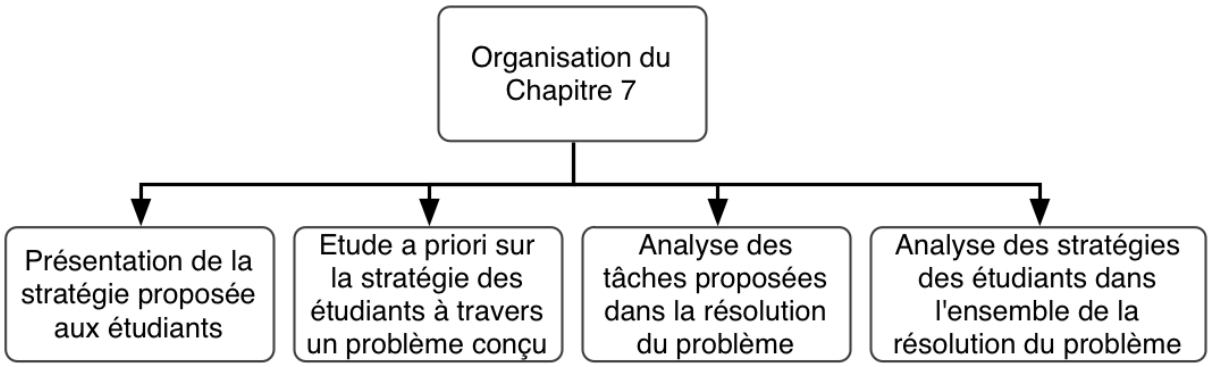


Figure 59: Organisation du chapitre 7

Dans un premier temps, nous situerons la stratégie de résolution proposée aux étudiants par rapport aux autres stratégies de résolutions proposées par Reif [7] et d'autres chercheurs. Dans un deuxième temps, nous présenterons le problème proposé aux étudiants et conçu en fonction de la stratégie adoptée de notre part et nous ferons une analyse a priori sur l'accomplissement des tâches proposées dans le problème et sur la stratégie possibles des étudiants dans l'ensemble de la résolution.
Nous analyserons d'abord les productions des étudiants concernant l'accomplissement des tâches proposées dans le problème et ensuite en s'appuyant quelques copies d'étudiants nous analyserons les stratégies mises en œuvre par les étudiants dans la résolution de ce problème.

1 Quelle stratégie proposer pour aider les étudiants à résoudre qualitativement le problème ?

1.1 Stratégies proposées dans l'étude bibliographique

Dans l'étude bibliographique, il apparaît que divers auteurs suggèrent une « étude qualitative » pour aider à la résolution quantitative de problèmes de physique. Les chercheurs accordent une place importante à cette étude[84].

Par exemple, Reif [7] conseillait un schéma de résolution (un cheminement stratégique à suivre) dans lequel la résolution commence par l'étude qualitative de la situation et s'achève par le contrôle de résultats.

L'étude qualitative est souvent considérée comme une étape à effectuer avant l'utilisation des principes. Il y a plusieurs manières d'effectuer cette étude suivant les chercheurs. Mais, elle s'appuie souvent sur :

- le choix du système à étudier, qui correspond à la tâche 2 de la technique de l'utilisation du PFD
- l'étude du mouvement, qui correspond en partie à la tâche 3 de cette technique
- l'identification des forces extérieures qui correspond à la tâche 5 de cette technique
- et diverses représentations de problèmes, telle que la représentation du problème par le schéma, par le diagramme de forces.

Ainsi, les chercheurs supposent que l'étude qualitative dans ce sens diminue la proportion des étudiants qui utilisent avant toute chose le principe physique en jeu, ce que les chercheurs considèrent comme étant une source de difficultés pour les étudiants.

En tout cas, ces tâches, supposées faire partie d'une étude qualitative, sont des tâches nécessaires à la résolution quantitative de problèmes. La méthode de résolution proposée aux étudiants (MR-UJF) présente une succession des tâches pour utiliser le PFD. Dans le chapitre précédent, nous avons vu que les quelques étudiants avaient des difficultés pour l'accomplissement des tâches, (telles le bilan de forces, le choix du système et la projection des équations vectorielles….) et que la majorité des étudiants accomplissent les tâches de manière explicite avant l'écriture vectorielle du PFD.

Nous nous référons à nouveau à notre étude bibliographique où Reif [7] donnait une liste de moyens de contrôles sous forme de questions[85]. Par exemple, il proposait de poser des questions :

- *Le but est-il atteint ?*
- *Y a t il des inconnues dans la solution ?*

De telles questions pourraient-elles être porteuses de sens pour les étudiants, alors que les étudiants proposent des expressions algébriques de l'accélération des masses erronées, du type :

- $\vec{a_M} = 2\vec{g}$ (l'étudiant E15)

84 L'étude qualitative a été largement précisé dans le chapitre 1 (voir le paragraphe 3).
85 Voir le paragraphe 3 « Revue des travaux sur les stratégies de résolution » au chapitre 1.

- $\vec{a_M} = \frac{M\vec{g} + \vec{T_M}}{M}$ (l'étudiant E13)
- $\vec{a_m} = \frac{M-m}{m}\vec{g}$ (l'étudiant E4)

Pour les étudiants le but de la résolution est d'obtenir l'expression de l'accélération des masses, et ce but est atteint dès qu'une expression algébrique est trouvée, quelque soit son expression.

Quant à la question : « Y a t il des inconnues dans la solution ? », poser cette question peut aider l'étudiant repérer si la résolution est atteinte un état « résolu ». Mais nous avons vu des copies où les étudiants ne sont pas conscients de l'inconnue dans l'équation obtenue ou bien ils n'ont pas de moyen pour gérer correctement les inconnues (par exemple absence de la partie non algorithmique dans la résolution de certains étudiants).

Les questions, proposées par Reif, sur le contrôle de résultats peuvent aussi servir d'indices pour les enseignants. Ils peuvent les utiliser par exemple lors de la résolution de problèmes au tableau et en montrer l'usage et la pertinence aux étudiants.

Reif proposait d'étudier la cohérence de résultats avec les cas limites de la situation. La question qui se pose est comment aider l'étudiant chercher lui-même des cohérences avec les autres informations concernant la situation étudiée, ce qui revient à poser la question de comment de l'apprentissage de méthodes de contrôle appropriées.
Mais, ce qui est le plus important dans ces travaux, c'est qu'on ne sait pas quel est le statut du contrôle de résultats aux yeux des étudiants.

1.2 Stratégie de résolution proposées aux étudiants

Nous avons mis en place un dispositif pédagogique qui repose sur une stratégie de résolution en trois étapes (Figure 60) conformément aux recommandations des didacticiens (Chapitre 1) :

- une étude qualitative de la situation (Etape 1)
- une résolution quantitative du problème (Etape 2)
- le contrôle de résultat (Etape 3).

L'étude qualitative aura pour objectifs de :

- discuter avant tout calcul la partie non algorithmique de la stratégie de résolution quantitative de problèmes
- permettre à l'étudiant de prendre conscience des relations à établir lors de la résolution quantitative (si une relation, perçue sur le plan qualitatif, est utilisée ultérieurement sans démonstration dans la résolution quantitative, on parlera ainsi d'un transfert de l'étude qualitative vers l'étude quantitative)
- anticiper certains résultats de l'étude quantitative (ces résultats possèdent alors un statut hypothétique pour la résolution quantitative car les prévisions seront contrôlées à l'issue de la résolution quantitative du problème, avec la solution obtenue).

Pour atteindre cet objectif, nous avons décidé de guider la tâche d'analyse qualitative en proposant aux étudiants différentes affirmations sur la force de tension à discuter. La tâche des étudiants sera plus précisément de discuter les affirmations en vue de les valider ou de les

rejeter en justifiant leurs raisonnements.

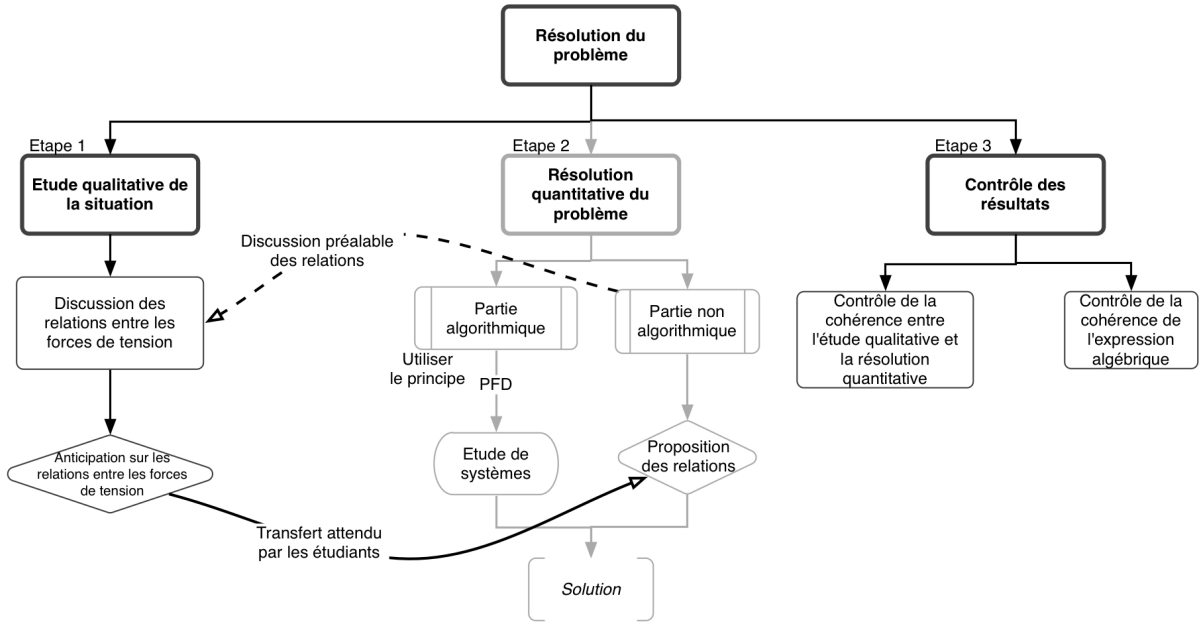


Figure 60: Présentation de la stratégie proposée aux étudiants. Etant donné que la partie « résolution quantitative » correspond à la tâche habituelle, nous l'avons montrée sur la figure par des traits en gris.

La résolution quantitative correspond à un énoncé traditionnel de problème de TD. Il s'agit d'obtenir une expression algébrique pour les forces de tension ou les accélérations des masses.

Le contrôle de résultats aura en particulier deux objectifs :

- le contrôle de la cohérence interne de la solution elle-même par la vérification de l'homogénéité des expressions algébriques
- le contrôle de la cohérence externe de l'expression algébrique de l'accélération par confrontation avec les prévisions produites par l'étude qualitative dans quelques cas limites.

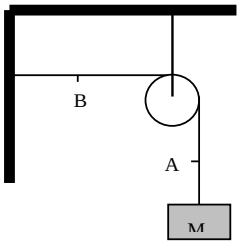
2 Présentation et analyse d'un problème conçu

Le problème conçu en fonction de la stratégie proposée est présenté dans la figure 61. Dans ce devoir, nous proposons aux étudiants d'étudier deux dispositifs : le dispositif en équilibre que nous appellerons « dispositif 1 » et le dispositif en mouvement très proche du dispositif de la « machine d'Atwood » que nous appellerons « dispositif 2 ».
La résolution du problème se compose de trois étapes :

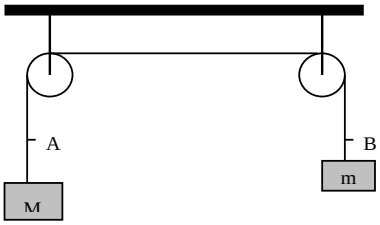
- l'étude qualitative (Etape 1 « étude qualitative »)
- la résolution quantitative (Etape 2 « étude quantitative »
- la conclusion (Etape 3 « contrôle des résultats »).

Soit deux dispositifs représentés ci-dessous. Les masses des cordes et des poulies sont considérées négligeables devant les masses *M* et *m*. On négligera également les dissipations par frottement. Les cordes utilisées dans les deux dispositifs sont inextensibles.

On s'intéresse aux forces de tension de corde dans ces dispositifs, et aux mouvements éventuels des masses.



Dispositif 1



Dispositif 2

I- Approche qualitative : dans cette partie, il s'agit de raisonner sur les situations proposées sans résoudre l'exercice.

1. Décrire ce qui se passe dans chacun des deux dispositifs. En particulier décrire les mouvements.
2. Sans faire de calcul, discuter les affirmations suivantes pour les deux dispositifs. Vous justifierez le plus précisément possible votre opinion. (Prenez le risque de vous tromper, vous vérifierez ensuite par le calcul (partie II)):

   A1 : *« La tension de la corde est nulle dans les parties horizontales. »*
   A2 : *« Au point A la force de tension est plus grande qu'au point B (dans le dispositif 2 c'est parce que M>m). »*
   A3 : *« Dans le dispositif 2, la force de tension vaut (M-m)g en tout point de la corde. »*
   A4 : *« La force de tension qui s'exerce au point A dans le dispositif 1, est égale à celle au point A dans le dispositif 2 (car les masses suspendues à la corde sont identiques). »*

II- Résolution de l'exercice

En suivant la fiche méthodologique « Résoudre un problème de dynamique » ,

1. pour le dispositif 1, calculer la force de tension qui s'exerce sur M ; idem pour la force de tension au point B.
2. pour le dispositif 2, calculer l'accélération de la masse M et celle de la masse m, et les forces de tension qui s'exercent sur chacune des masses.

III- Conclusion

1. Pour chacun des deux dispositifs, comparer les différentes forces de tension calculées au II. Correspondent-elles à ce que vous aviez prévu qualitativement au I ?
2. En cas de contradiction entre les résultats de vos calculs et vos prédictions a priori, essayer de retrouver et d'analyser les problèmes ou les erreurs commises. Vous pourrez vous appuyer sur les outils suivants :
   a. Vérifier la cohérence dimensionnelle des résultats et éventuellement des calculs intermédiaires.
   b. Utiliser l'étude de **cas limites**.
   c. Contrôler le bon usage du PFD (établir les conditions d'usage du PFD en vous aidant de la fiche « **Acquisition d'une nouvelle connaissance** »).
   d. Contrôler que votre démarche de résolution est bien correcte (revoir la fiche méthodologique « **Résoudre un problème de dynamique** »,
3. Corriger les erreurs éventuelles et re-vérifier rapidement.

Figure 61: Feuille du devoir donné aux étudiants

Les étudiants disposent des feuilles de méthode pour ce problème. L'une des feuilles a été présentée et analysée au chapitre 5 : c'est la méthode de résolution que nous avons appelée « MR-UJF ». Nous avons préparé trois autres feuilles de méthodes supplémentaires avec l'enseignant du TD :

- dans la feuille intitulée « ***Aide à l'acquisition d'une nouvelle connaissance*** », nous

expliquons comment préparer un bon résumé du cours théorique et s'en servir lors de la résolution de problèmes (voir l'annexe C2 -Fiche de méthode « Acquisition d'une nouvelle connaissance »).

- dans la feuille « ***Analyse dimensionnelle*** », nous expliquons l'utilité de l'analyse dimensionnelle en donnant des exemples et des exercices (voir l'annexe C2 -Fiche de méthode « Analyse dimensionnelle).
- dans la feuille « ***Etude de cas limites*** », nous mettons en place une méthode pour effectuer l'étude de cas limites d'une situation donnée en insistant sur deux usages de cette méthode : l'exploration qualitative de la situation avant toute résolution quantitative et le contrôle des résultats après les calculs (voir l'annexe C2 -Fiche de méthode « Etude de cas limites »).

2.1 Etape 1 : «Etude qualitative »

Pour l'étape « étude qualitative », la tâche de l'étudiant consiste d'une part à décrire les mouvements dans les deux dispositifs et d'autre part à discuter les affirmations centrées sur les forces de tension dans les deux dispositifs. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à la discussion des affirmations proposées et nous n'analyserons pas les réponses des étudiants concernant la description des mouvements dans les deux dispositifs.

Nous expliquons aux étudiants le but de cette étape et insistons sur le fait qu'ils n'ont pas à résoudre *quantitativement* l'exercice. Nous précisons aussi: « *Prenez le risque de vous tromper, vous vérifierez ensuite par le calcul (partie II)* ». Ainsi, l'étude qualitative se voit attribuer un statut hypothétique.

2.1.1 Analyses des affirmations

Nous rappelons d'abords les affirmations proposées aux étudiants :

- A1 : *« La tension de la corde est nulle dans les parties horizontales. »*
- A2 : *« Au point A la force de tension est plus grande qu'au point B (dans le dispositif 2 c'est parce que M>m). »*
- A3 : *« Dans le dispositif 2, la force de tension vaut (M-m)g en tout point de la corde. »*
- A4 : « *La force de tension qui s'exerce au point A dans le dispositif 1, est égale à celle au point A dans le dispositif 2 (car les masses suspendues à la corde sont identiques)*. »

Les affirmations proposées sont toutes fausses[86] et nous attendons que les étudiants les réfutent. Pour discuter A1, A2 et A4, ils peuvent utiliser plusieurs types d'argumentations :
Nous attendons que les étudiants réfutent ces affirmations en se référant à la relation proposée dans le cours et utilisée par l'enseignant dans d'autres résolutions : l'identité des tensions en tout point de la corde. L'emploie de cette relation est nécessaire pour résoudre quantitativement le problème.
Les étudiants pourraient également justifier l'identité des tensions tout le long de la corde en mettant en avant l'absence d'inertie de la poulie et de la corde ainsi que l'absence de frottements ,

86 Quand on étudie quantitativement le dispositif 2, on obtiendra la force de tension $\|\vec{T}_M\| = \|\vec{T}_m\| = \frac{2Mm}{M+m} g$.

Pour discuter l'affirmation A3 qui propose la relation *T=(M-m)g*, nous attendons que les étudiants puissent faire référence au cas limite où les deux masses sont égales, à savoir *M=m*. Dans ce cas limite, l'expression proposée donne une tension nulle ; ce qui est incohérent car la tension de la corde est égale à *Mg*.

Les étudiants pourraient également faire un raisonnement par l'absurde en mettant en avant les faits explicités dans l'énoncé du problème. Ce type de raisonnement consiste d'abord à considérer comme vraie l'affirmation proposée, puis à en tirer les conséquences et enfin à les comparer avec la propriété de la situation réelle afin d'en montrer l'absurdité d'une telle affirmation. L'étudiant, ayant fait un tel raisonnement, pourrait préciser aussi le domaine de validité de l'affirmation en jeu[87].

Certains étudiants pourraient réfuter ou valider les affirmations en s'appuyant sur des conceptions que nous désignons *C1*, *C2* et *C3* (Tableau 19), repérées dans les autres travaux de recherche, notamment dans les travaux de McDermott [24].

Il est possible de retrouver dans les copies des étudiants les mêmes conceptions que celles identifiées au chapitre 6 que nous avons désigné *C1*, *C2* et *C3* (Tableau 19).

Conception	Description
C1	L'étudiant généralise une relation vraie à l'équilibre. La tension à l'une des extrémités de la corde est égale au poids de la charge qui leste l'autre extrémité de la corde. La généralisation conduit aux deux relations $\|\vec{T}_M\| = mg$ et $\|\vec{T}_m\| = Mg$.
C2	Là encore, l'étudiant généralise une relation vraie à l'équilibre. La tension à l'une des extrémités de la corde est égale au poids de la charge qui la leste. La généralisation conduit aux deux relations $\|\vec{T}_M\| = Mg$ et $\|\vec{T}_m\| = mg$.
C3	D'après la conception C1, en tout point d'une corde tendue s'exercent deux tensions opposées et égales aux poids des charges qui lestent les deux extrémités. L'étudiant peut supposer que la tension est la force résultante.

Tableau 19: Conceptions susceptibles d'être repérées dans les résolutions des étudiants

Nous présentons deux exemples de justification fournies par les étudiants s'appuyant sur les conceptions C1, C2 et C3.
L'affirmation A1 peut être discutée à la lumière des conceptions C1, C2 et C3. En s'appuyant sur les conceptions C1 et C2, il est possible d'affirmer que la tension de la corde est nulle seulement lorsque les deux masses M et m sont elles-mêmes nulles. En s'appuyant sur la conception C3, cette tension est nulle dès que les deux masses sont identiques.
L'étudiant peut valider l'affirmation A3 en tenant compte de la conception C3 car l'expression proposée pour exprimer la tension est bien la résultante des poids des charges qui lestent les

87 Par exemple, pour l'affirmation A1, nous pouvons donner, de nous-mêmes, l'exemple suivant pour le raisonnement par l'absurde :
Supposons que la tension de la corde soit nulle dans la partie horizontale. Cela signifiera que la corde n'est pas tendue dans cette partie de la corde. Pour que la corde ne soit pas tendue, il faut que l'une des masses (ou les deux masses) soit négligée. Ainsi l'autre masse serait dans ce cas en chute libre. Or les deux masses sont suspendues à la corde et la corde est tendue. L'affirmation est donc fausse.

deux extrémités.

2.2 Etape 2 : Etude quantitative (Résolution quantitative du problème)

Rappelons que le but de ce chapitre n'est pas d'identifier les difficultés que rencontrent les étudiants lors de l'exécution des tâches mais d'identifier des stratégies de résolution. Nous allons présenter rapidement la partie résolution quantitative et les difficultés afférentes. Puis, nous nous intéresserons aux liens qui existent entre l'étude qualitative et l'étude quantitative.

2.2.1 Présentation de la résolution quantitative et ses difficultés

Dans la partie « résolution quantitative » de cet exercice, la tâche de l'étudiant consiste à établir l'expression algébrique de l'accélération et des forces de tension aux deux extrémités de la corde (Dispositifs 1 et 2). Pour la résolution quantitative, nous avons conseillé aux étudiants d'utiliser la fiche méthode « Résoudre un problème de dynamique », à savoir la méthode de résolution MR-UJF présentée et analysée au chapitre 5 (voir le paragraphe 2.3 au chapitre 5).

Dans le dispositif 1, le dispositif en équilibre, nous n'attendons pas que les étudiants puissent être en difficulté pour montrer que la tension aux deux extrémités de la corde est égale au module du poids de la charge M.

Dans la figure 62, nous présenterons la stratégie attendue des étudiants pour l'étude quantitative du dispositif 2.

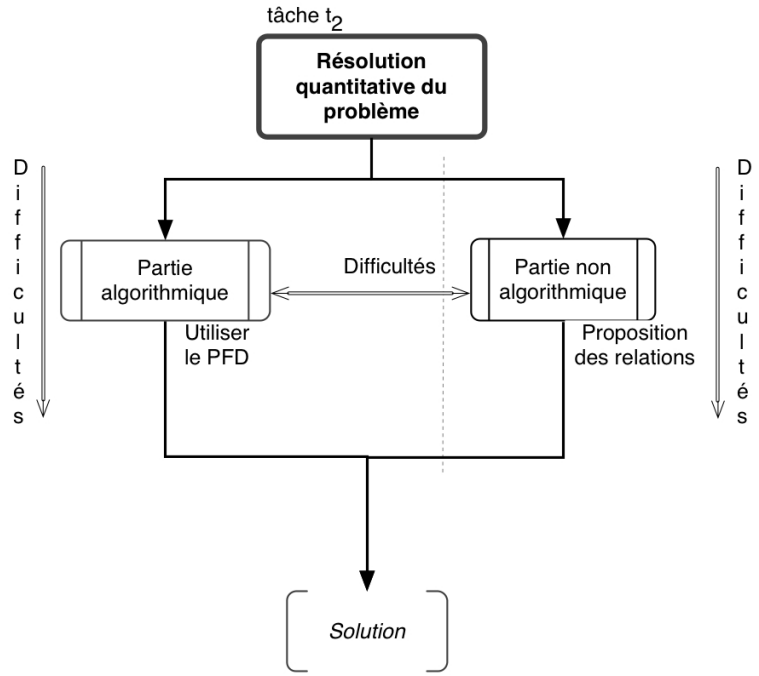


Figure 62: Difficultés possibles des étudiants lors de la résolution quantitative du problème

Les étudiants devraient rencontrer des difficultés déjà identifiées dans le chapitre précédent :

- certains étudiants pourraient avoir des difficultés pour réaliser les tâches qui constituent la partie algorithmique de la résolution
- d'autres pourraient avoir des difficultés uniquement dans la partie non algorithmique
- d'autres encore pourraient avoir des difficultés dans chacune des deux parties de la stratégie de résolution.

2.2.2 Liens entre l'étude qualitative et quantitative

Ce qui nous intéresse ici est le transfert des hypothèses effectuées lors de l'étude qualitative vers la résolution quantitative, en particulier le transfert de l'égalité des forces de tension de la partie « l'étude qualitative » à la partie « l'étude quantitative ». Nous pouvons envisager deux cas les plus probables :

- le cas où il y a un transfert de l'étude qualitative vers la résolution quantitative : l'étudiant peut préciser que la force de tension est la même tout le long de la corde lors de l'étude qualitative, il peut transférer cette relation à la partie résolution quantitative (étude quantitative) en explicitant la relation qualitative sous forme algébrique. Il peut ne pas se soucier de sa validité. Il peut supposer la relation hypothétique. Il peut chercher à la démontrer.
- le cas où il n'y a pas de transfert de l'étude qualitative vers la résolution quantitative : l'étudiant peut parler de l'égalité des tensions lors de l'étude qualitative mais peut proposer une autre relation lors de la résolution quantitative.

2.3 Etape 3 : Contrôle des résultats

Dans cette étape de la résolution, nous attendons que les étudiants comparent les résultats obtenus au terme des deux approches (les prévisions de l'étude qualitative et les équations de l'approche quantitative), puis vérifient les expressions algébriques. Ils pourraient s'appuyer sur une ou plusieurs techniques, telles que l'analyse dimensionnelle, l'étude de cas limites et les autres feuilles de méthodes dont ils disposent (acquisition d'une nouvelle connaissance et la méthode de résolution proposée).

Cette étape déterminera en grande partie la stratégie des étudiants et les tâches qu'ils effectuent par les étudiants en dépendront. Les étudiants ont-ils l'intention de de montrer la cohérence de leur démarche ou ont-ils l'intention de débusquer les incohérences ?

2.4 Stratégie de l'étudiant attendue par l'enseignant

Nous attendons des étudiants la stratégie présentée dans la figure 63.

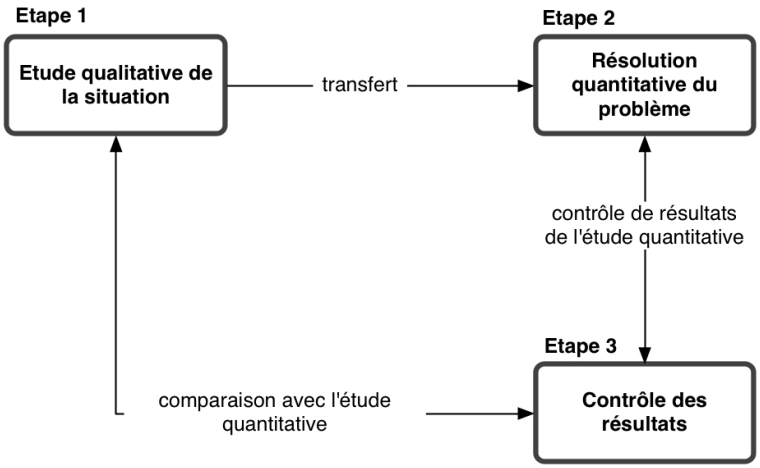


Figure 63: Stratégie attendue des étudiants

Nous attendons que les étudiants proposent une relation entre les tensions (l'égalité des tensions) dans l'étude qualitative et la transfèrent à l'étude quantitative en traduisant dans le registre algébrique et l'utilisent pour la résolution quantitative du problème. En ce qui concerne le contrôle des résultats, nous attendons que les étudiants comparent les résultats de l'étude quantitative avec ceux de l'étude qualitative et qu'ils vérifient la cohérence des résultats de l'étude quantitative en faisant en particulier l'étude des cas limites.

Il se peut bien évidemment que les étudiants n'arrivent pas à construire une telle stratégie s'ils ont des difficultés dans l'une des deux études (l'étude qualitative ou l'étude quantitative).

3 Méthodologie d'analyse pour les copies d'étudiants

Nous présenterons d'abord comment les étudiants accomplissent les tâches qui leur sont dévolues à travers le problème :

- l'accomplissement des tâches dans l'étude qualitative
- l'accomplissement des tâches dans l'étude quantitative
- l'accomplissement des tâches dans le contrôle des résultats.

Puis, nous analyserons les stratégies des étudiants pour l'ensemble du processus de la résolution. Pour ce faire, nous nous appuierons sur la figure dans le paragraphe 2.4.

Nous utiliserons les abréviations A1, A2, A3 et A4 pour désigner les affirmations. Nous désignerons les étudiants par un « e ».

Les étudiants utilisent différentes notations pour décrire les forces de tension et les poids des masses. Comme nous l'avons fait dans le chapitre 6, nous utiliserons les notations suivantes pour faciliter à la fois la compréhension et la lecture :

- $\vec{T}_M$, $\vec{T}_m$: pour la force de tension appliquée à la masse M et celle appliquée à la masse m
- $\vec{T}_A$, $\vec{T}_B$: pour la force de tension au point A et celle appliquée au point B
- $\vec{P}_M$, $\vec{P}_m$: pour le poids de la masse M et pour celui de la masse m

- $\vec{a}_M$, $\vec{a}_m$: pour l'accélération de la masse M et pour celle de la masse m.

Lors de l'analyse des données, nous rappellerons les affirmations proposées aux étudiants chaque fois que cela sera nécessaire par les relations suivantes :

A1 : *« La tension de la corde est nulle dans les parties horizontales. »*	→	$\|\vec{T}_{hor}\|=0$
A2 : *« Au point A la force de tension est plus grande qu'au point B (dans le dispositif 2 c'est parce que M>m). »*	→	$\|\vec{T}_M\|>\|\vec{T}_m\|$
A3 : *« Dans le dispositif 2, la force de tension vaut (M-m)g en tout point de la corde. »*	→	$\|\vec{T}_{disp2}\|=(M-m)g$
A4 : *« La force de tension qui s'exerce au point A dans le dispositif 1, est égale à celle au point A dans le dispositif 2 (car les masses suspendues à la corde sont identiques). »*	→	$\|\vec{T}_M\|=Mg$

4 Accomplissement des tâches par les étudiants

Dans cette partie, nous ne présenterons pas la stratégie d'ensemble des étudiants, ce qui fera l'objet du paragraphe 5. Mais dans cette partie nous présenterons de manière détaillée les tâches nouvelles et qui n'ont pas fait l'objet d'une analyse au chapitre précédent. C'est pourquoi, les paragraphes 4.1 traitant de l'analyse qualitative, et 4.3 du contrôle des résultats seront beaucoup plus détaillés que le paragraphe 4.2 qui traite de la résolution quantitative.

4.1 Etape 1 : «Etude qualitative »

Le discours des étudiants pour la discussion des affirmations nous permet de constater les aspects ci-dessous :

- les étudiants accomplissent la tâche qui leur est dévolue
- ils discutent qualitativement les affirmations
- peu d'étudiants s'appuient sur des conceptions
- les étudiants s'appuient surtout sur l'identité des tensions tout le long de la corde.

Les étudiants accomplissent la tâche dévolue : Les résultats globaux sur la discussion des affirmations sont présentés dans le tableau 20. Dans ce tableau, nous présentons le nombre d'étudiants ayant validé, réfuté et le nombre d'étudiants n'ayant pas répondu pour chacune des affirmations.

Affirmation	Faux	Vrai	Sans réponse
A1: $\|\vec{T_{hor}}\|=0$	22	1	0
A2 : $\|\vec{T_M}\|>\|\vec{T_m}\|$	18	5 (1 sans just.[88])	0
A3 : $\|\vec{T_{disp2}}\|=(M-m)g$	16 (1 sans just.)	5 (2 sans just.)	2
A4 : $\|\vec{T_M}\|=Mg$	21	1	1

Tableau 20: Vue globale sur la discussion des affirmations

Tous les étudiants (sauf 2 étudiants[89]), discutent les affirmations en s'appuyant sur une argumentation variée.

Les étudiants discutent « qualitativement » les affirmations. Seuls, trois étudiants discutent les affirmations en ayant recours à une étude quantitative du dispositif. La présence d'une expression algébrique dans l'affirmation A3 incite ces trois étudiants à suivre cette voie. Nous avons mis en annexe la réponse de l'étudiant e22 qui valide l'affirmation A3 en faisant une étude quantitative du dispositif 2 (voir paragraphe 1 à l'Annexe C4).

Le raisonnement par l'absurde et l'étude de cas limites sont majoritairement utilisés par les étudiants.
Par exemple, 10 étudiants réfutent plus particulièrement l'affirmation A1 en faisant (ou en cherchant à faire) un raisonnement par l'absurde. L'étudiant e5 discute A1 en ces termes :

> *« Dire que la tension de la corde est nulle dans les parties horizontales équivaut (revient à) dire que si on coupe la corde dans une partie horizontale, l'expérience n'est pas modifiée. Or si on coupe la corde en B dans le dispositif 1 le dispositif n'est alors plus statique la masse M tombe. De même si on coupe la corde dans la partie horizontale dans le dispositif 2, l'expérience est modifiée. Les 2 masses tombent. A1 → Faux »*

Autre exemple, 10 étudiants réfutent A3 (ou A4) en faisant (ou en cherchant à faire) une étude de cas limites associée à un raisonnement par l'absurde. L'étudiant e10 étudie deux cas limites M=m et m=0 pour réfuter l'affirmation A3 :

> *« En imaginant que les deux masses M et m sont égales, le dispositif serait alors à l'équilibre. Avec cette formule de la tension on trouvera T=(M-m)g=0N . Il y aura donc une tension nulle aussi bien en A qu'en B, ce qui voudrait dire que les deux masses se décrocheraient (tomberaient).*
>
> *(Si on prend m=0, on a* $\|\vec{T}\|=Mg=\|\vec{P}\|$ *, ce qui est significatif d'un état d'équilibre. Or ce ne devrait pas être le cas. En effet si la masse m était nulle, la masse M serait en chute libre avec une tension nulle en A. L'affirmation A3 est donc fausse.) »*

Très minoritairement les étudiants font référence aux conceptions C1, C2 et C3 décrites antérieurement (voir Tableau 19, pp. 187). Dans le tableau 21, nous présentons des exemples de discours où nous avons repéré l'utilisation des conceptions, ainsi que leur fréquence.

88 « Sans just. » signifie le nombre d'étudiants qui ont réfuté ou validé l'affirmation sans justification par exemple : « *c'est faux* » ou « *c'est vrai* ».

89 L'étudiant e2 ne discute pas A3 et l'étudiant e23 ne discute pas A3 et A4.

Aff.	Etd.	Exemple de discours	Conceptions repérées	Nb. d'étd.
A1 $\|\|\vec{T}_{hor}\|\|=0$	e15	*« A1 est fausse car dans le dispositif 2 les deux masses sont différentes donc les tensions aux bornes de 2 poulies sont différentes et la somme des ces 2 tensions est différente de 0 »*	C1, C2, C3	1
A2 $\|\|\vec{T}_M\|\|>\|\|\vec{T}_m\|\|$	e1	*« Cette affirmation est vraie pour le dispositif 2 car M>m »*	C1	4
A3 $T=(M-m)g$	e3	*« Vrai. La force de tension totale de la corde vaut T_{total}=PM-Pm soit T_{total}=(M-m)g. Elle est donc constante en tout point de la corde et vaut (M-m)g »*	C1+C3	2
A4 $\|\|\vec{T}_M\|\|=Mg$	e3	*« Vrai. les masses suspendues à la corde étant identiques : $T_{Adispositif1}$=$T_{Adispositif2}$ »*	C1	1

Tableau 21: Exemples de discours dans lesquels on repère les conceptions

Analysons quelques unes de ces réponses. Par exemple, l'étudiant e15 évoque deux forces différentes qui s'exercent aux deux extrémités de la corde (les poids des deux charges) et il suppose que la force de tension sur la partie horizontale de la corde est la résultante de ces deux forces. Cet étudiant construit son raisonnement en faisant référence aux conceptions C1[90]ou C2 et la conception C3.
Autre exemple, le discours de l'étudiant e3 s'appuie sur la conception C1 : « *les masses suspendues à la corde étant identiques :* donc comme à l'équilibre les tensions sont identique $T_{Adispositif1}=T_{Adispositif2}$ »

Troisième exemple, pour la discussion de l'affirmation A3, 2 étudiants considèrent deux tensions différentes à deux extrémités de la corde et calculent la force résultante des deux forces pour calculer la force de tension sur la partie horizontale, ce qui leur donne une expression *(M-m)g*.

Il ressort de cette étude que 22 étudiants évoquent à un moment ou à un autre de la discussion des affirmations, l'identité des tensions tout au long de la corde : « *la tension est constante tout le long de la corde* » (A3) mais la valeur que donnent les étudiants à cette tension est très différente de celle attendue par l'enseignant : « *Elle est donc constante en tout point de la corde et vaut (M-m)g »* (e3). Ce faisant, les étudiants la présentent au cours de leur argumentation soit comme une hypothèse, soit comme un principe lié à leur conception ou établi antérieurement dans l'enseignement.
Dans le cas où elle est un principe elle constitue l'un des prémisses du raisonnement. Par exemple, pour l'étudiant e1, l'enseignant apparaît comme une autorité auquel on peut se référer (*on sait que la tension est la même tout le long de la corde* -e1). Pour certains étudiants, cette identité des tensions apparaît comme un principe de conservation. C'est le cas de l'étudiant e23 : *« Au point A la force de tension est égale au point B, car une tension est conservée le long d'un fil, si sa masse est négligeable ».*

90 A la suite du discours de l'étudiant, on s'aperçoit que l'étudiant s'appuie sur la conception C1.

Dans le cas où elle est une hypothèse elle est une conclusion. L'étudiant e8 argumente cette égalité en s'appuyant sur les faits explicités dans l'énoncé du problème et en même temps, il présente cette relation sous forme hypothétique en faisant précéder son énoncé de la formule « ***on peut considérer que »*** *le module de la tension en tout point de la corde. Au point A, la force de tension est la même qu'au point B* ».

Ainsi, dans l'étude qualitative, comme on s'y attendait, les étudiants mettent en avant l'égalité des tensions. Il est prévisible qu'ils transfèrent cette égalité de l'étude qualitative à l'étude quantitative.

4.2 Etape 2 : Etude quantitative (Résolution quantitative du problème)

Nous rappelons les questions posées aux étudiants dans la partie « résolution quantitative » :

> ***II- Résolution de l'exercice***
>
> *En suivant la fiche méthodologique « Résoudre un problème de dynamique » ,*
>
> - *pour le dispositif 1, calculer la force de tension qui s'exerce sur M ; idem pour la force de tension au point B.*
> - *pour le dispositif 2, calculer l'accélération de la masse M et celle de la masse m, et les forces de tension qui s'exercent sur chacune des masses.*

Bien que les dispositifs étudiés par les étudiants dans ce chapitre et le précédent soient légèrement différents (présence d'une poulie dans l'un et de deux dans l'autre, présence d'une partie de fil horizontal uniquement dans l'exercice proposé au chapitre 7) l'analyse des données fournit des résultats comparables à ceux présentés au chapitre précédent (Chapitre 6) en ce qui concerne l'exécution des tâches, la mobilisation du cadre théorique de la mécanique du point matériel et l'utilisation de l'algorithme de résolution lors de la résolution de la partie quantitative du problème.

Pour l'étude quantitative du dispositif 2, nous avons recensé :

- 9 étudiants qui n'ont aucune difficulté
- 2 étudiants qui n'ont pas de difficulté dans la partie algorithmique et dans la partie non algorithmique mais qui ont des difficultés pour la résolution du système d'équations
- 2 étudiants qui n'ont pas de difficulté pour la partie non algorithmique mais ont des difficultés pour la partie algorithmique
- 10 étudiants qui ont des difficultés à la fois dans la partie algorithmique et non algorithmique.

4.3 Etape 3 : Contrôle des résultats

Les contrôles effectués par les étudiants et leur nature dépendent étroitement de la stratégie adoptée pour traiter les questions précédentes comme nous le verrons dans le paragraphe 5. C'est la raison pour laquelle nous nous contenterons ici de présenter les natures de contrôles effectués par les étudiants (Tableau 22) par contre la fonction de ces opérations dans la stratégie globale fera l'objet du paragraphe 5.

Une analyse rapide permet de noter que les étudiants utilisent trois procédures de contrôles :

- soit ils comparent les résultats obtenus dans l'étude qualitative et quantitative
- soit ils effectuent une analyse dimensionnelle
- soit ils procèdent à l'étude de cas limites

Contrôle effectuée par les étudiants	Nombre d'étudiants
Confrontation du résultat quantitatif avec l'étude qualitative	20
Etude de cas limites	8
Analyse dimensionnelle	7
Pas de contrôle	2

Tableau 22: Contrôles de résultats effectués dans la partie « Conclusion » du problème

Montrons ces différents contrôles effectués par les étudiants.

Par exemple, l'étudiant e4 obtient l'expression de l'accélération des masses $\|\vec{a}\|=\frac{m-M}{M-m}g$. L'étudiant n'est pas conscient de l'incohérence de sa solution : « il ne semble pas apparaître de contradiction » et il est assuré par l'homogénéité dimensionnelle de sa solution (Figure 64).

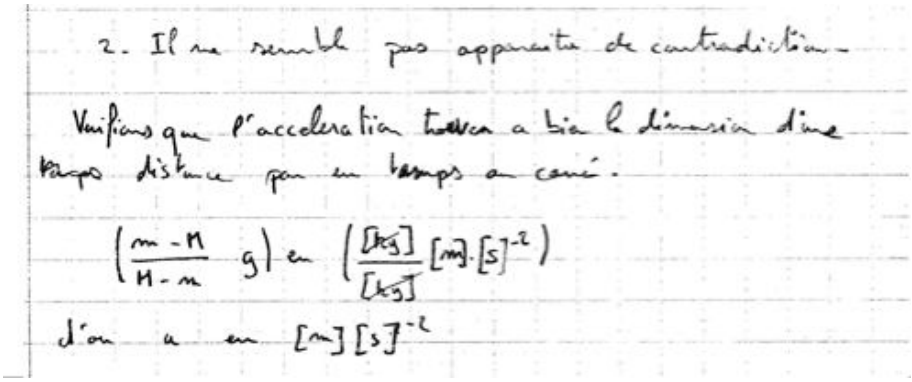


Figure 64: Analyse dimensionnelle effectuée par l'étudiant e4

Deuxième exemple, l'étudiant e19 obtient l'expression de l'accélération des masses $\|\vec{a}\|=\frac{2m}{M+m}g$. L'étudiant est assuré de la cohérence de sa solution en faisant une étude de cas limites (Figure 65). L'étudiant n'arrive pas à identifier une situation qui sert de cas limites pour le dispositif 2. Il considère un état hors de l'étude du dispositif : *« le cas limite est atteint lorsque la masse m se coince dans la poulie »*. L'étudiant précise que dans ce cas la masse m se comporte comme si elle était nulle. Cette hypothèse de l'étudiant se coïncidence avec ce qui devrait être en réalité (le dispositif statique et l'accélération nulle).

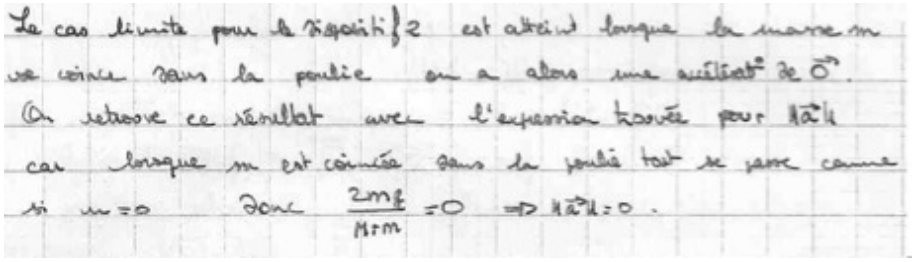


Figure 65: Etude de cas limites de l'étudiant e19.
« Le cas limite pour le dispositif 2 est atteint lorsque la masse m se coince dans la poulie. On a alors une accélération de $\vec{0}$ *. On retrouve ce résultat avec l'expression trouvée pour* $\|\vec{a}\|$ *car lorsque m est coincé dans la poulie tout se passe comme si m=0. Donc,* $\frac{2mg}{M+m}=0$ *»*

Troisième exemple, l'étudiant E9 prévoit dans l'étude quantitative que le module de la force de tension est égal à l'expression *(M-m)g*, c'est-à-dire qu'il valide l'affirmation A3. Dans l'étude quantitative il obtient l'expression correcte de la force de tension, à savoir $\|\vec{T}\|=\frac{2Mm}{M+m}g$. L'étudiant confronte les résultats de l'étude qualitative avec le résultat de l'étude quantitative (Figure 66). Cela lui permet de rendre compte son erreur dans l'étude qualitative : *« les suppositions faites au début de l'exercice ne se sont pas toutes avérées exactes, le calcul nous l'a montré. ».*

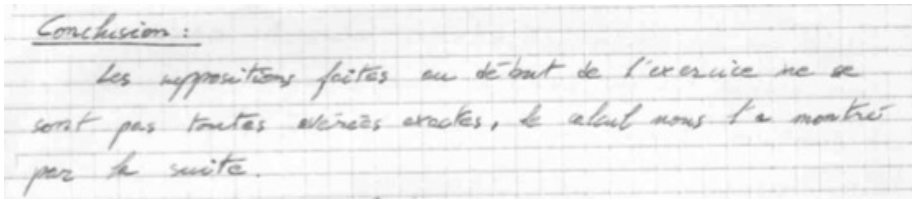


Figure 66: Comparaison de l'étude quantitative avec l'étude qualitative.

On peut noter que

- presque tous les étudiants contrôlent ou cherchent à mettre en relation les résultats quantitatifs avec ceux obtenus de l'étude qualitative.
- Le nombre d'étudiants qui ont fait une analyse dimensionnelle ou l'étude de cas limites est faible bien que ces deux procédures aient été présentées par l'enseignant et rappelées dans une fiche méthode
- L'étude de cas limites est difficile pour certains étudiants car ils doivent identifier de telles situations. Celle qu'ils proposent : une des masses qui se coince dans la poulie ne permet pas de vérifier les relations.

5 Analyse des stratégies de résolution des étudiants

Nous avons regroupé en deux catégories les stratégies des étudiants pour l'ensemble de la résolution du problème (Figure 67).

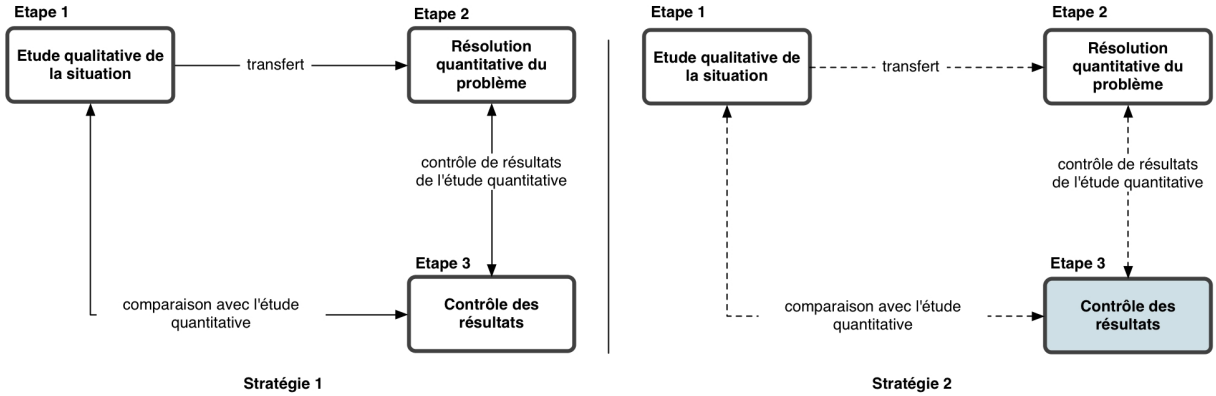


Figure 67: Deux stratégies pour l'ensemble de la résolution du problème. La stratégie S1 représente la stratégie souhaitée. Dans la stratégie S2, les liens entre différentes parties de la résolution ne sont pas bien établies, d'où les flèches en traits. Dans cette stratégie S2, le contrôle de résultats est souvent absent ou contractuel, d'où nous avons représenté cette étape par un rectangle rempli.

Les étudiants du premier groupe (la moitié des étudiants) sont capables de donner du sens à l'activité proposée. L'ensemble des tâches leur permet de construire une stratégie de résolution, ce qui est souhaitée. Ils ont donc une stratégie que nous appellerons « *une stratégie bouclée* ». Le transfert de l'étude qualitative vers l'étude quantitative, le contrôle des résultats de l'étude qualitative par l'étude de cas limites et de la comparaison effective des résultats des deux études qualitatives et quantitatives donnent une cohérence à la résolution dans son ensemble.

Les étudiants du deuxième groupe restent au niveau de l'accomplissement séparé des tâches proposées dans les 3 parties. Ils n'ont pas de stratégie bouclée mais ils ont une stratégie que nous appellerons « *une stratégie linéaire* ». Ils ont recours aux diverses conceptions lors de la résolution qualitative et/ou quantitative. Et beaucoup d'entre eux ne transfèrent pas la relation construite dans l'étude qualitative vers l'étude quantitative. Ils utilisent peu les contrôles contractuels (par exemple, le contrôle de l'homogénéité des expressions algébriques)

.

Nous analyserons quelques copies d'étudiant pour illustrer chacune des stratégies identifiées. Lors de l'analyse des copies d'étudiants, nous nous intéresserons en particulier aux aspects ci-dessous :

- le transfert éventuel ou non des relations anticipées de l'étude qualitative à l'étude quantitative et les traductions ou non des relations proposées au qualitatif mais non utilisées au quantitatif,
- la cohérence éventuelle de la résolution quantitative ou bien les difficultés des étudiants dans cette résolution quantitative
- les contrôles effectués par les étudiants : le contrôle des résultats de l'étude quantitative et la comparaison des résultats de l'étude quantitative avec ceux de

l'étude qualitative.

5.1 1e groupe d'étudiants

Afin de montrer les caractéristiques susmentionnées de la stratégie bouclée du premier groupe d'étudiants, nous présenterons les copies des étudiants *e10* et *e21* en analysant plus particulièrement

- la qualité de leur étude qualitative,
- le transfert de l'égalité des tensions de l'étude qualitative vers l'étude quantitative,
- la cohérence dans la partie algorithmique de la résolution quantitative
- le contrôle des résultats effectué par les étudiants.

5.1.1 Analyse de la copie de l'étudiant e10

Nous résumons la résolution de l'étudiant *e10*, ainsi que sa stratégie dans la figure 68. L'étudiant a effectué chacun des groupes de tâches qui lui ont été dévolues dans l'étude qualitative, dans l'étude quantitative et lors du contrôle des résultats. Leur accomplissement est conforme à l'attente de l'enseignant, il a obtenu les résultats attendus, ce qui fera l'objet du paragraphe suivant.

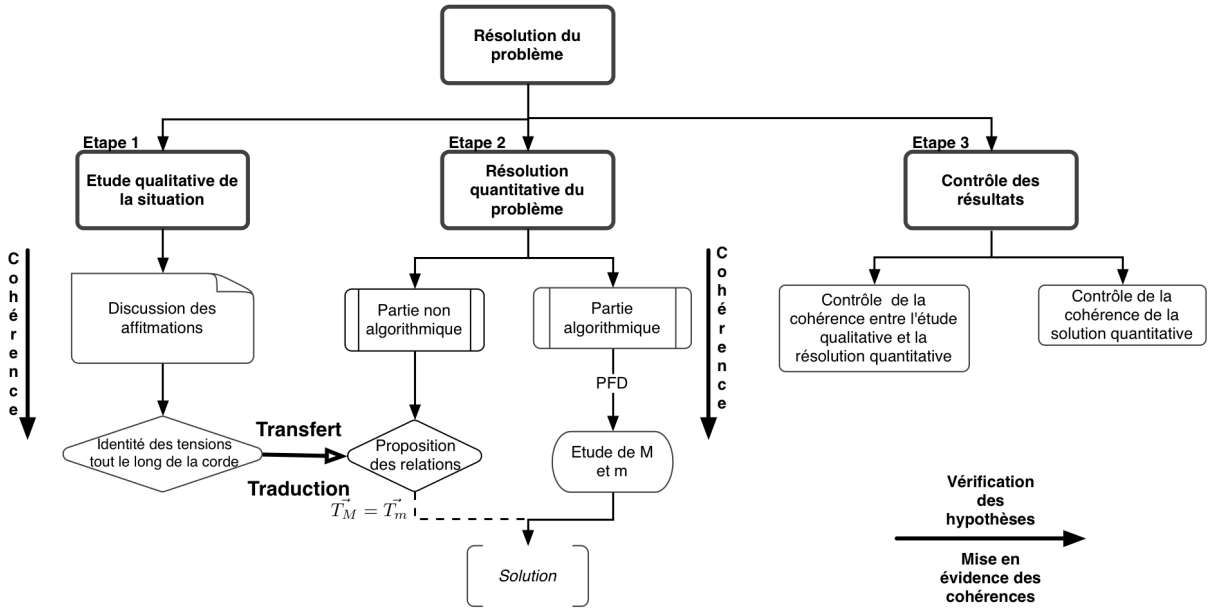


Figure 68: Caractéristiques de la résolution de l'étudiant e10

5.1.1.1 Cohérence dans l'étude qualitative

L'étudiant réfute toutes les affirmations de manière cohérente. Mais nous nous intéressons plus particulièrement à son discours pour les affirmations A1 et A3 (Tableau 23).

Affirmation	Discours de l'étudiant
A1 $\|\|\vec{T_{hor}}\|\|=0$	*« Dispositif 1: l'affirmation est fausse : la masse est accrochée à l'équilibre, il existe donc une tension en A. la masse de la corde est négligeable, celle ci est tendue, inextensible. En A, elle peut donc être considérée constante le long de la corde. La tension de la corde n'est pas nulle dans la partie horizontale.*
A3 *T=(M-m)g*	*« En imaginant que les deux masses M et m sont égales, le dispositif serait alors à l'équilibre. Avec cette formule de la tension on trouvera T=(M-m)g=0N . Il y aura donc une tension nulle aussi bien en A qu'en B. ce qui voudrait dire que les deux masses se décrocheraient.* *(Si on prend m=0, on a* $\|\vec{T}\|=Mg=\|\vec{P}\|$ *, ce qui est significatif d'un état d'équilibre. Or ce ne devrait pas être le cas en effet si la masse m était nulle, la masse M serait en chute libre avec une tension nulle en A. L'affirmation A3 est donc fausse.) »*

Tableau 23: Discussion des affirmations par l'étudiant e10

Il est possible de reconstruire un discours structuré à partir des propos de cet étudiant.
« **(Pour le)** *Dispositif 1 : l'affirmation est fausse. « A l'équilibre » « la masse est accrochée, il existe donc une tension en A ». « la masse de la corde est négligeable »,* **les charges M et m ne peuvent être équilibrées par les poids d'un brin de corde**. *« Celle ci est tendue »* ~~*inextensible*~~*. « La tension de la corde n'est pas nulle dans la partie horizontale. » ... « elle peut donc être considérée constante le long de la corde. »*

Pour réfuter A1, il argumente non pas l'identité des tensions tout au long de la corde mais l'existence d'une tension en tout point de la corde en s'appuyant sur des faits, se rapportant à la situation réelle, explicités dans l'énoncé (« *la corde est tendue, sa masse est négligeable*[91]). Il conclut sur la présence d'une tension mais il sent bien qu'il ne peut pas conclure à l'identité de cette tension tout au long de la corde. Il fait précéder l'énoncé de cette identité d'une formule prudente : « elle peut être considérée ». L'étudiant perçoit le caractère probable mais tout de même hypothétique de cette relation.

Pour réfuter A3, il étudie correctement deux cas limites :

- le cas où les deux masses sont égales (*M=m*) et
- le cas où l'une des masses est nulle (*m=0*).

L'étudiant sans résoudre quantitativement a anticipé les résultats à obtenir par l'étude qualitative du problème Figure 69.

91 Bien évidemment, il ne s'agit pas de cohérence entre les faits et leur traduction. En effet, la propriété des poulies, telle que la poulie sans frottement et sans masse, n'est pas prise en compte par l'étudiant alors qu'en particulier une poulie sans masse et sans frottement permet d'affirmer l'égalité des tensions sur le dispositif.

Figure 69: Etude quantitative du dispositif 2 par l'étudiant e10 et sa conclusion

5.1.1.2 Transfert de la relation entre les tensions

L'étudiant propose une relation entre les tensions et la transfère de l'étude qualitative à l'étude quantitative. Ce transfert apparaît à deux reprises :

- la résolution quantitative pour le dispositif 2 commence par le rappel des relations à utiliser : « *l'accélération et la vitesse de la masse M sont opposées à celle de la masse m, mais elles sont égales en norme* », « *les forces de tension s'exerçant en M et m sont égales* »
- l'étudiant rappelle l'égalité probable des tensions au moment de résolution du système d'équations, mais cette fois-ci la relation proposée en langue naturelle est traduite en langage algébrique : « *le fil étant inextensible, de masse négligeable et tendue, on peut en déduire* $T_A = T_B = T$ *(la tension est constante le long du fil)* »

5.1.1.3 Cohérence dans la partie algorithmique de la résolution quantitative

L'étudiant n'a pas de difficulté pour l'accomplissement des tâches liées à l'utilisation du PFD : Il définit les systèmes à étudier ainsi que le référentiel d'étude (tâches 1 et 2). Il fait une analyse du mouvement qui lui permet d'écrire l'accélération du système (tâche 3) et de choisir les axes du repère (tâche 4). Il fait un bilan de forces appliquées au système en faisant des catégories de force (tâche 5). Il écrit vectoriellement le PFD (tâche 6) et il projette l'équation vectorielle suivant l'axe du repère choisi (tâche 7).

Il utilise les relations qu'il propose au début de son étude quantitative et calcule d'abord l'accélération des masses $\vec{a}_M = \frac{M-m}{M+m}\vec{g} = -\vec{a}_m$ puis les forces de tension $\vec{T}_M = \frac{-2Mm}{M+m}\vec{g} = \vec{T}_m$.

5.1.1.4 Contrôle des résultats

L'étudiant contrôle les résultats par l'étude de cas limites, déjà étudiés lors de l'étude qualitative (*M=m* et *m=0)*. En étudiant les mêmes cas limites dans les deux études, il montre qu'il a une vue d'ensemble du problème étudié. C'est une démarche consciente chez l'étudiant qui termine sa copie par cette phrase : « *ce qui correspond à ce que j'avais prévu en I* ». La comparaison des prévisions dans des situations identiques lie les différentes parties du problème et donne une cohérence à la solution proposée.

5.1.1.5 Recherche de la cohérence

La stratégie de l'étudiant tant pour l'étude qualitative que pour l'approche quantitative est celle attendue par l'enseignant.
Dans l'étude qualitative, l'étudiant discute la relation entre les tensions, il argumente correctement et il postule l'égalité des tensions. L'étudiant sent que cette relation n'a pas la solidité des relations assises sur des principes, elle a gardé de ce fait un statut hypothétique.

L'étude quantitative comporte une partie algorithmique structurée : les tâches sont correctement accomplies, les résultats sont conformes à l'attente.
L'étude quantitative comporte une autre partie complémentaire qui est la traduction en langage algébrique d'une relation discutée dans l'étude qualitative : l'égalité postulée des tensions. Cette égalité est transférée tout en gardant son statut hypothétique.

La cohérence de la copie est assurée par les liens établis entre l'étude qualitative et l'étude quantitative à travers le contrôle des résultats, à travers la traduction sous forme algébrique de

la relation construite dans l'étude qualitative. La cohérence est assise sur la nécessité et volonté d'établir des liens ; ce qui est exprimée dans la conclusion de l'étudiant « ce qui correspond à ce que j'avais prévu en 1 ».

L'étudiant a décodé l'intention de l'enseignant en proposant une solution conforme à ses attentes.
Ainsi, ce qui guide l'action de l'étudiant ce sont les intentions de l'enseignant, la perception qu'il a de la physique comme science hypothético-déductive et sa volonté de donner du sens et de la cohérence au travail proposé.

5.1.2 Analyse de la copie de l'étudiant e21

L'étudiant a une stratégie très intéressante pour la résolution quantitative. Elle fait une analogie avec une autre situation pour résoudre quantitativement le problème[92].

Nous résumons la résolution de l'étudiant e21, ainsi que sa stratégie dans la figure 70. Ce travail se caractérise par

- la qualité de son étude qualitative,
- la créativité de l'étudiant lors de l'étude quantitative (l'étudiant fait une analogie avec une autre situation)
- le contrôle de la pertinence de l'analogie menée lors de l'étude quantitative et le contrôle de la cohérence des deux études (qualitative et quantitative).

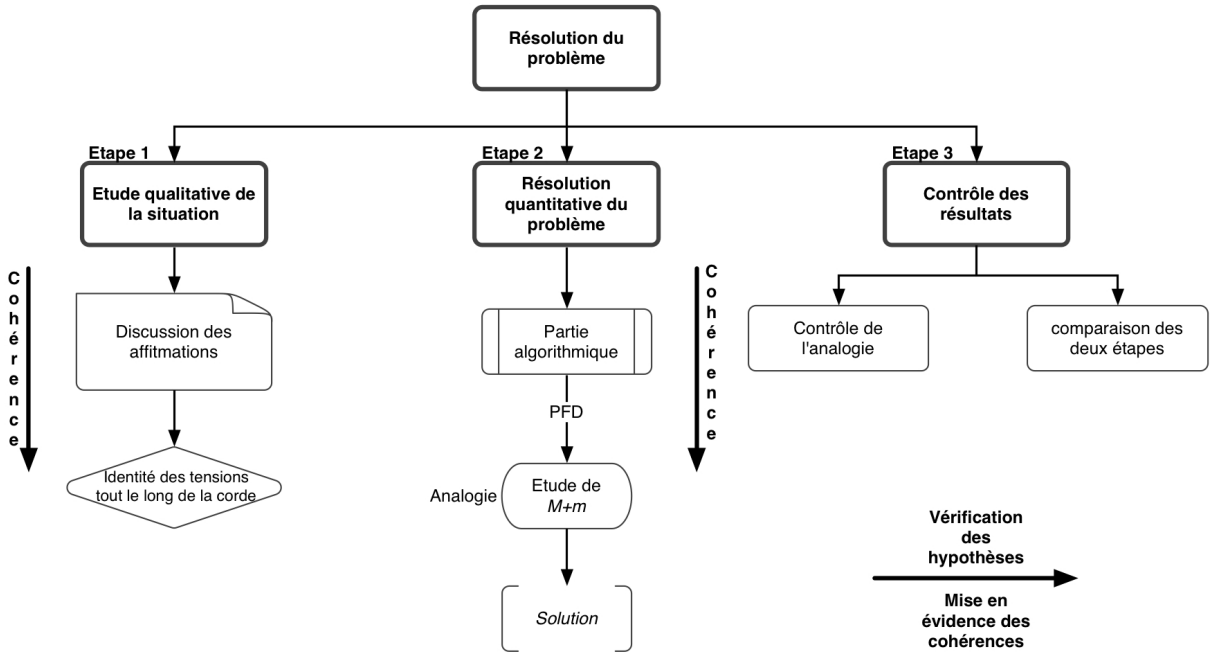


Figure 70: Caractéristiques de la résolution de l'étudiant e21

5.1.2.1 Cohérence dans l'étude qualitative

L'étudiant e21 réfute de manière intuitive toutes les affirmations. Nous nous intéressons là-

92 Cette stratégie de résolution a été présentée au chapitre 4 pour rendre compte de la résolution R1 (voir hypothèse H2 au paragraphe 2.2.3 au chapitre 4).

encore, plus particulièrement à la discussion des affirmations A1 et A3 (Tableau 24).

Affirmation	Discours de l'étudiant
A1 $\|\|\vec{T_{hor}}\|\|=0$	*« FAUX pour le dispositif 1 et 2. Le fil de masse négligeable est tendu donc le module de la tension au sein du fil est constant sur toute la longueur de celle ci. De plus on exerce des forces sur lui (supposons M et m non négligeables) (car une poulie de masse négligeable ne fait que dériver une force) ce qui entraîne que la tension ne peut être nulle.* *Cas particulier : seulement si M et m la masse nulle, alors la tension de la corde est nulle. »*
A3 $T=(M-m)g$	*« FAUX. Contre exemple : si M=m alors (M-m) g=0. Or la force de tension n'est pas nulle dans le cas M=m≠0. »*

Tableau 24: Discussion des affirmations par l'étudiant e21

L'étudiant e21 réfute l'affirmation A1. Il cherche à discuter comme l'étudiant précédent de l'existence d'une tension et de l'identité de sa valeur en tout point de la corde. Le lien qu'il effectue dès la première phrase entre la masse négligeable de la corde et l'identité des tensions tout le long de la corde n'est pas convainquant. Quelle est la validité d'une telle démonstration aux yeux de l'étudiant ? Cette relation a-t-elle un statut hypothétique aux yeux de l'étudiant ?

Il réfute l'affirmation A3 en étudiant le cas limite où les deux masses sont égales ($M=m$).

5.1.2.2 Etude quantitative du dispositif 2 par une analogie

L'étudiant étudie de manière cohérente le dispositif 2 en construisant une analogie entre la machine d'Atwood et un système rigide constitué de deux masses reliées entre elles par un fil tendu inélastique reposant sur un plan et se déplaçant sur une même trajectoire rectiligne.

Le dispositif analogue est perçu comme un point matériel de masse M+m animé d'un mouvement rectiligne qui sera démontré comme uniforme. Le passage du dispositif à son analogue entraîne deux modifications importantes : la suppression des poulies d'une part et la prise en compte de quatre forces externes supplémentaires qui s'exercent sur le système (la réaction du plan horizontal et une force horizontale égale au poids des charges). Les tensions apparaissent comme des forces intérieures et de ce fait elles ne seront pas prises en considération. La dérivée de l'impulsion est égale à la résultante de deux seules forces horizontales de module (M-m)g.
L'analogie est explicitée à l'aide de deux dessins mais l'étudiant laisse à la charge du lecteur le soin de la décoder (Figure 71).

5.1.2.3 Contrôle de l'analogie et des résultats

L'étudiant procède à de nombreux contrôles de l'analogie et de la cohérence entre l'étude qualitative et l'étude quantitative.
L'étudiant contrôle l'analogie en faisant des allers-retours entre les deux dispositifs. D'abord il donne une signification au déplacement et au signe de l'accélération. Si l'accélération est négative le système se déplace vers la gauche et la grande masse descend : *« A noter qu'un déplacement vers la gauche du dispositif modifié correspond à une descente de M et une*

montée de m et inversement s'il y a déplacement vers la droite ».
Il donne une signification à l'expression de l'accélération obtenue pour le système analogue : « *si M>m M subit une accélération vers le bas et m subit une accélération vers le haut* ».

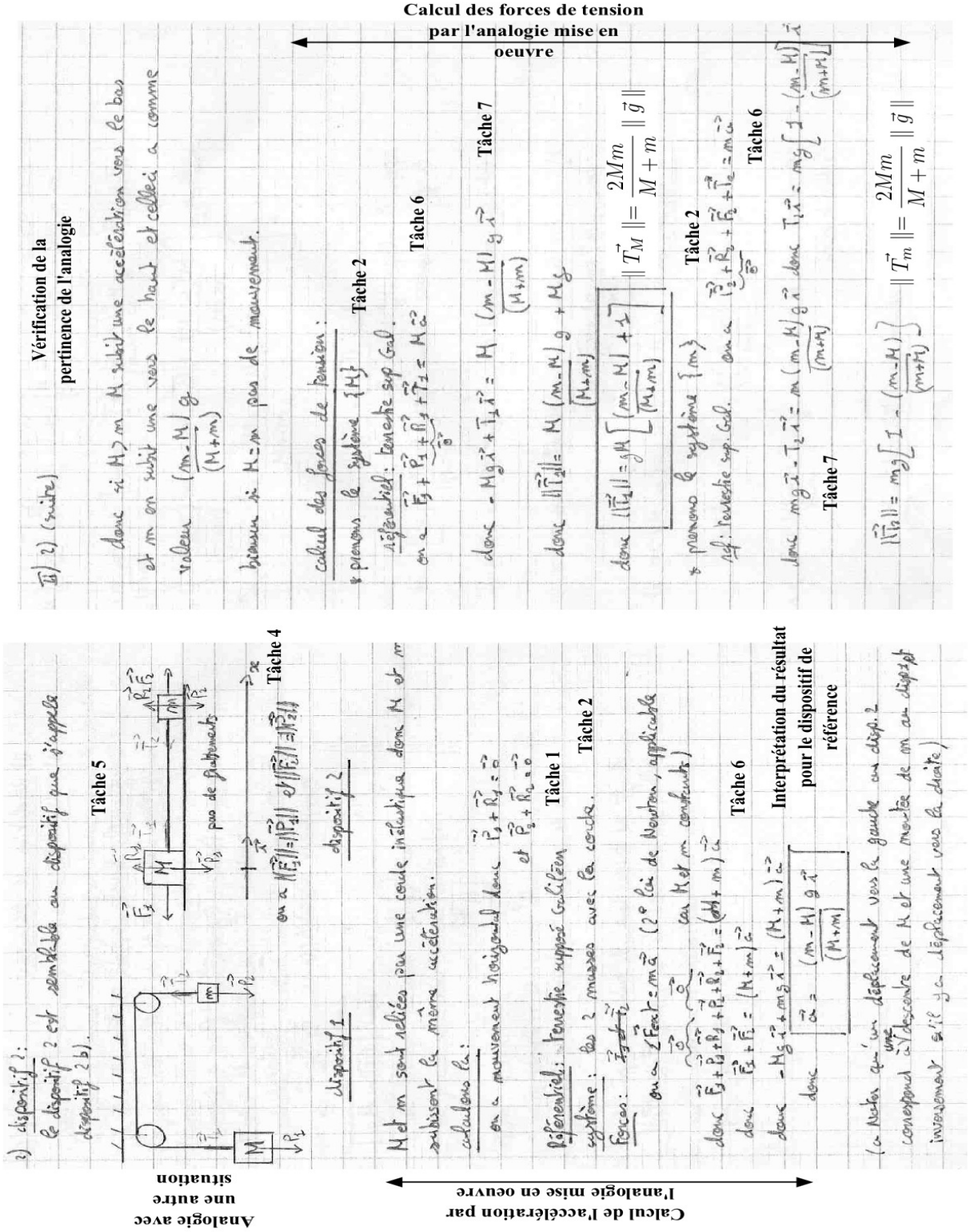


Figure 71: Extrait de la résolution quantitative de l'étudiant e21 : Calcul de l'accélération des masses et des forces de tension.

Il étudie également le cas limite M=m afin de contrôler la cohérence du résultat obtenu à l'aide du dispositif modifié. Dans le dispositif 2, il y a alors équilibre (ou mouvement rectiligne uniforme). L'expression algébrique du dispositif analogue « $a=\frac{(m-M)}{(M+m)}g$ » prend une valeur nulle. Pour l'étudiant les résultats concordent : *« Bien sur si M=m, pas de mouvement »* les propriétés des dispositifs apparaissent comme équivalentes.

5.1.2.4 Comparaison de l'étude quantitative avec l'étude qualitative

L'étudiant a calculé deux forces de tension $\|\vec{T}_M\|$ et $\|\vec{T}_m\|$. Il a affirmé l'identité de ces deux quantités dans l'étude qualitative. Si l'hypothèse est vraie, alors la différence des modules des deux forces de tensions doit être nulle, à savoir $\|\vec{T}_M\|-\|\vec{T}_m\|=0$. L'étudiant suit cette démarche afin de montrer la validité de son hypothèse ou du principe (voir Figure 72).

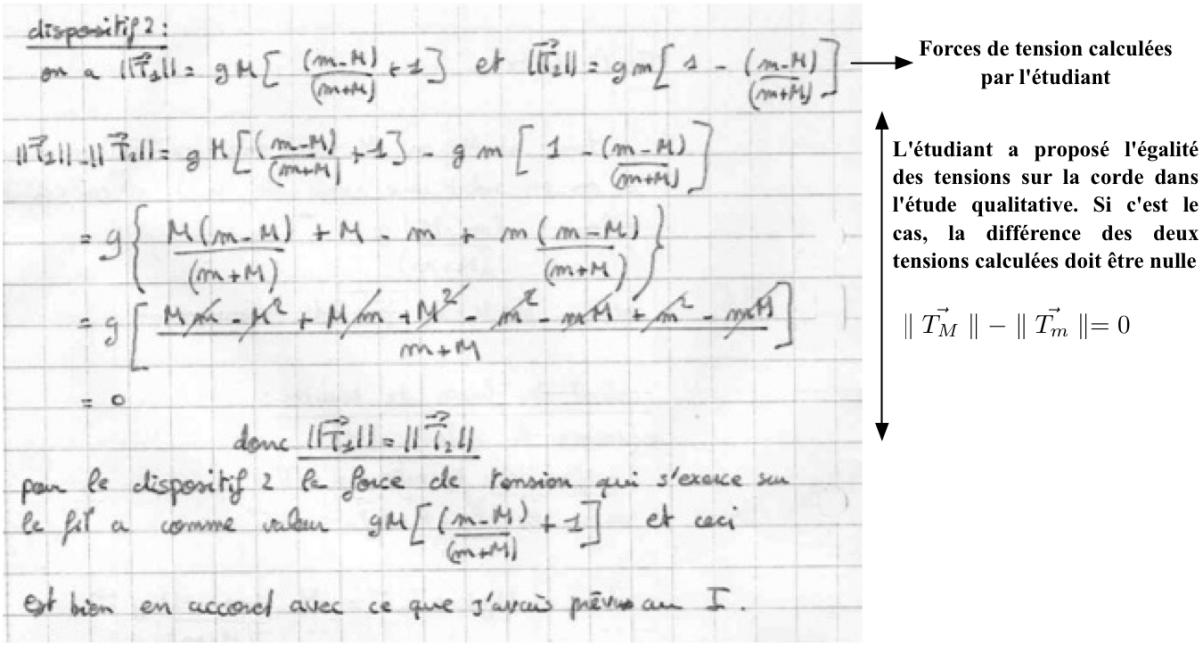


Figure 72: Extrait de la conclusion de l'étudiant e21 -comparaison des modules des forces de tension

Il vérifie la cohérence de ses résultats (plus précisément de l'expression de la force de tension) dans quelques cas limites (Figure 73). Il fait une erreur de calcul, ce qui lui permet d'obtenir le résultat attendu. Ce qui renforce aux yeux de l'étudiant la cohérence du travail effectué : *« tout me semble donc très cohérent »*.

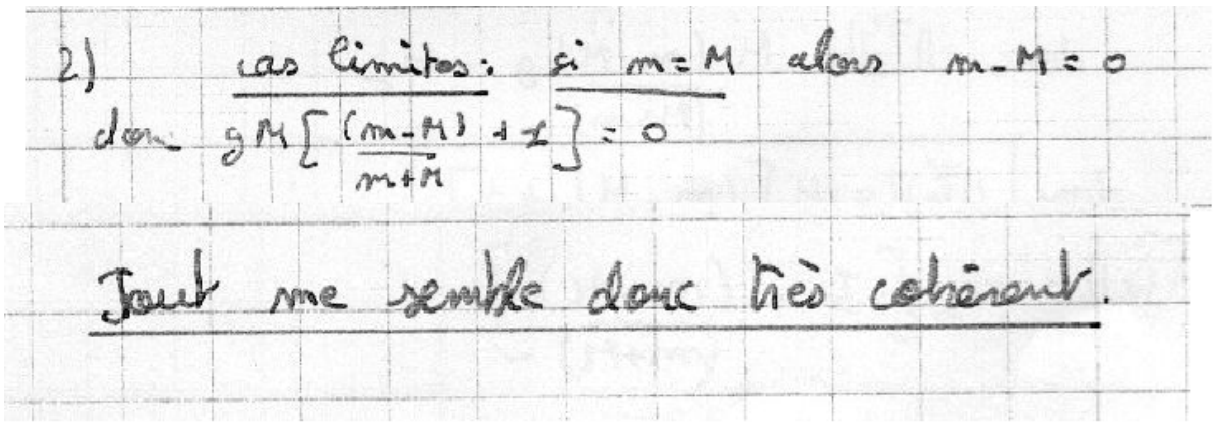


Figure 73: Etude du cas limite M=m et la conclusion de l'étudiant e21

5.1.2.5 Conclusion pour l'analyse de la copie de l'étudiant e21

L'étudiant e21 met en œuvre une stratégie créative et non attendue. Il discute, argumente la relation entre les tensions. Il a recours à une analogie qui lui permet de résoudre quantitativement les problèmes et d'exprimer dans les langages algébriques les relations prévues.

La stratégie adoptée par l'étudiant lui permet de donner du sens au problème dans la mesure où elle permet de tisser de nombreux liens entre l'étude qualitative, le système étudié et son analogue. La multiplication des systèmes mis en relation en permettant de multiplier les liens apporte plus de cohérence à la solution proposée aux yeux de l'étudiant.

5.1.3 Conclusion pour les étudiants du 1e groupe

Les étudiants de ce premier groupe cherchent véritablement la cohérence entre différentes parties de la résolution et la traduisent en acte qui vise à établir des liens entre les opérations et les résultats des différentes parties.

Cette recherche de cohérence permet aux étudiants de bâtir ***une stratégie de résolution bouclée*** qui intègre :

- la construction des relations hypothétiques (étude qualitative)
- des algorithmes de résolution (utilisation du principe – PFD)
- des traductions des relations hypothétiques (le transfert d'une relation du qualitatif au quantitatif)
- le contrôle de résultats :
  - la comparaison entre les résultats prévus dans les parties qualitatives et quantitatives
  - la comparaison entre les cas limites analysées dans l'étude qualitative et dans le contrôle des résultats

5.2 2e groupe d'étudiants

Tout le long du paragraphe 5.2, nous aurons pour objectif de mettre en évidence

- l'utilisation des diverses conceptions tout au long de la résolution,

- l'absence de transfert des relations proposées dans l'étude qualitative vers l'étude quantitative ou le transfert de cette relation sans qu'elle soit traduite dans les langages mathématiques
- l'absence de traduction des relations exprimées en langue naturelle vers les langages mathématiques
- les difficultés liées en particulier à l'utilisation du langage mathématique
- l'absence de cohérence entre l'étude qualitative et l'étude quantitative
- l'absence de toute stratégie de résolution.

Pour cet effet, nous analyserons ci-dessous la copie de l'étudiant *e7.*

5.2.1 Analyse de la copie de l'étudiant e7

Nous résumons la résolution de l'étudiant e7 ainsi que sa stratégie dans la figure 74.
Les difficultés rencontrées par l'étudiant dans l'exécution des tâches élémentaires bloquent toute stratégie d'ensemble de résolution du problème.

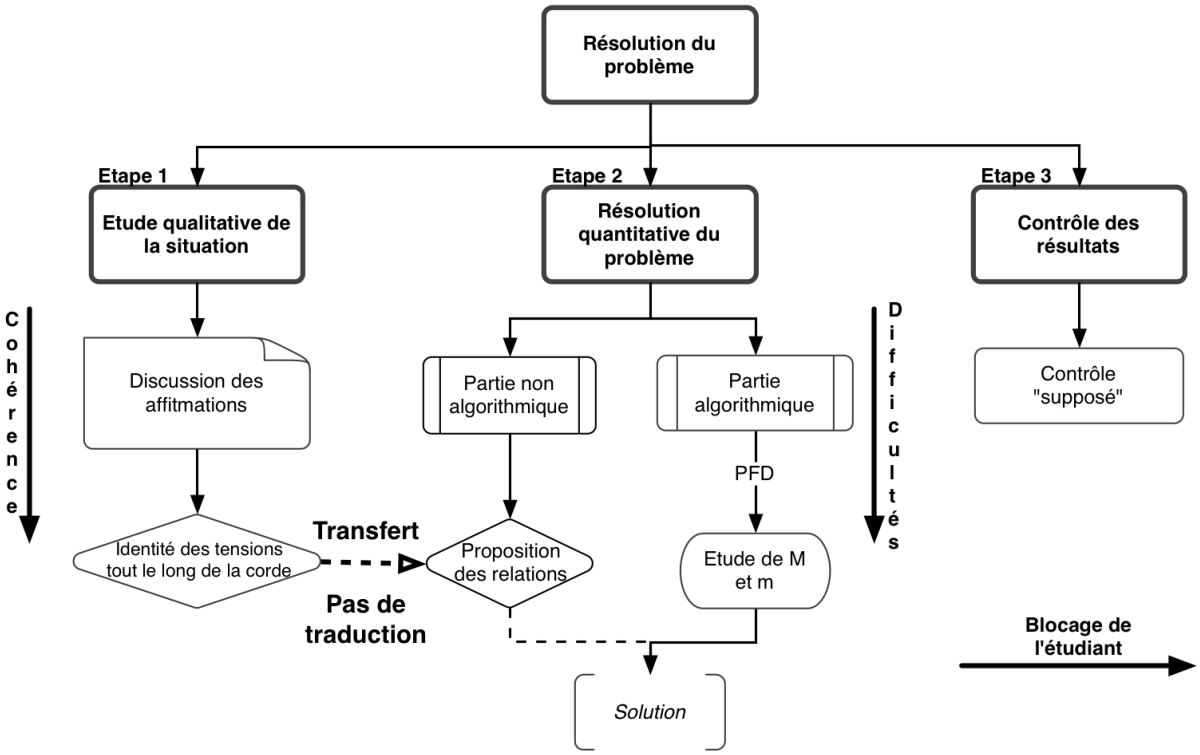


Figure 74: Caractéristiques de la résolution de l'étudiant e7

5.2.1.1 Analyse qualitative de l'égalité des tensions

L'étudiant réfute toutes les affirmations données. Pour construire sa première argumentation, il procède par glissement de sens dans le langage courant en utilisant deux mots qui ont des sens voisins : tendre et tension. Puis, il s'appuie sur l'égalité postulée des forces de tension sur la corde, mais sans la justifier : « *C'est faux. Car la tension est la même tout le long de la corde* ». Il réfute A3 sans aucun argument. Il se réfère à la masse supplémentaire (la masse m) qui lui permet de réfuter A4 (voir Tableau 25).

Affirmation	Discours de l'étudiant
A1 $\|\|\vec{T}_{hor}\|\|=0$	*« c'est faux. Car si la corde est tendue elle subit une tension. »*
A3 $\|\|\vec{T}_M\|\|>\|\|\vec{T}_m\|\|$	*« c'est faux. car la tension est la même tout au long de la corde. »*
A3 $T=(M-m)g$	*« c'est faux »*
A4 $\|\|T_M\|\|=Mg$	*« Faux. Car dans le dispositif 1, le montage est immobile et alors le point A subit le poids de la masse M. dans le dispositif 2, le point A subit en plus le poids de la masse m »*

Tableau 25: Discussion des affirmations par l'étudiant e7

5.2.1.2 Transfert de l'égalité des tensions de l'étude qualitative à l'étude quantitative

Comme nous venons de montrer que l'étudiant réfute A2 en s'appuyant sur l'égalité des tensions sur la corde sans aucune argumentation. Mais au moment de l'étude quantitative du dispositif 1, il écrit :

> *« **Si** la corde est tendue, inextensible et **s'il** n'y a pas de "perte" du aux frottements, alors la tension en module de la corde **peut être considérée constante** tout le long de la corde. Cette affirmation sera utilisée tout au long de l'exercice II »*[93]

Il y a donc un transfert de l'égalité hypothétique entre les tensions de la partie « étude qualitative » vers la partie « résolution quantitative ».

Mais en même temps, on remarque toujours la même prudence de l'étudiant vis-à-vis des relations qui ne sont pas assises sur des principes bien identifiés. L'étudiant insiste sur le caractère hypothétique en multipliant les conditions dont « *si la corde est tendue …* », « *si la corde est inextensible…* », « *s'il n'y a pas de perte due au frottement* ». Pour l'étudiant certaines de ces conditions sont peu probables telle l'absence du frottement. On peut remarquer que l'énoncé de la constance de la tension tout au long de la corde est précédé d'une formule « *peut être considérée* » permettant de prendre beaucoup de distance vis-à-vis de la relation proposée. Tout cela confère un statut fortement hypothétique.

Cette relation proposée dans l'étude qualitative et rappelée dans la résolution quantitative, n'est pas traduite par l'étudiant lors de l'étude quantitative.

93 Voir la copie de l'étudiant e7 en Annexe C2. Cette explication se trouve au dernier paragraphe de la page 2 de la copie de l'étudiant.

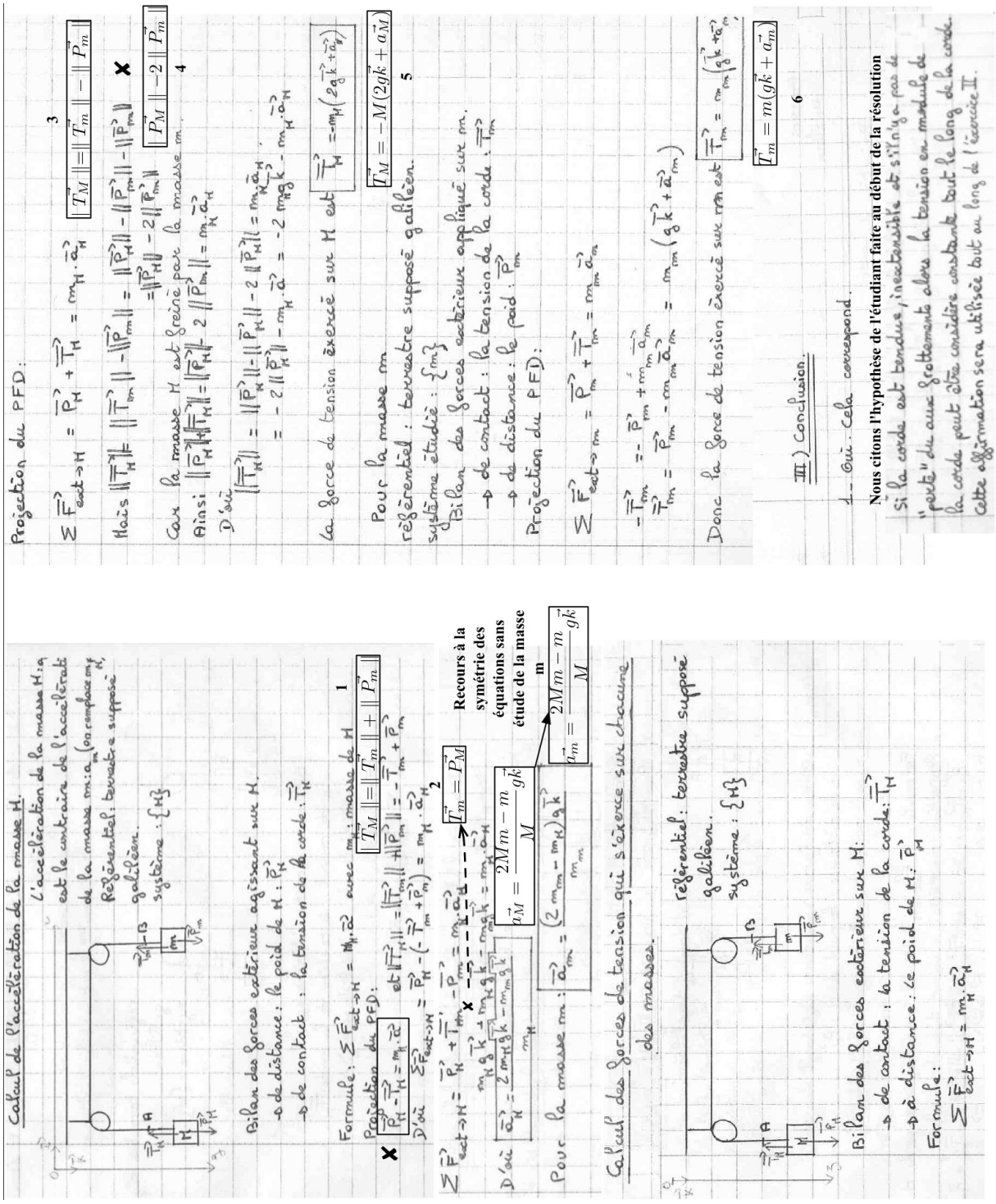


Figure 75: Etude quantitative du dispositif 2 par l'étudiant e7 et sa conclusion

5.2.1.3 Difficultés dans la partie algorithmique de la résolution quantitative

La résolution de l'étudiant e7 pour le dispositif 2 concernant le calcul de l'accélération est montrée dans la figure 75.

Les difficultés rencontrées pour accomplir les tâches sont nombreuses.
Les tâches, telles que la définition du référentiel (tâche 1) et des systèmes (tâche 2), l'écriture de l'accélération pour les systèmes (tâche 3), le choix de l'axe du repère (tâche 4), le bilan de forces appliquées aux systèmes (tâche 5), ne posent pas problème à l'étudiant e7. Mais l'étudiant a une approche très approximative des langages mathématiques et de leur syntaxe. Il écrit par exemple que la norme d'un vecteur est égale à un vecteur : $\|\vec{T}_M\| = -\vec{T}_M + \vec{P}_M$.
L'étudiant éprouve des difficultés à accomplir les deux tâches (tâches 6 et 7) qui traduisent par une relation vectorielle du PFD. L'étudiant écrit

« $\vec{P}_M - \vec{T}_M = M\,\vec{a}_M$ »

Il propose une relation peu habituelle entre les modules des tensions : $\|\vec{T}_M\| = -\vec{T}_M + \vec{P}_M$. En fait, il semble que la tension à une extrémité de la corde soit la résultante des forces qui s'exercent à l'autre extrémité. L'égalité des tensions tout au long de la corde prend un sens particulier en chaque point s'exercent deux forces de tension dont les modules A et B sont différents. Mais en tout point la quantité A a toujours la même valeur.

Du fait du manque de la rigueur de l'étudiant, diverses expressions sont proposées pour une même tension : $\|\vec{T}_M\| = \|\vec{T}_m\| + \|\vec{P}_m\|$ et $\|\vec{T}_M\| = \|\vec{T}_m\| - \|\vec{P}_m\|$ (voir).

5.2.1.4 Contrôle des résultats

Il a été bloqué dans la partie « conclusion » du problème. Bien qu'il ait plusieurs expressions différentes des forces de tension, il conclut en insistant sur la « cohérence » des résultats entre les parties qualitative et quantitative : « *Oui cela correspond* ».

5.2.1.5 Conclusion pour l'analyse de la copie de l'étudiant e7

Nous retiendrons les points suivants pour l'analyse de la copie de l'étudiant e7.

Dans l'étude qualitative, l'étudiant exprime l'égalité des tensions tout le long de la corde dans la langue naturelle mais par la suite cette égalité n'est pas traduite dans le langage algébrique.
L'étudiant connaît, dans l'ensemble, l'algorithme de résolution pour un problème simple, il fait référence aux lois de la mécanique (il accomplit les tâches de la technique de l'utilisation du PFD). Mais cet algorithme est perturbé dès que se présente un imprévu (ici l'étude de deux systèmes).
Il fait un usage approximatif des langages mathématiques.
Il mélange les principes appartenant aux cadres de la mécanique newtonienne avec des conceptions de sens communs.
Il ne cherche pas la cohérence entre ses différents résultats.

Nous avons déjà rencontré au chapitre 6 ce type d'étudiants qui reste au niveau de l'accomplissement des tâches (ou des groupes de tâches).

Dans ce chapitre, la partie quantitative a été précédée et suivie d'une partie qualitative et suivie d'une partie « contrôle des résultats ». Contrairement aux étudiants du groupe 1, les activités proposées ne permettent pas à ce type d'étudiants de construire une stratégie de résolution.

6 Conclusion

Dans le cadre de notre expérimentation, nous avons proposé aux étudiants un problème favorisant la recherche de la cohérence dans la résolution du problème de la machine d'Atwood. Nous avons attendu que cette recherche de cohérence permette aux étudiants de bâtir une stratégie de résolution qui intègre :

- la construction des relations hypothétiques (étude qualitative)
- des algorithmes de résolution (utilisation du principe dans l'étude quantitative)
- des traductions des relations hypothétiques (transfert des relations du qualitatif au quantitatif)
- le contrôle de résultats qui consiste à la comparaison :
  - entre les résultats prévus dans les parties qualitatives et quantitatives
  - entre les cas limites analysées dans l'étude qualitative et dans le contrôle des résultats.

Tout au long du chapitre, nous avons cherché à répondre à la question : « Quel sera le rapport personnel de l'étudiant à la résolution du problème ? Quelle stratégie est perçue et mise en œuvre par l'étudiant ? ».

Le rapport personnel des étudiants se décline en tâches, en algorithme et en stratégie.

Accomplissement des tâches

Nous pouvons reprendre les conclusions du chapitre 6 et les compléter Nous ferons les conclusions suivantes pour les tâches proposées en différentes parties du problème :

- La discussion des affirmations par les étudiants nous a montré qu'ils sont capables de raisonner qualitativement. Les étudiants ont recours à plusieurs techniques pour exécuter les tâches proposées lors de l'étude qualitative, notamment le raisonnement par l'absurde et l'étude des cas limites. Tous les étudiants, ou presque, évoquent l'égalité des tensions sur la corde.
- Certains étudiants ont des difficultés pour la partie algorithmique de l'étude quantitative, notamment pour la tâche de la projection des équations vectorielles. Certains ont aussi des difficultés à utiliser les langages mathématiques.
- Le contrôle de résultats dépend largement de la cohérence dans l'ensemble de la résolution. De nombreux étudiants pensent que le contrôle du travail se limite à la comparaison rapide entre les résultats quantitatifs et l'idée qualitative qu'ils pouvaient avoir.

Intentions et stratégies des étudiants

Nous nous intéressons aux intentions des étudiants et à leur stratégie de recherche de la cohérence, mise en oeuvre tout au long de leur de résolution.

Nous avons constaté que la recherche de la cohérence impose de donner des statuts différents aux différentes opérations effectuées dans la résolution :

- Dans la perspective d'une démarche déductive les relations issues des principes de la mécanique du point matériel sont considérées comme certaines, pour les étudiants. Pour eux, Il n'y a pas de doute sur le résultat du calcul.
- Pour les étudiants du groupe 2, les relations issues de croyances ou du sens commun, ont un statut identique à celui des principes. Elles sont certaines, n'ont pas

à être discutées ou remises en cause.
- Pour les étudiants du groupe 1, les relations discutées, argumentées par les étudiants dans l'étude qualitative n'ont qu'un statut hypothétique. L'opération de contrôle devient nécessaire. Elle est intégrée dans la procédure de résolution, sauf lors que les conceptions fortuites l'en empêchent.

Il en résulte ainsi plusieurs approches possibles et plusieurs types de productions d'étudiants, notamment deux types de stratégies :
- *une stratégie bouclée*
- *une stratégie linéaire.*

La moitié des étudiants (ayant une stratégie bouclée) cherchent véritablement la cohérence entre les différentes parties de la résolution et la traduisent en acte qui vise à établir des liens entre les résultats des différentes parties. Cette recherche de cohérence permet à l'étudiant de bâtir une stratégie de résolution qui intègre :
- la construction des relations hypothétiques (étude qualitative)
- des algorithmes de résolution (utilisation du principe)
- des traductions des relations hypothétiques (le transfert des relations du qualitatif au quantitatif – c'est le premier lien qui exprime la cohérence)
- le contrôle de résultats qui consiste à comparer :
  - les résultats prévus dans les parties qualitatives et quantitatives (c'est le deuxième type de lien qui exprime la cohérence)
  - les cas limites analysés dans l'étude qualitative et dans le contrôle des résultats (c'est le troisième lien qui exprime la cohérence).

Ainsi, nous affirmons pour les étudiants du premier groupe de stratégie que

L'étude qualitative, ayant un statut hypothétique et étant vérifiée par l'étude quantitative, peut permettre à l'étudiant de construire une stratégie de résolution qui met en avant la cohérence dans l'ensemble de la résolution.

Pour l'autre moitié des étudiants, la recherche de la cohérence est bloquée pour plusieurs raisons dues notamment à l'utilisation de principes du sens commun, dues aux difficultés liées à l'utilisation du PFD, et dues à l'absence de transfert et de traduction des relations proposées lors l'étude qualitative.
Même ces étudiants cherchent à trouver des cohérences entre les résultats prévus dans les parties qualitatif et quantitatif. Ceci met bien évidence l'importance de la cohérence, même si elle est partielle (locale), aux yeux des étudiants.

Transposition didactique adoptée par les enseignants
Vues les difficultés des étudiants, vu le besoin de cohérences des étudiants l'enseignant doit donc
- décrire les démarches (les stratégies) sans cacher les passages difficiles
- penser la transposition didactique non seulement en termes de simplification de ses propres raisonnements, mais encore en termes d'adaptation de ses stratégies incluant des phases hypothético-déductives.

Conclusion

CONCLUSION

Nous avons observé antérieurement au cours des Travaux Dirigés de mécanique que les étudiants de première année d'université, rencontraient des difficultés importantes pour résoudre des problèmes analysant les mouvements d'objets en translation, reliés par les fils.
Notre travail de thèse a commence à partir de trois questions que nous nous sommes posées :

- Quelles sont les difficultés des étudiants lors de la résolution des problèmes de mécanique du point matériel ?
- Quelle est l'origine de ces difficultés ?
- Quelles aides peut-on apporter aux étudiants ?

Avant nous, différents auteurs ont cherché à comprendre quelles étaient les difficultés rencontrées par les étudiants. Ces travaux nous ont servi à construire un cadre théorique. L'essentiel de ces travaux sont souvent centrés sur l'enseignement de la mécanique au lycée et peu de travaux concernent l'enseignement de la mécanique en première année universitaire. Ces travaux font référence à un personnage fictif et non défini, dénommé « expert ». Les difficultés des étudiants sont identifiées dans ces études en comparant la résolution des étudiants avec celle de l'expert. La méthodologie de la thèse adoptée est en partie comparable. On définit un expert à qui on attribue une stratégie utilisable dans la résolution de ce seul type de problèmes et qui nous sert ensuite de référence pour analyser les résolutions produites par diverses personnes réelles. Ce qui est différent cependant par rapport aux études précédentes, c'est que nous posons la question de ce qui sert effectivement de "référence experte" aux étudiants; ceci nous amène à nous intéresser autant aux résolutions des étudiants qu'à celles proposées par des enseignants sur divers supports ordinairement accessibles aux étudiants pendant leurs études (manuels, polycopiés et TD, sites internet).

A partir du chapitre 2, on s'intéresse à la résolution d'exercices dans le cadre d'une institution, l'université. Ces exercices proposent l'étude d'un dispositif « la machine d'Atwood ». Les trois premiers chapitres permettent de construire une grille d'analyse faisant référence aux travaux antérieurs. On définit un personnage fictif « expert de référence » dont la création a quatre fonctions. Il propose une résolution cohérente et exhaustive du problème en s'appuyant sur les principes de la mécanique. On suppose que sa résolution sert de référence à l'enseignant qui cherche à l'exposer. On suppose également qu'elle sert de référence à l'étudiant qui veut l'imiter. L'analyse de sa résolution nous sert en tant que didacticien pour construire une grille d'analyse pertinente qui servira ensuite à analyser les productions d'enseignants et d'étudiants. Du fait sa complexité et du temps limité imparti à l'étude de la mécanique, la résolution de l'expert ne peut pas être présentée telle quelle à des étudiants. Les solutions des enseignants vont donc présenter des écarts par rapport à la résolution de *l'Expert de Référence*. Se pose ici la question de l'incidence de cette présentation simplifiée aux étudiants.

Nous avons étudié divers manuels exploitant la machine d'Atwood comme support de l'enseignement de la mécanique. L'évolution de la présentation au cours du temps de la situation « machine d'Atwood » met en évidence un changement profond de paradigme. Il y a encore 200 ans, la mécanique est perçue comme une science expérimentale dont les principes sont à construire et à asseoir sur des données expérimentales. Dès 1850, elle est perçue

comme une science déductive régie par des principes stables et cohérents, en nombre juste suffisant pour anticiper l'évolution de tout système mécanique. Ainsi s'enrichit notre grille d'analyse. Pour comprendre les résolutions proposées par les enseignants et les étudiants, il est nécessaire de prendre en compte leurs intentions implicites et explicites.

Dans les chapitres 4 et 5, nous nous sommes intéressés aux enseignants actuels. Les enseignants actuels sont dans le même paradigme que l'expert de référence. La mécanique est donc pour eux une science déductive. Ils font référence à deux cadres théoriques : celui de la mécanique du point matériel et celui de la mécanique du solide. La partie du problème dont l'étude théorique s'appuie sur les principes de la mécanique du point matériel fait souvent l'objet d'un traitement rigoureux (c'est la partie algorithmique de la résolution). La partie du problème qui prend appui sur les principes de la mécanique du solide est traitée de manière beaucoup moins rigoureuse (c'est la partie non algorithmique de la résolution) :

- Les enseignants s'y réfèrent implicitement. En effet les résolutions présentées suivent le même schéma général que celle de l'expert.
- La référence explicite à la mécanique du solide est absente. Ils éliminent le cadre théorique qui n'est pas à la portée des étudiants.
- Les enseignants semblent percevoir l'existence des difficultés possibles pour les étudiants, mais ils les affrontent rarement. Les difficultés sont occultées plutôt que signalées.
- Les démonstrations des relations qui ne relèvent pas de l'exploitation directe des principes de la mécanique du point matériel (ici, le Principe Fondamental de la Dynamique) sont remplacées par une forme d'argumentation en langue naturelle qui confère à la relation un statut hypothétique, sans que ce raisonnement soit présenté comme hypothétique et sans que la trame de la résolution soit modifiée.
- certains enseignants proposent parfois des aides pour décrire la partie algorithmique de la résolution. mais aucune aide pour présenter la partie non algorithmique.
- Par conséquent, nous avons montré que les étudiants ne peuvent en général pas décoder facilement les stratégies des enseignants.

Ainsi, à partir de l'étude des résolutions d'enseignants, nous avons pu supposer que les étudiants de l'université se trouvent plongés dans un paradigme aux principes contradictoires.

- Comme l'expert et les enseignants, les étudiants vont percevoir la mécanique comme déductive. Pour eux, elle va s'appuyer sur le seul cadre théorique de la mécanique du point matériel. Ce qui est une différence importante par rapport à un enseignant et à *l'Expert de Référence*.
- Comme pour les enseignants, l'utilisation de relations algébriques assure la cohérence du discours.
- Ainsi le cadre théorique de la mécanique est extensible. D'autres principes concernant la tension par exemple, peuvent le compléter.
- Pour l'étudiant, l'argumentation peut tenir lieu de démonstration : ce qui n'est pas le cas pour l'expert et l'enseignant
- Il y a une nécessité de créer des liens aussi nombreux que possible pour assurer une cohérence à l'ensemble.

Les difficultés classiques rencontrées habituellement par les étudiants par exemple pour caractériser la tension se trouvent renforcées. La transposition didactique imprécise de l'enseignant ne définit pas ce qui relève de principes stables, et ne présente pas comme

hypothétiques des relations postulées. C'est ce qui apparaît à la lecture des copies des étudiants.

Dans les chapitres 6 et 7, on a étudié tout d'abord la résolution par des étudiants d'un problème ne comportant qu'une partie quantitative, puis celle d'un problème comportant la même partie quantitative précédée d'une partie qualitative et d'une partie de contrôle des résultats.
Ceci nous amène à regrouper les étudiants schématiquement en deux. Ceux qui sont capables d'effectuer toutes les tâches de la partie algorithmique (ce sont les tâches qui permettent d'étudier le mouvement de translation d'une des charges en utilisant les lois de la mécanique du point matériel). Le deuxième groupe est constitué par les étudiants qui ne peuvent traduire algébriquement de manière systématique les principes de la mécanique newtonienne.
Pour ces derniers, quelque soit la présentation de l'exercice, la solution est la même les étudiants exécutent une succession de tâches, souvent sans les lier les unes aux autres, sans avoir de stratégie de mise en cohérence.
Le premier groupe d'étudiants décode les intentions et les embarras de l'enseignant. Ils ne sont pas dupes. L'argumentation ne peut remplacer une démonstration. Ils perçoivent que la démarche de résolution comporte des phases hypothético-déductives. Cette démarche leur apparaît d'autant plus nette que plusieurs parties du problème sont à mettre en relation. Ainsi, l'adjonction d'une partie qualitative et d'une partie contrôle des résultats parait favoriser la construction de liens entre les différentes parties du problème et semble constituer par elle-même une aide appropriée pour construire une démarche de résolution cohérente, pour la moitié des étudiants capables d'effectuer l'ensemble des tâches.

BIBLIOGRAPHIE

1: Robert P.(1996), *Le nouveau Petit Robert : Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française*, DICOROBERT INC, Montréal, Canada, ISBN : 2-85036-506-8

2: Dumas-Carré A., Goffard M.(1997), *Rénover les activités de résolution de problèmes en physique*, Armand Colin/Masson, Paris, ISBN : 2-200-01600-X

3: Fabre M.(1999), *Situations-Problèmes et savoir scolaire*, Presse Universitaire de France (PUF), Paris, ISBN : 2 13 049619 9

4: Gaidioz P., Vince J., Tiberghien A. (2004), Aider l'élève à comprendre le fonctionnement de la physique et son articulation avec la vie quotidienne, *BUP*, N° : 866, 1029-1042

5: Johsua S., Dupin J-J.(1993), *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*, Presse Universitaire de France (PUF), Paris, ISBN : 2 13 053841 X

6: Reif F.(1983), Understanding and teaching problem-solving in physics. In G. Delacote, A. Tiberghien, and J. Schwartz (Eds.), Research on Physics Education: Proceedings of the First International Workshop , June 26-July 13, 1983, La Londe les Maures, France

7: Reif F. (1995), Millikan Lecture 1994: Understanding and teaching important scientificthought processes, *Am. J. Phys.*, N° : 63, 17-32

8: Leonard W.J., Gerace W.J., Dufresne R.J.(1995), A qualitative model for the storage of domain-specific knowledgeand its implications for problem-solving, Department of Physics & Astronomy, University of Massachusetts, http://umperg.physics.umass.edu/topics/model/

9: Guillaud J-C., Robardet G.(1997), *Eléments d'épistémologie et de didactique des sciences physiques : de la recherche à la pratique*, Presse Universitaire de France (PUF), Paris, ISBN : 2130487610

10: Viudez C.(2001), Création d'un environnement informatique d'aide aux travaux pratiques Analyse didactique d'une expérience en TP de licence : l'interféromètre de Michelson, *Thèse de doctorat*, *Université Joseph Fourrier* , Grenoble

11: Séjourné A.(2001), Conception d'un hypermédia et analyses del'influence de l'organisation des contenus surl'activité des élèves :Le cas de "Labdoc Son et Vibrations", *Thèse de doctorat*, *Université Lyon 2* , Lyon

12: Tiberghien A. (1994), Modeling as a basis for analyzing teaching-learning situations, *Learning and Instruction*, N° : 4-1, 71-87

13: Guillaud J-C.(1998), Enseignement et apprentissage du concept de force en classe de troisième, *Thèse de doctorat*, *Université Joseph Fourrier* , Grenoble

14: Duval R.(1995), *Le raisonnement. In: Sémiosis et pensée humaine: registre sémiotique et apprentissages intellectuels*, Peter Lang, Berne, ISBN : 3-906754-32-4

15: Fauconnet S.(1981), Etude de résolution de problème : Quelques problèmes de même structure en physique, *Thèse de doctorat*, *Université Paris VII* , Paris

16: F. Reif, J. H.Larkin, B. C. Bracket, (1976), Teaching general learning and problem solving skills, *Am. J. Phys*, N° : 44, 212-217

17: A. Van Heuvelen (1991), Learning to think like a physicist: A review of research-based instructionalstrategies, *Am. J. Phys.*, N° : 59, 891-897

18: A. Van Heuvelen (1991), Overview, Case Study Physics, *Am. J. Phys.*, N° : 59, 898-907

19: P. Heller, R. Keith, S.Anderson (1992), Teaching problem solving through cooperative grouping. Part 1.Group versus individual problem solving, *Am. J. Phys.*, N° : 60, 627-636

20: Leonard W.J., Gerace W.J., Dufresne R.J.(1995), A qualitative model for the storage of domain-specific knowledgeand its implications for problem-solving, Department of Physics & Astronomy, University of Massachusetts,

21: Leonard W.J., Gerace W.J., Dufresne R.J. (1996), Using qualitative problem-solving strategies to highlight the role of conceptual knowledge in solving problems,, *Am. J. Phys.*, N° : 64, 1495-1503

22: Leonard W.J., Gerace W.J., Dufresne R.J.(2001), Analysis-Based Problem Solving: Making analysisand reasoning the focus of physics instruction, University of Massachusetts Physics Education Research Group,

23: Dumas-Carré A., Goffard M., Gil D. (1987), Difficultés des élèves liées aux différentes activités cognitives de résolution de problèmes, *ASTER*, N° : 14,

24: McDermott, L-C., Shaffer P-S., Somers M.D. (1993), Research as a guide for teaching introductory mechanics: An illustration in the context of the Atwood's machine, *Am. J. Phys.*, N° : 62, 46-55

25: McDermott, L-C., Redish E.F. (1999), Resource Letter: PER-1: Physics Education Research, *Am. J. Phys.*, N° : 67, 755-767

26: VanLehn K.(1996), Conceptual and meta learning during coached problem solving In

Frasson, C.,Gauthier, G., and Lesgold, A., Proceedings of the 3rd International Conference on IntelligentTutoring Systems ITS '96., Berlin

27: Desains P.(1857), *Leçons de physique Tome I*, E.Magdeleine, Paris, ISBN :

28: Chevallard Y.(1999), La recherche en didactique et la formation des professeurs :problématiques, concepts, problèmes, in Bailleul M. (Ed.) *Actes de la Xème* ***école d'été*** *de didactique des* ***mathématiques,*** IUFM de Caen.

29: Paquette G. (1996), La modélisation par objets typés: une méthode de représentation pour les systèmes d'apprentissage et d'aide a la tâche, *Sciences et techniques éducatives* , Volume 3, n°1

30: Feynman R.(1995), *cours de physique tome 1*, Addison-Westley Publishing Cie Inc, , ISBN :

31: Vincent, G. (2004), Polycopié du cours de la mécanique du point matériel, Université Joseph fourrier, Grenoble

32: Dictionnaire Hachette (1999), Hachette Multimédia

33: Chevallard Y. (1992), Concepts fondamentaux de la didactique : perspectives apportées par une approche anthropologique, *Recherches en Didactique des Mathématiques*, N° : 12, n°1,

34: Chevallard Y.(1998), Le concept de rapport au savoir. Rapport personnel, rapport institutionnel, rapport officiel., Grenoble, LSD-MAG

35: Chevallard Y.(1995), Actes de la VIII° Ecole d'été de didactique des mathématiques St-Sauves d'Auvergne. Clermont-Ferrand : IREM de Clermont-Ferrand. Actes de la VIIIe Ecole d'Eté

36: Chevallard Y.(1997), Familière et problématique, la figure du professeur, *Recherches en Didactique des Mathématiques*, n° 17/3, 1997, p. 17-54.

37: Le Van T.(2001), Etude didactique des liens entre fonctions et équations dans l'enseignement des mathématiques au lycée en France et au Viêt-nam, *Thèse de doctorat*, *Université Joseph Fourrier* , Grenoble

38: Saglam A.(2004), Les équations différentielles en mathématique et en physique : Etude

des conditions de leur enseignement et caractérisation des rapports personnels des étudiants de première année d'univeristé à cet objet, *Thèse de doctorat*, *Université Joseph Fourrier* , Grenoble

39: Bùi Thi K. H.(2005), Une étude didactique de la vie de l'Energie dans l'enseignement de la physique, en France et au Vietnam, *Thèse de doctorat*, *Université Joseph Fourrier* , Grenoble

40: Robardet G. (2000), Réflexions autour des concepts de savoir et de transposition : écologie des savoirs, *Cours sur l'anthropologique des savoirs- DEA EIAHD, Grenoble*.

41: Sigault de la Fond, Joseph-Aignan(1784), *Description et usage d'un cabinet de physique expérimentale, Tome I*, Gueffier (Document électronique numérisé par BNF), Paris

42: Lamé, Gabriel(1840), *Cours de physique de l'Ecole Polytechnique, Tome I*, Bachelier,(Document électronique numérisé par BNF), Paris

43: Delaunay C.(1852), *Cours élémentaire de mécanique théorique et appliquée*, V. Masson (Document électronique numérisé par BNF), Paris

44: Desains P.(1857), *Leçons de physique Tome I*, E.Magdeleine, Paris

45: Daguin, Pierre-Adolphe(1865), *Cours de physique élémentaire*, E.Privat, Toulouse

46: Schell, Wilhelm(1880), *Theorie der Bewegung und der Kräfte ein lehrbuch der theoretischen Mechanik*, G.Teubner, Leipzig, Allemagne

47: Jamin, Jules-Célestin(1888), *Cours de physique de l'Ecole Polytechnique, Tome I*, Gauthier-Villars et fils, Paris

48: Appell, Paul-Emile(1953), *Dynamique des systèmes*, Document électronique numérisé par BNF

49: Rumelhard G. (2005), Problématisation et concept de paradigme : Approche épistémologique, psychologique et sociologique, *ASTER*, N° : 40, 205-223

50: Ogborn J. (1991), Approche théorique et empirique de la causalité, *Didaskalia*, N° : 1,

51: Koyré A.(2001), *Etudes Galiléennes*, Hermann, , ISBN : 20012 7056 5558 1

52: Balibar F.(1984), *Galilée, Newton lus par Einstein : espaces et relativité*,ISBN : 9782130560210

53: Mach E.(1904), *La mécanique : exposé historique et critique de son développement*, Hermann, IISBN 2-87647-006-3

54: Brahic A. (2006), Neptune, in Encyclopedia Universalis http://www.universalis-edu.com/corpus2.php?mots=&nref=C000133

55: Morando B. (2006), LE VERRIER (U. J. J.), in Encyclopedia Universalis,

56: Simanek D. Résolution de l'exercice de la machine d'Atwood, http://www.lhup.edu/~dsimanek/scenario/labman1/atwood.htm

57: Résolution de l'exercice de la machine d'Atwood sur le site internet de HyperPhysics, http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html

58: Alonso M., Finn E J.(2001), *Physique générale : 1. Mécanique et thermodynamique, Cours et exercices corrigés, 2e édition*, DUNOD, Paris, ISBN : 210005504X

59:Résolution de l'exercice de la machine d'Atwood sur le site internet de l'Université En Ligne, http://www.uel.education.fr/consultation/reference/physique/meca/sexercer/chapd/d-13/enonce.htm (dernière visite : 19 septembre 2007)

60: Corrigé de la feuille de Travaux Dirigés utilisée à l'Université Joseph Fourier (Grenoble 1)

61: Largeault J., Méthode, in Encylopedia Universalis, 2005, http://www.universalis-edu.com/imprim.php?nref=O926401

62: Chen P.(1997), *Mécanique galiléen d'un corps ponctuel*, Librairie Vuibert, Paris, ISBN : 2 7117 2460 3

63: Delmas F., Tourret G.(2000), *Mécanique newtonienne du point*, Ellipses, Paris, ISBN : 2-7298-7946-3

64: Bagard S.(2005), *Mécanique : Fiches, méthodes, et exercices corrigés*, Ellipses, Paris, ISBN : 2-7298-2295-X

65: Queyrel J-L., Mesplede J.(1985), *Précis de Physique, Mécanique, Cours et exercices résolus*, Bréal, Rosny, ISBN : 2 85394 189 2

66: Bergua J., Goulley P.(1996), *Résoudre un problème de mécanique*, Bréal, Rosny, ISBN : 2 85394 918 4

67: Clerc P., Clerc C.(2003), *Mécanique PCSI*, Les Nouveaux Précis, Bréal, Paris, ISBN : 2749502233

68: De La Souchère M-C.(2005), *Un pas vers la sup en physique, De la terminale à la prépa : Cours, méthodes, exercices*, Bréal, Rosny, ISBN : 2 7495 0527 5

69: Brasselet P. (2000), Mécanique MPSI-PCSI, Collection Physique-Chimie Prépa, PUF, Paris, ISBN: 2130509576

70: Brousseau G. (1986), Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques, La Pensée sauvage, Grenoble

71: Astolfi, J.-P., Darot, É, Ginsburger-Vogel, Y. et Toussaint, J. (1997), Mots-clés de la didactique des sciences. Repères, définitions, bibliographies,, De Boeck, Bruxelles

ANNEXE

Annexe A
Résolution de *l'Expert de Référence*

Résolution du problème de la machine d'Atwood

1 Approche qualitative : Que prédire des caractéristiques de la situation ? Et des relations entre les grandeurs physiques ?

Dans le dispositif les masses sont différentes : la masse M est plus grande que la masse m. Comme ces deux masses sont reliées par une corde, considérée inextensible, la masse M va tirer la masse m. La masse M descendra et la masse m montera. Si la corde était extensible et/ou élastique, le mouvement serait plus complexe.

1.1 Etude de cas limite *M>>m*

Si la masse m était très très petite par rapport à l'autre de telle façon que l'on puisse négliger m par rapport à M , la masse M serait alors en chute libre. L'accélération de la masse M serait donc très proche de l'accélération gravitationnelle.

1.2 Etude de cas limite *M=m*

Si les deux masses étaient égales (*M=m*), on observerait l'équilibre du dispositif. Il n'y aurait pas de mouvement des masses. On aurait la réponse à la question posée (trouver l'expression de l'accélération de la masse M), l'accélération des deux masses serait nulle dans ce cas.

Ainsi, sans faire de calcul, on peut anticiper la solution du problème dans certains cas très particuliers, et en déduire certaines caractéristiques générales du mouvement : la valeur de l'accélération de la masse M sera toujours inférieure à l'accélération gravitationnelle. On vérifiera cette anticipation à la fin de la résolution quantitative.

2 Résolution « quantitative » du problème

On se place dans le cadre théorique de la mécanique du point matériel (physique classique).

On utilisera le principe fondamental de la dynamique (PFD) sous sa forme particulière valide pour des systèmes qui sont des points matériels de masse constante : $\sum \vec{F}_{ext \to syst} = m_{syst}\,\vec{a}_{syst}$ où $\sum \vec{F}_{ext \to syst}$ est la somme des forces extérieures appliquées au système, m_{syst} la masse du système et $\vec{a}_{syst}$ l'accélération du système.

Lors de la résolution, on négligera par rapport aux autres forces en jeu :

- toutes les interactions gravitationnelles autres que les poids des systèmes.
- les effets de la pression atmosphérique sur les solides
- les forces de frottement (imposé par l'énoncé)
- le poids de la corde et de la poulie (imposé par l'énoncé)

2.1 Condition d'application du PFD

2.1.1 Définition du référentiel

Le PFD est valide dans un référentiel galiléen. L'expérience se déroule sur la terre pendant un temps très court, ce qui permet de considérer le référentiel terrestre comme galiléen. Pour la résolution de ce problème, on travaille dans le référentiel terrestre

exclusivement, donc considéré galiléen.

2.1.2 Choix des systèmes d'étude

Le système à étudier n'est pas précisé dans l'énoncé. Or il y a plusieurs masses en mouvement dans le dispositif : les deux masses, la poulie, la corde. La deuxième étape est donc de définir le(s) système(s) à étudier.

N'ayant aucun a priori pour les systèmes à choisir, on considérera successivement chacun des composants (ou partie de composants) comme un système ; on établira à partir du PFD une relation entre la résultante de forces qui s'exerce sur chaque système, sa masse et son accélération.

Pour utiliser le PFD, on va assimiler les systèmes à étudier (solides) à des points matériels, car on ne prend que des systèmes en mouvement de translation (sauf la poulie : dans ce cas unique on sortira du cadre de la mécanique du point matériel). Les systèmes choisis sont à masse constante, ce qui justifiera l'usage de la forme particulière du PFD citée précédemment.

On commence par la masse *M* car il est demandé de donner l'expression de l'accélération de cette masse.

2.2 Etude des systèmes

2.2.1 Etude de l'objet « M » : Système S1

On assimile la masse *M* à un point matériel que l'on désigne par le système S1. Pour écrire le PFD pour ce système S1, il faut préciser :

- les forces extérieures exerçant sur ce système
- la masse de cet objet
- l'accélération de cet objet

La masse de l'objet est donnée dans l'énoncé du problème et vaut M. Il reste à préciser l'accélération du système et les forces extérieures.

Accélération du système S1

La masse *M* étant supérieure à la masse m, on peut affirmer, d'après l'expérience quotidienne, que la masse *M* descendra et la masse *m* montera. La masse *M* a donc une accélération dirigée vers le bas que l'on va la noter $\vec{a}_M$.

Choix du repère et de système de coordonnées

Le mouvement étant vertical, un seul axe rectiligne (cartésien) suffit donc pour définir le référentiel : on fixe l'origine O à la hauteur de l'axe de la poulie et on définit le vecteur de base unitaire $\vec{i}$ vertical dirigé vers le bas.

On peut alors écrire le vecteur accélération dans ce système de coordonnées choisi : $\vec{a}_M = \|\vec{a}_M\| \vec{i}$.

Bilan de forces extérieures sur le système S1

Forces à distance

On ne considère que le poids de la masse M : $\vec{P}_M$.

Forces de contact

D'après l'énoncé, on néglige la force de frottement solide/fluide (entre la masse M et l'air).

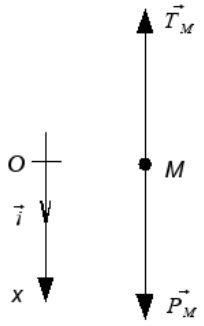
La masse M est attachée à une corde et la corde exerce une force de contact sur la masse M : $\vec{T}_M$.

Ainsi, deux forces s'exercent sur la masse M : $\vec{P}_M$ et $\vec{T}_M$.

Expression des forces extérieures exercées sur S1 dans le système de coordonnées choisi

Dans le système de coordonnées choisi, on sait exprimer le poids de la masse M :

$$\vec{P}_M = +Mg\,\vec{i}$$



Par contre, on ne peut pas a priori exprimer la force de tension en fonction des données du problème, mais on peut écrire ce vecteur force de la façon suivante :

$$\vec{T}_M = -\|\vec{T}_M\|\,\vec{i}$$

Ecriture vectorielle du PFD pour le système S1

On a maintenant tous les éléments pour écrire le PFD pour ce système en partant de l'expression générale du PFD. Pour le système S1, on aura :

$$\sum \vec{F}_{ext\to S1} = m_{S1}\,\vec{a}_{S1}$$
$$\vec{P}_M + \vec{T}_M = M\,\vec{a}_M$$

Projection de l'équation vectorielle du système S1

En projetant cette équation vectorielle du système S1 suivant l'axe vertical du repère choisi (l'axe vertical dirigé vers le bas : Ox), on obtient :

$$+Mg - \|\vec{T}_M\| = +M\,\|\vec{a}_M\| \qquad \textbf{\textit{Equation}}\ 1$$

Dans cette équation, il y a deux inconnues ; la force de tension $\vec{T}_M$ et l'accélération de la masse M $\vec{a}_M$. On ne peut pas résoudre cette équation à deux inconnues (connaissances d'algèbre).

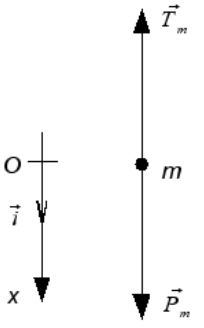
L'étude des autres systèmes peut permettre d'établir des relations entre ces inconnues et de donc trouver l'expression de l'accélération de la masse M.

2.2.2 Etude de l'objet « m » : Système S2

On assimile la masse m à un point matériel que l'on appelle le système S2. L'étude de ce système sera similaire à celle du système S1.

Accélération du système S2

La masse m monte alors que la masse M descend. Elle a donc une



accélération dirigée vers le haut. On la notera $\vec{a}_m$ et on écrit son expression dans le système de coordonnées choisi $\vec{a}_m = -\|\vec{a}_m\|\vec{i}$.

Bilan de forces extérieures sur le système S2

Forces à distance

On ne considère que le poids de la masse m : $\vec{P}_m$.

Forces de contact

D'après l'énoncé, on néglige la force de frottement solide/fluide (entre la masse *m* et l'air).

La masse m est attachée à une corde et la corde exerce une force de contact sur la masse *m* : $\vec{T}_m$.

Ainsi, deux forces s'exercent sur la masse M : $\vec{P}_m$ et $\vec{T}_m$.

Expression des forces extérieures exercées sur S1 dans le système de coordonnées choisi

On exprime les deux forces dans le système de coordonnées choisi :

$$\vec{P}_m = +mg\,\vec{i}$$
$$\vec{T}_m = -\|\vec{T}_m\|\vec{i}$$

Ecriture vectorielle du PFD pour le système S2

Le PFD pour le système S2 s'écrit :

$$\sum \vec{F}_{ext \to S2} = m_{S2}\vec{a}_{S2}$$
$$\vec{P}_m + \vec{T}_m = m\vec{a}_m$$

Projection de l'équation vectorielle du système S2

On projette le PFD sur le même axe vertical *Ox* ;

$$+mg - \|\vec{T}_m\| = -m\|\vec{a}_m\| \qquad \textbf{\textit{Equation}}\ 2$$

On a à présent deux équations avec quatre inconnues ;

$$+Mg - \|\vec{T}_M\| = +M\|\vec{a}_M\|$$
$$+mg - \|\vec{T}_m\| = -m\|\vec{a}_m\|$$

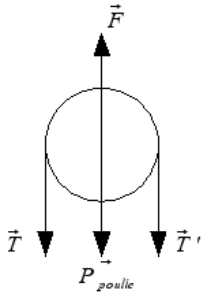
La résolution de ce système pourrait permettre d'obtenir l'accélération de la masse M à condition de trouver des relations entre l'accélération des deux masses et les deux forces de tension.

2.2.3 Etude de la poulie (Système S3) – pas de mouvement de translation

On assimile *la poulie et le brin de la corde passant au-dessus de la poulie* à un système matériel : le système S3 (ce qui n'est pas tout à fait le cas).

Accélération du système S3

Le système n'est pas en mouvement de translation, donc son accélération est nulle : $\vec{a}_{S3} = \vec{0}$.



Bilan de forces extérieures exercées sur le système S3

On néglige la force de frottement à l'axe de la poulie, et les forces exercées par l'air.
Il y a donc 4 forces s' exerçant sur la poulie ; la force de tension pour la corde à gauche $\vec{T}$, la force de tension à droite $\vec{T}'$, le poids de la poulie $\vec{P}_{poulie}$, la force de réaction normale exercée par l'axe de la poulie $\vec{F}$.

Ecriture vectorielle du PFD pour le système S3

Le principe fondamental de la dynamique d'écrit pour le système S3 :

$$\sum \vec{F}_{ext \to S3} = m_{S3}\vec{a}_{S3}$$

La poulie ne subissant pas de mouvement de translation, on peut écrire:

$$\vec{P}_{poulie} + \vec{F} + \vec{T} + \vec{T}' = \vec{0}$$

Comme l'énoncé pose que la masse de la poulie est négligeable par rapport aux forces, $\vec{P}_{poulie} = \vec{0}$, alors :

$$\vec{F} + \vec{T} + \vec{T}' = \vec{0}$$

Projection de l'équation vectorielle

On projette l'équation vectorielle suivant l'axe du repère choisi et on obtient :

$$\|\vec{F}\| = \|\vec{T}\| + \|\vec{T}'\| \qquad \textbf{\textit{Equation 3}}$$

L'étude de ce système donne une relation entre la réaction que subit le support et les deux forces de tension mais relation n'est d'aucune utilité pour résoudre les deux équations du PFD écrites pour les systèmes S1 et S2.

2.2.4 Etude d'un brin de la corde (Système S4)

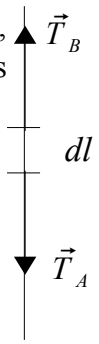
Pour étudier la corde, on considère un brin de la corde de longueur dl sur l'une des parties verticales, par exemple la partie verticale où la masse M est suspendue.

Accélération du système S4

Le système S4 a une accélération que l'on désigne par $\vec{a}_{S4}$. Cette accélération s'écrit dans le système de coordonnées choisi : $\vec{a}_{S4} = +\|\vec{a}_{S4}\|\vec{i}$.

Bilan de forces extérieures sur le système S4

Comme le poids de la corde est négligeable par rapport aux forces de tension, on ne prend en compte que les deux forces de contact $\vec{T}_A$ et $\vec{T}_B$. exercées par les segments de corde extérieurs au système.



Ecriture vectorielle du PFD pour le système S4

D'après le PFD :

$$\sum \vec{F}_{ext \to S4} = m_{S4} \vec{a}_{S4}$$
$$\vec{T}_A + \vec{T}_B = dm_{corde} \vec{a}_{S4}$$

Comme la masse du brin de la corde *dl* est très petite on considère que l'inertie de ce système est négligeable par rapport aux forces de tension, on a donc

$$\vec{T}_A + \vec{T}_B = \vec{0}$$

Projection de l'équation vectorielle

On projette l'équation vectorielle ci-dessus suivant l'axe du repère vertical dirigé vers le bas et on obtient :

$$\|\vec{T}_A\| = \|\vec{T}_B\| \qquad \textbf{\textit{Equation 4}}$$

2.2.5 Mouvement de rotation de la poulie : Système S5

Le théorème du moment cinétique permettra d'étudier le mouvement de la poulie entraînée par la corde. Le théorème de moment cinétique s'écrit :

$$\frac{d}{dt}\vec{L} = \sum_i M_i(\vec{F}_i)$$

où $\vec{L}$ est le moment cinétique de la poulie et $\sum_i M_i(\vec{F}_i)$ la somme des moments de forces appliquées à la poulie.

Définition du système

On prend comme système la poulie et le morceau de la corde passant sur la poulie (de longueur πr).

Identifier les forces appliquées à la poulie

Les trois forces suivantes sont négligeables par rapport aux forces de tension de la corde :

- les forces de frottement solide/fluide avec l'air et
- la force de frottement solide/solide à l'axe de la poulie.
- le poids du système

Les forces appliquées à la poulie sont :

- les forces de tension exercées par les brins de corde verticaux sur le système : $\vec{T}_1$, $\vec{T}_2$
- la force de réaction normale $\vec{R}$ exercée par l'axe de la poulie

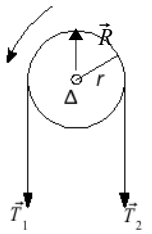
Calcul des moments des forces

En utilisant l'expression du moment de force : $M(\vec{F}) = \vec{OM} \times \vec{F}$, on obtient les moments de chacune des forces appliquées à la poulie :

- lmoment de la force $\vec{T}_1$: $M(\vec{T}_1) = rT_1$
- moment de la force $\vec{T}_2$: $M(\vec{T}_2) = -rT_2$
- moment de la force $\vec{R}$: $M(\vec{R}) = 0$

Calcul du moment cinétique de la poulie

Comme on néglige la masse de la poulie I=0, on a $\frac{d}{dt}\vec{L}=0$.



Ecriture du théorème de moment cinétique

Le théorème du moment cinétique pour le système étudié s'écrit :

$$\frac{d}{dt}\vec{L}=\sum_i M_i(\vec{F}_i)$$

$$\underbrace{\frac{d}{dt}\vec{L}}_{0}=\underbrace{M(\vec{T}_1)}_{rT_1}+\underbrace{M(\vec{T}_2)}_{-rT_2}+\underbrace{M(\vec{R})}_{0}$$

On a une relation d'égalité entre les deux forces de tension exercées de part et d'autre de la poulie :

$$T_1=T_2 \qquad \textbf{\textit{Equation 5}}$$

D'après les équations 4 et 5, o en déduit que
$\|\vec{T}_A\|=\|\vec{T}_1\|=\vec{T}_M$ et $\|\vec{T}_B\|=\|\vec{T}_2\|=\|\vec{T}_m\|$ et donc

$$\|\vec{T}_M\|=\|\vec{T}_m\| \qquad \textbf{\textit{Equation 6}}$$

Dans cette résolution, la poulie n'interviendra donc pas et sera considérée comme un moyen de transmettre la tension de la corde de la masse *M* à la masse *m*.

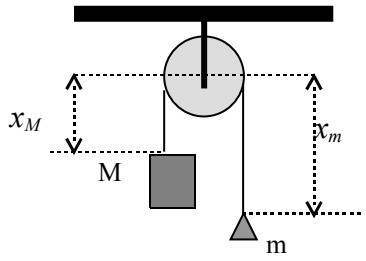
L'étude de ce système a donc permis d'obtenir une relation qui sera utile pour résoudre les équations du PFD des masses *M* et *m*. Quel que soit le système choisi sur la corde, les deux forces de tension seront égales. On considère $\|\vec{T}_M\|=\|\vec{T}_m\|=T$
Le système d'équations s'écrit:

$$+Mg-\|\vec{T}\|=+M\|\vec{a}_M\|$$
$$+mg-\|\vec{T}\|=-m\|\vec{a}_m\|$$

2.2.6 Conservation de la longueur de la corde

On a maintenant trois inconnues, $\vec{T}, \vec{a}_M, \vec{a}_m$ et deux équations. Or, dans l'énoncé, on a précisé que la corde était inextensible. Cette propriété de la corde va donner une relation entre les accélérations de *M* et *m*.

Paramétrer la longueur de la corde



On exprime la longueur de la corde comme

$$l=x_M+x_m+\pi R$$

où x_M la longueur de la partie gauche la corde, x_m celle de la partie droite et πR celle passant autour de la poulie.

Ecriture de l'expression algébrique de la conservation de la corde

La corde est inextensible, donc elle a une longueur constante. Elle ne changera pas au cours du temps. On écrit ;

$$\frac{dl}{dt}=0 \text{ et } \frac{d^2 l}{dt^2}=0$$

comme R=cte

$$\frac{d^2 x_M}{dt^2}+\frac{d^2 x_m}{dt^2}=0$$

Passage aux accélérations des masses

Or en choisissant le centre de repère au centre de la poulie et en orientant l'axe vers le bas, on se rend compte que les longueurs x_M et x_m des brins de corde coïncident avec les abcisses des vecteurs positions des masses M et m (réduites à des points matériels) : $\vec{OM}=x_M\vec{i}$ et $\vec{Om}=x_m\vec{i}$. Les dérivés secondes de ces longueurs donnent donc les coordonnées verticales des accélérations des deux masses $\vec{a}_M=\frac{d^2 x_M}{dt^2}$ et $\vec{a}_m=\frac{d^2 x_m}{dt^2}$.

La relation précédente issue de la conservation de la longueur de la corde donne donc une relation entre les accélérations des masses :

$$\vec{a}_M=-\vec{a}_m \qquad \textbf{\textit{Equation 7}}$$

C'est-à-dire que les *accélérations* des deux *masses* ont même *direction*, même *intensité* et sont de *sens* opposé. Le *mouvement* de celle qui monte est de même *nature* que celui de celle qui descend.

2.3 Résolution des équations

Dans ce qui suit, on considère $\|\vec{a}_M\|=\|\vec{a}_m\|=a$
On a deux équations :

$$+Mg-\|\vec{T}\|=+M\|\vec{a}\|$$
$$+mg-\|\vec{T}\|=-m\|\vec{a}\|$$

On peut résoudre le système de deux équations à deux inconnues. Si on multiplie par un moins la deuxième équation :

$$+Mg-\|\vec{T}\|=+M\|\vec{a}\|$$
$$-mg+\|\vec{T}\|=+m\|\vec{a}\|$$

En additionnant les deux équations afin d'éliminer $\vec{T}$ et on aura :

$$a=\frac{M-m}{M+m}g$$

ou bien

$$\vec{a}_M=\frac{M-m}{M+m}\vec{g}=-\vec{a}_m \qquad \textbf{\textit{Equation 8}}$$

L'accélération de la masse M dépend donc des valeurs des masses M et m. Plus la différence

entre les deux masses est grande, plus l'accélération de M est proche de l'accélération gravitationnelle.

3 Contrôle de résultats

On vérifiera le résultat obtenu afin de repérer les incohérences éventuelles. On effectue une vérification du résultat obtenu pour l'accélération de la masse M dans le dispositif de la machine d'Atwood en utilisant une observation expérimentale et l'analyse dimensionnelle.

Dans cette relation, comme $\frac{M-m}{M+m}$ est toujours inférieur à 1, l'accélération des masses M et m sera plus petite que l'accélération gravitationnelle. Si la masse M est beaucoup plus importante que la masse m, la chute de M sera proche d'une chute libre. Si la différence des deux masses est faible, on observera une chute très lente de la masse M, d'où l'intérêt d'un tel dispositif.

Le facteur $\frac{M-m}{M+m}$ par lequel on multiplie l'accélération gravitationnelle g est sans dimension. Les deux membres de l'équation ont la dimension d'une accélération. Le résultat obtenu est donc bien cohérent du point de vue de l'homogénéité dimensionnelle.

Dans ce dispositif, si $M=m$, il s'agira de l'état équilibre et l'accélération sera nulle. Si on remplace $M=m$ dans l'expression obtenue on aura bien une accélération nulle comme prévue.

Il y avait deux inconnues dans les équations du PFD de la masse M et m. On a trouvé l'expression de l'accélération des masses et on peut calculer l'expression de la force de tension. Pour ce faire, il suffit de prendre l'équation du PFD de la masse M ou bien celle de la masse m. On prend ci-dessous l'équation de la masse M et y remplace l'expression de l'accélération.

L'équation projetée sur l'axe OX s'écrit :

$$+Mg-\|\vec{T}\|=+M\|\vec{a}\| \ .$$

L'expression de l'accélération étant $a=\frac{M-m}{M+m}g$, on a donc :

$$+Mg-\|\vec{T}\|=+M\frac{M-m}{M+m}g \ .$$

On obtient l'expression du module de force de tension $\|\vec{T}_M\|=\frac{2\mathrm{Mm}}{M+m}g$.

Donc : $\vec{T}_M=-\|\vec{T}_M\|\vec{i}$, et on peut écrire :

$$\vec{T}_M=-\frac{2\mathrm{Mm}}{M+m}g\,\vec{i}=\vec{T}_m \ .$$

On vérifie ce résultat comme on a fait pour l'expression de l'accélération des masses M et m.

Du point de vue de l'homogénéité dimensionnelle, les deux membres de la relation ont la dimension d'une force.

On contrôle l'expression de la force de tension par l'étude des cas limites en prenant $M=m$. Dans ce cas où le dispositif est en équilibre, la force de tension sera égale à mg. Le dispositif peut être considéré comme équivalent à une masse suspendue à un support par une corde inextensible. Dans ce cas, on sait que les deux forces qui s'exercent sur la masse sont le poids et la force de tension. Comme la masse est en équilibre, son accélération est nulle et, en appliquant le PFD à cette masse, on en déduit que le module de la force de tension est égal au module du poids de la masse.

On fait aussi un contrôle du signe sur l'expression $\vec{T}_M = -\frac{2\mathrm{Mm}}{M+m} g \vec{i}$. La force de tension est dirigée vers le haut alors que l'accélération gravitationnelle est dirigée vers le bas d'où le signe opposé dans l'expression vectorielle de la force de tension.

On vérifie que le résultat trouvé est cohérent.

D'ailleurs, on a prédit que l'accélération de la masse M aura une valeur plus petite que l'accélération gravitationnelle. Ainsi, la prédiction qualitative est aussi conforme à la résolution quantitative.

Annexe B1

Evolution du rapport institutionnel des enseignants à la « résolution du problème de la machine d'Atwood »

Annexe B1

I Manuel de 1784 [1] 3
I.1 Description générale du dispositif, de la poulie et de la corde 3
I.2 Effets de frottement sur le mouvement des masses 4
I.3 Problèmes posés sur le dispositif de la machine d'Atwood 5
I.4 Résolution du 1e problème dans le manuel de 1784 6
I.4.1 Prédiction sur le mouvement à partir des lois de Galilée 6
I.4.2 Démarche à suivre pour vérifier expérimentalement la prédiction à l'aide du dispositif de la machine d'Atwood 6
II Que se passe-t-il entre 1784 et 1880 ? 7
II.1 Description de la machine dans le manuel qui date de 1840 [2] 7
II.2 Intention de l'enseignant 7
II.3 Diverses représentations de la machine dans le manuel de 1857 [3] 8
II.4 Etude du mouvement dans le manuel qui date de 1857 [3] 9
II.5 Etude du mouvement dans le manuel qui date de 1865 [4] 9
III Résolution du problème de la machine d'Atwood en 1880 [5] 10

Index des figures

Figure 1: Description générale du dispositif -Manuel 1784. « GH (Pl.IX) » est un renvoi à la figure de la machine d'Atwood 15
Figure 2: Description de la poulie -Manuel 1784 15
Figure 3: Caractéristique de la corde utilisé dans la machine d'Atwood, manuel de 1784 15
Figure 4: Forces de frottement visqueuses étudiées dans le manuel de 1784 16
Figure 5: Force de frottement entre le fil de soie et la poulie -Manuel 1784 16
Figure 6: Effet de la masse du fil de soie sur le mouvement des masses -Manuel 1784 16
Figure 7: Problèmes posées sur le dispositif de la machine d'Atwood -Manuel 1784 17
Figure 8: Résolution du premier problème -Manuel 1784 18
Figure 9: Démonstration expérimentale du premier problème -Manuel 1784 18
Figure 10: La description de la machine d'Atwood retrouvée dans le manuel qui date de 1840. La description s'est réduite en quelques lignes au cours du temps. 19
Figure 11: Extrait tiré du manuel qui date de 1857[3]. L'intention de l'enseignant est exprimée comme « étude de la chute des corps plus commodément qu'avec le plan incline de Galilée. 19
Figure 12: Les figures retrouvées dans le manuel qui date de 1857. On voit apparaître la figure proche de celle qu'on utilise actuellement dans l'énoncé actuel du problème de la machine d'Atwood. 20
Figure 13: Etude du mouvement dans le manuel qui date de 1857. Pour calculer le ralentissement du mouvement, on ne compte plus l'inertie de la poulie. 21
Figure 14: Etude du mouvement dans le manuel qui date de 1865. On voit le premier usage du registre algébrique pour exprimer le taux de ralentissement du mouvement. 21
Figure 15: Résolution du problème de la machine d'Atwood dans le manuel de 1880 22
Figure 16: Suite de la résolution du problème de la machine d'Atwood dans le manuel de 1880 23

I Manuel de 1784 [1]

I.1 Description générale du dispositif, de la poulie et de la corde

GH (Pl. IX.) eſt une colonne en bois rougi d'environ 6 pieds de hauteur, 4 pouces & demi de largeur, & 1 pouce 9 lignes d'épaiſſeur. Cette piece eſt faite de deux morceaux joints à queue d'aronde & aſſujettis par des vis noyées dans l'épaiſſeur du bois, ce qui donne plus de facilité pour la tranſporter; elle eſt établie verticalement ſur une planche M N, très-épaiſſe & chantournée, ſur laquelle repoſent également trois jambes de force IKL, diſpoſées en triangle & jointes à la colonne par des vis en fer. Trois autres vis en bois *o*, *p*, *q* traverſent l'épaiſſeur de la baſe & ſervent à aſſujettir cette baſe, ainſi qu'à mettre la colonne dans une direction perpendiculaire à l'horizon.

Figure 1: Description générale du dispositif -Manuel 1784. « GH (Pl.IX) » est un renvoi à la figure de la machine d'Atwood

quatre rouleaux en cuivre de même diamètre, & un autre plus grand & d'un poids plus conſidérable. Ces rouleaux ſont établis verticalement & ſe meuvent dans cette direction ſur leurs axes. Les plus petits, pris deux à deux, ſont de droite & de gauche & parallèlement entr'eux, de maniere que la circonférence de l'un paſſe très-près du centre de l'autre, & réciproquement. Quant au grand rouleau Y, les deux pivots de ſon axe ont pour points d'appui ceux d'interſection des petits rouleaux, & par conſéquent il n'éprouve que très-peu de frottement lorſqu'il ſe meut, les petits rouleaux ſe mouvant alors également ſur leurs pivots.

Figure 2: Description de la poulie -Manuel 1784

Ce grand rouleau a une rainure ou gorge dans toute ſa périphérie, ſur laquelle paſſe une ſoie très-fine, mais aſſez forte pour ſoutenir deux cercles de cuivre A, B ſuſpendus horizontalement à ſes extrémités *a b*, ainſi que les différens poids qu'on emploie dans les expériences.

Figure 3: Caractéristique de la corde utilisé dans la machine d'Atwood, manuel de 1784

[1] : Sigault de la Fond J.A. (1784), *Description et usage d'un cabinet de physique expérimentale*, Tome I, Gueffier, Paris, Document électronique numérisé par BNF : http://www.bnf.fr

I.2 Effets de frottement sur le mouvement des masses

Quand on fait tomber les corps de grandes hauteurs, l'accélération n'a pas lieu dans toute ſon étendue à cauſe de la réſiſtance de l'air qui occaſionne de très-grandes variations; c'eſt ce que l'on peut voir en examinant la Table de la chute des corps graves, inſérée dans les Tranſactions philoſophiques; mais ici les chutes étant peu conſidérables, les différences ne ſont point ſenſibles; car en ſuppoſant que chaque pouce cubique d'air peſât $\frac{1}{7}$ de grain, la réſiſtance que ce fluide oppoſeroit au fond du baſſin A, dans le cas où ſa chute ſeroit d'environ 26 pouces (& c'eſt la plus grande vîteſſe qu'on emploie dans ces expériences), cauſeroit dans cette chute un retard à peu-près égal à celui que produiroit 1 grain $\frac{1}{7}$. Or, une auſſi petite différence eſt bien au-deſſous de la perception de nos ſens.

Figure 4: Forces de frottement visqueuses étudiées dans le manuel de 1784

Il en eſt à peu-près de même du frottement qu'éprouve la poulie ſur laquelle paſſe la ſoie chargée des deux baſſins A & B; comme les deux bouts de l'axe de cette poulie tournent ſur des points mobiles préſentés par l'interſection des quatre rouleaux, la réſiſtance cauſée par un auſſi léger frottement ne peut pas produire d'effets ſenſibles dans les expériences; il eſt facile de s'en convaincre en chargeant les deux baſſins de maniere que la maſſe totale ſoit 64, ce qui fait 16 onces, également diſtribuées entre A & B. Si l'on ajoute un grain & demi, ou tout au plus 3 grains d'un côté ou de l'autre, l'équilibre ſera rompu, & le baſſin qui les aura de plus, ne manquera pas de deſcendre.

Figure 5: Force de frottement entre le fil de soie et la poulie -Manuel 1784

Quoique la force accélératrice qui occaſionne la chute du baſſin A ne ſoit pas préciſément conſtante à cauſe du fil de ſoie qui le joint au baſſin B, & qui n'a pas toujours la même longueur, néanmoins elle ne varie point aſſez pour produire un effet ſenſible. Ce fil de ſoie a environ 72 pouces, & ſon poids eſt d'environ trois grains. Or, ſuivant M. *Atwood*, l'inégalité du mouvement cauſée par l'addition de ce poids, tandis que le baſſin A parcourt 48 pouces, n'excède pas la $\frac{1}{0,03\,11}$ partie d'une ſeconde; & nos ſens ne peuvent certainement point diſtinguer une quantité auſſi petite.

Figure 6: Effet de la masse du fil de soie sur le mouvement des masses -Manuel 1784

I.3 Problèmes posés sur le dispositif de la machine d'Atwood

PREMIER PROBLÈME.

Si la quantité 64 *m* a pour force accélératrice 1 *m*, l'eſpace qu'elle parcourra dans la premiere ſeconde de ſa chute, ſera ſeulement de 3 pouces.

TROISIEME PROBLÈME.

La même maſſe 64 *m* étant mue par une force 1 *m*, 2 *m* & 3 *m*, pendant la même quantité de tems, par exemple 2 ſecondes; les eſpaces parcourus ſeront dans la proportion des forces accélératrices, c'eſt-à-dire 12, 24 & 36 pouces, ſi les tems ſont égaux.

CINQUIEME PROBLÈME.

La viteſſe acquiſe par un corps uniformément accéléré, eſt comme le double de l'eſpace qu'il a parcouru dans les premiers inſtans de ſa chute, c'eſt-à-dire que ſi au bout d'un tems donné le mouvement de ce corps devient uniforme, la viteſſe qu'il aura acquiſe lui fera parcourir un eſpace double.

SEPTIEME PROBLÈME.

...les viteſſes, ou les eſpaces parcourus qui les meſurent, ſont en raiſon directe des forces accélératrices, lorſque celles-ci ſont pour la même maſſe & en des tems égaux, 1, 2, 3, &c.

SECOND PROBLÈME.

Les eſpaces parcourus en tems égaux par un corps dont la force accélératrice eſt conſtante, ſont en raiſon doublée, ou comme les quarrés des tems.

QUATRIEME PROBLÈME.

Si les eſpaces ſont égaux & les forces différentes par exemple, comme 1 à 4. les tems ſeront alors en raiſon ſous-doublée des forces, c'eſt-à-dire comme 1 à 2 dans le cas que nous ſuppoſons.

SIXIEME PROBLÈME.

Les viteſſes acquiſes d'un mouvement uniformément accéléré, ſont entre elles, comme les tems employés à les acquérir, c'eſt-à-dire, ſi un corps tombe librement pendant 1, 2, 3, 4, &c. & un plus grand nombre de ſecondes, les viteſſes qu'il aura acquiſes dans chaque ſeconde, ſeront dans la même raiſon.

HUITIEME PROBLÈME.

Si les forces agiſſantes ou accélératrices ſont comme 3 à 4, & les tems des chutes comme 1 à 2, alors les viteſſes acquiſes ſeront comme 3 à 8, ou, ce qui eſt la même choſe en raiſon compoſée des forces accélératrices & des tems pendant leſquels elles auront agi.

NEUVIEME PROBLÈME.

Si une maſſe gravitante, telle que 64 *m*, eſt accélérée dans ſa chute par des forces qui ſont comme 1 à 4, tandis qu'elle parcourt le même eſpace, tel que 12 pouces, les viteſſes acquiſes ſeront en raiſon ſous-doublée des forces, c'eſt-à-dire comme 1 à 2 dans le cas ſuppoſé.

ONZIEME PROBLÈME.

Si un poids 64 *m* parcourt des eſpaces différens, tels que 3 & 27 pouces en vertu de la même force accélératrice 1 *m*, alors les viteſſes acquiſes ſont en raiſon ſous-doublée des eſpaces parcourus, c'eſt-à-dire, comme 1 à 3 dans le cas propoſé.

DIXIEME PROBLÈME.

Si deux corps 64 *m* & 48 *m* parcourent le même eſpace, par exemple, 12 pouces avec la même viteſſe, alors les forces accélératrices ſont dans la proportion des maſſes gravitantes, c'eſt-à-dire dans la ſuppoſition préſente, comme 4 à 3.

Figure 7: Problèmes posées sur le dispositif de la machine d'Atwood -Manuel 1784

I.4 Résolution du 1e problème dans le manuel de 1784

I.4.1 Prédiction sur le mouvement à partir des lois de Galilée

1 *m* étant la 64e. partie de la maſſe totale qu'elle eſt ſuppoſée mettre en mouvement, elle doit lui faire parcourir un eſpace 64 fois plus petit que celui qu'elle parcourroit dans le même tems, ſi elle ſe mouvoit avec toute ſa force gravitante. Or, dans ce cas, l'eſpace parcouru pendant la premiere ſeconde ſeroit de 192 pouces, conformément à ce que nous venons de dire ; par conſéquent le quotient de 192, diviſé par 64, qui eſt 3 pouces, ſera la quantité d'eſpace que parcourra, dans le même tems, la maſſe totale, ſi elle n'eſt mue que par $\frac{1}{64}$ de ſon poids.

Figure 8: Résolution du premier problème -Manuel 1784

I.4.2 Démarche à suivre pour vérifier expérimentalement la prédiction à l'aide du dispositif de la machine d'Atwood

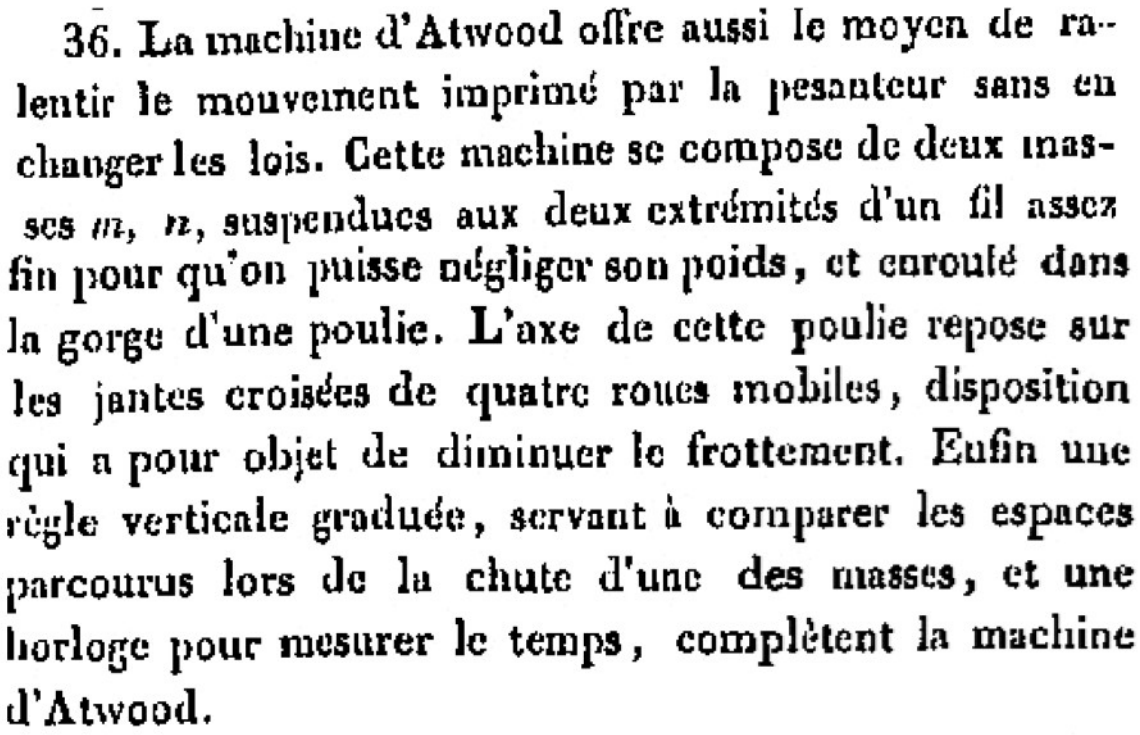
Pour le démontrer, les baſſins A & B étant 12 *m*, & l'inertie du rouage 8 *m*, ajoutez 21 *m* & demie à chaque baſſin, & 1 *m* de plus au baſſin A, celui-ci égalera alors 28 *m* & demie, tandis que le baſſin B ſera 27 *m* & demie, & ainſi la ſomme totale égalera 64 *m*, y compris 8 *m* de force d'inertie; mais dans le même tems la force accélératrice ſera ſeulement $\frac{1}{64}$ ou 1 *m*, excès de A ſur B.

Mettez enſuite l'étage D ſur la diviſion de 3 pouces marquée dans l'échelle, & le fond du baſſin A au zéro de la même échelle; cette maſſe, livrée à elle-même après quelques ſecondes, tombera ſur l'étage dans le tems d'une ſeconde; car le coup qu'elle frappera coïncidera exactement avec le coup ſuivant du pendule : ainſi toute la maſſe 64 parcourra 3 pouces dans la premiere ſeconde de ſa chute.

Figure 9: Démonstration expérimentale du premier problème -Manuel 1784

II Que se passe-t-il entre 1784 et 1880 ?

II.1 Description de la machine dans le manuel qui date de 1840 [2]

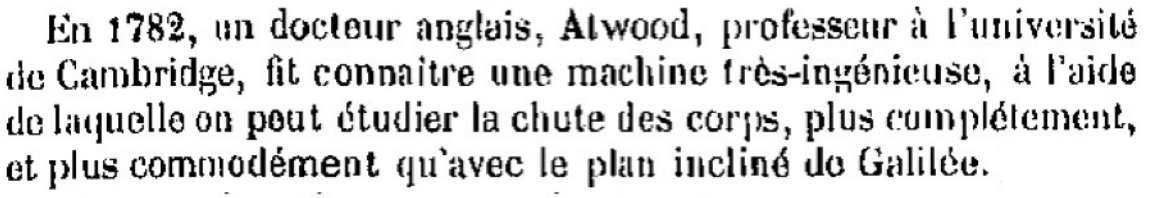


36. La machine d'Atwood offre aussi le moyen de ralentir le mouvement imprimé par la pesanteur sans en changer les lois. Cette machine se compose de deux masses *m*, *n*, suspendues aux deux extrémités d'un fil assez fin pour qu'on puisse négliger son poids, et enroulé dans la gorge d'une poulie. L'axe de cette poulie repose sur les jantes croisées de quatre roues mobiles, disposition qui a pour objet de diminuer le frottement. Enfin une règle verticale graduée, servant à comparer les espaces parcourus lors de la chute d'une des masses, et une horloge pour mesurer le temps, complètent la machine d'Atwood.

Figure 10: La description de la machine d'Atwood retrouvée dans le manuel qui date de 1840. La description s'est réduite en quelques lignes au cours du temps.

[2] : Lamé G. (1840), *Cours de physique de l'Ecole Polytechnique, Tome I*, Bachelier, Paris Document électronique numérisé par BNF http://www.bnf.fr

II.2 Intention de l'enseignant



En 1782, un docteur anglais, Atwood, professeur à l'université de Cambridge, fit connaître une machine très-ingénieuse, à l'aide de laquelle on peut étudier la chute des corps, plus complétement, et plus commodément qu'avec le plan incliné de Galilée.

Figure 11: Extrait tiré du manuel qui date de 1857[3]. L'intention de l'enseignant est exprimée comme « étude de la chute des corps plus commodément qu'avec le plan incline de Galilée.

[3] Desains P. (1857), *Leçons de physique Tome I*, E.Magdeleine, Paris, Document électronique numérisé par BNF http://www.bnf.fr

II.3 Diverses représentations de la machine dans le manuel de 1857 [3]

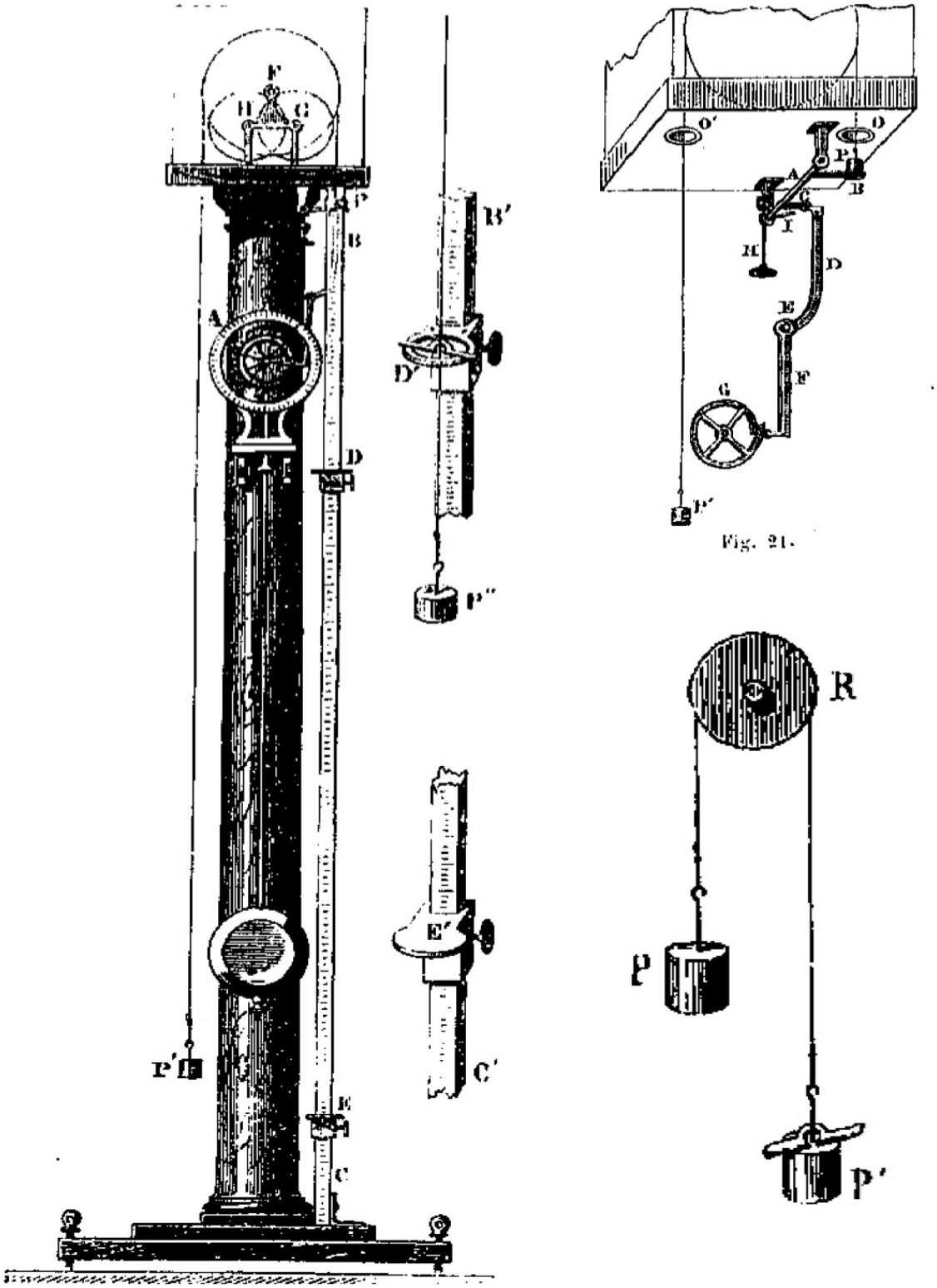


Figure 12: Les figures retrouvées dans le manuel qui date de 1857. On voit apparaître la figure proche de celle qu'on utilise actuellement dans l'énoncé actuel du problème de la machine d'Atwood.

[3] Desains P. (1857), *Leçons de physique Tome I*, E.Magdeleine, Paris, Document électronique numérisé par BNF http://www.bnf.fr

II.4 Etude du mouvement dans le manuel qui date de 1857 [3]

Principe de la machine. — Si aux deux extrémités d'un fil AB, enroulé sur une poulie R très-mobile, on attache des poids égaux, l'équilibre subsistera dans toutes les positions possibles. Mais, si l'on vient à poser sur l'un d'eux P', une petite masse additionnelle μ, tout le système se trouvera mis en mouvement; la masse $P' + \mu$ descendra tandis que P, au contraire, s'élèvera; seulement, à chaque époque du mouvement, la vitesse sera beaucoup plus petite que celle dont, au même instant, eût été animée la masse additionnelle μ tombant en liberté. Dans les deux cas, en effet, la force motrice efficace n'est jamais que l'action de la pesanteur sur μ; mais, dans le premier, la masse totale $2P + \mu$ que cette force doit mouvoir, est beaucoup plus grande que dans l'autre. Si, par exemple, $P = 49{,}5$ et $\mu = 1$, on aura $2P + \mu = 100$, la masse à mouvoir dans le premier cas sera donc 100 fois plus grande que dans le second; et par suite, la vitesse acquise au bout du même temps devra être 100 fois moindre.

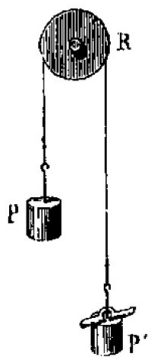


Fig. 19.

Figure 13: Etude du mouvement dans le manuel qui date de 1857. Pour calculer le ralentissement du mouvement, on ne compte plus l'inertie de la poulie.

II.5 Etude du mouvement dans le manuel qui date de 1865 [4]

Principe de l'appareil. — Si l'on pose un poids additionnel p sur la masse m, cette masse descend en faisant monter la masse m'; mais le mouvement est beaucoup plus lent que si le poids p tombait librement; car ce poids a à entraîner, avec sa propre masse, les masses m et m'. De plus, les lois de la chute ne sont pas altérées; car, si la somme des masses mises en mouvement par le poids p est égale à 10 fois sa masse, le mouvement est le même que si, la masse entraînée étant seulement celle du poids p, la force de la pesanteur était 10 fois moindre.

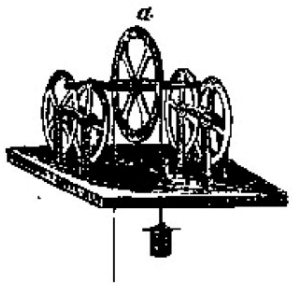


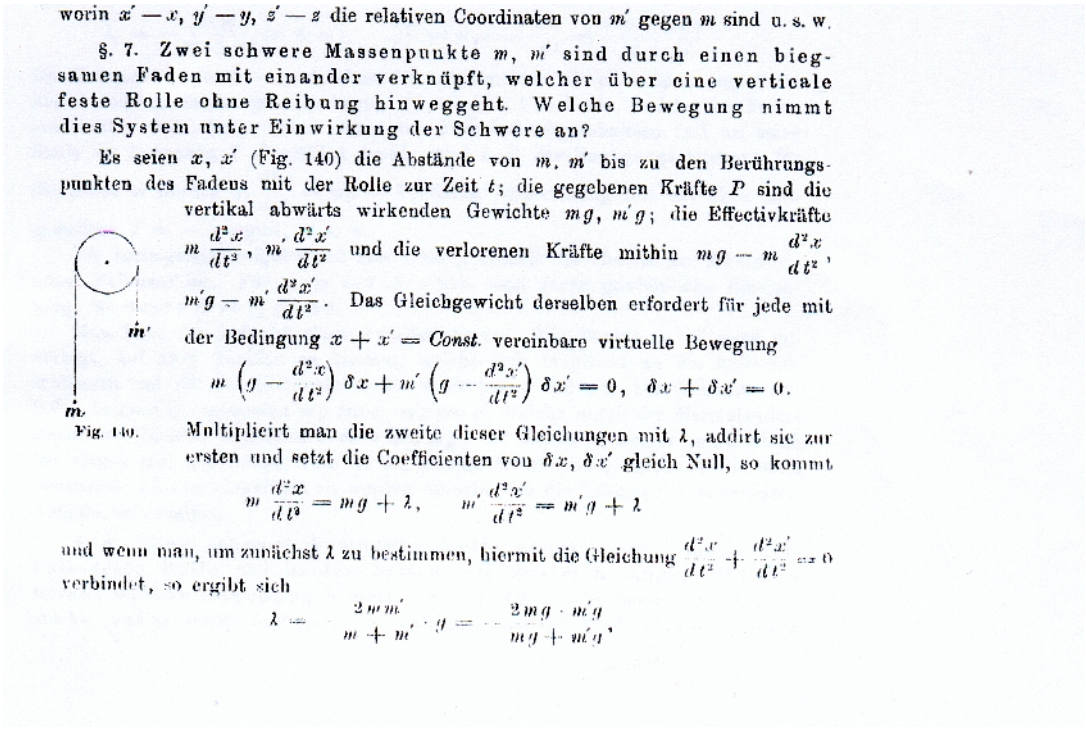
Fig. 51.

Cela peut se voir autrement : soit g la vitesse acquise, au bout d'une seconde, par le poids p tombant librement, et g' celle qui l'anime au bout du même temps quand il est lié au système des masses m, m'. Dans les deux cas, les quantités de mouvement doivent être les mêmes, comme servant de mesure à une même force, qui est le poids p. On a donc, en représentant par μ la masse du poids p, $g\mu = g'(\mu + 2m)$, d'où $g = g' \frac{\mu + 2m}{\mu}$. Si donc, on prouve que les vitesses et les espaces parcourus observés dans la machine d'Atwood satisfont aux formules $V = g't$, $e = \frac{1}{2}g't^2$, les lois exprimées par ces formules seront tout aussi vraies quand le corps tombera librement, puisqu'il suffit, pour passer de g' à g, de multiplier g' par une quantité constante.

Figure 14: Etude du mouvement dans le manuel qui date de 1865. On voit le premier usage du registre algébrique pour exprimer le taux de ralentissement du mouvement.

[4] Daguin P.A. (1865), *Cours de physique élémentaire*, E.Priva, Toulouse, Document électronique numérisé par BNF http://www.bnf.fr

III Résolution du problème de la machine d'Atwood en 1880 [5]



worin $x' - x$, $y' - y$, $z' - z$ die relativen Coordinaten von m' gegen m sind u. s. w.

§. 7. Zwei schwere Massenpunkte m, m' sind durch einen biegsamen Faden mit einander verknüpft, welcher über eine verticale feste Rolle ohne Reibung hinweggeht. Welche Bewegung nimmt dies System unter Einwirkung der Schwere an?

Es seien x, x' (Fig. 140) die Abstände von m, m' bis zu den Berührungspunkten des Fadens mit der Rolle zur Zeit t; die gegebenen Kräfte P sind die vertikal abwärts wirkenden Gewichte mg, $m'g$; die Effectivkräfte $m\frac{d^2x}{dt^2}$, $m'\frac{d^2x'}{dt^2}$ und die verlorenen Kräfte mithin $mg - m\frac{d^2x}{dt^2}$, $m'g - m'\frac{d^2x'}{dt^2}$. Das Gleichgewicht derselben erfordert für jede mit der Bedingung $x + x' = Const.$ vereinbare virtuelle Bewegung

$$m\left(g - \frac{d^2x}{dt^2}\right)\delta x + m'\left(g - \frac{d^2x'}{dt^2}\right)\delta x' = 0, \quad \delta x + \delta x' = 0.$$

Fig. 140.

Multiplicirt man die zweite dieser Gleichungen mit λ, addirt sie zur ersten und setzt die Coefficienten von δx, $\delta x'$ gleich Null, so kommt

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = mg + \lambda, \qquad m'\frac{d^2x'}{dt^2} = m'g + \lambda$$

und wenn man, um zunächst λ zu bestimmen, hiermit die Gleichung $\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{d^2x'}{dt^2} = 0$ verbindet, so ergibt sich

$$\lambda = \frac{2mm'}{m + m'} \cdot g = \frac{2mg \cdot m'g}{mg + m'g},$$

Figure 15: Résolution du problème de la machine d'Atwood dans le manuel de 1880

[5] Schell, Wilhelm (1880), Theorie der Bewegung und der Kräfte ein lehrbuch der theoretischen Mechanik, G. Teubner, Leipzig, Allemangne, Document électronique numérisé par BNF http://www.bnf.fr

d. h. $-\lambda$ ist das harmonische Mittel der Gewichte mg, $m'g$. Hiermit werden die Bewegungsgleichungen der beiden Massen

$$\frac{d^2x}{dt^2} = G, \qquad \frac{d^2x'}{dt^2} = -G, \qquad \text{wo } G = \frac{m - m'}{m + m'} g.$$

Sind daher m und m' gleich, so ist $G = 0$ und die Bewegung beider Massen gleichförmig; ist G nicht Null, so ist sie gleichförmig veränderlich. Für die Geschwindigkeiten ergibt sich

$$v = \frac{dx}{dt} = Gt + \alpha, \qquad v' = \frac{dx'}{dt} = -Gt + \alpha'$$

und da $\frac{dx}{dt} + \frac{dx'}{dt} = 0$ ist, so sind die Anfangsgeschwindigkeiten α und α' vermöge $\alpha + \alpha' = 0$ einander entgegengesetzt gleich. Für die Abstände x, x' hat man

$$x = \tfrac{1}{2} Gt^2 + \alpha t + \beta, \qquad x' = -\tfrac{1}{2} Gt^2 - \alpha t + \beta',$$

wo $\beta + \beta' = Const.$, nämlich gleich der Länge des Fadens weniger des Stücks, welches auf der Rolle aufliegt.

Sind nicht die Anfangsgeschwindigkeiten α, α' sondern anfängliche momentane Stosskräfte $m\omega$, $m'\omega'$ gegeben, welche in der Richtung des Fadens wirken, so liefert das D'Alembert'sche Princip für sie:

$$m\left(\omega - \frac{dx}{dt}\right)\delta x + m'\left(\omega' - \frac{dx'}{dt}\right)\delta x' = 0, \qquad \delta x + \delta x' = 0, \qquad \text{für } t = 0,$$

$$m\frac{dx}{dt} = m\omega + \lambda_1, \qquad m'\frac{dx'}{dt} = m'\omega' + \lambda_1, \qquad \text{für } t = 0,$$

also

$$\lambda_1 = -\frac{mm'}{m + m'}(\omega + \omega'), \qquad \frac{dx}{dt} = \alpha = -\frac{dx'}{dt} = \frac{m\omega - m'\omega'}{m + m'}.$$

Die Grössen $-\lambda$ und $-\lambda_1$ drücken die continuirlich wirkende Spannung T zur Zeit t und die momentane Spannung T_1 zur Zeit $t = 0$ aus, welche der Faden auszuhalten hat. Denn indem man den Faden durchgeschnitten und an seine Stelle die Spannung T eingeführt denkt, wird z. B. die Bewegungsgleichung für die Masse m werden $m\frac{d^2x}{dt^2} = mg - T$, deren Vergleichung mit der oben aufgestellten $T = -\lambda$ ergibt, u. s. w.

Die vorliegende Aufgabe und ihre Lösung enthält die Theorie der Atwood'schen Fallmaschine. Für $m : m' = 7 : 8$ erhält man deren gewöhnliche Einrichtung, für welche $G = \frac{1}{15} g$ wird.

Man kann die Aufgabe etwas verallgemeinern. Die Punkte m, m' seien genöthigt, auf zwei Geraden zu bleiben, welche sich tangirend an die Rolle anschliessen und mit der Horizontalen die Winkel α, α' bilden. Die Gewichte zerfallen in zwei Componenten $mg\cos\alpha$, $m'g\cos\alpha'$, welche durch die Normalwiderstände der Geraden vernichtet werden und $mg\sin\alpha$, $m'g\sin\alpha'$, welche an die Stelle der obigen mg, $m'g$ treten. Dies ist die einzige Modification, welche in die oben behandelte Lösung eingeführt zu werden braucht, um die Lösung der erweiterten Aufgabe zu erhalten.

Figure 16: Suite de la résolution du problème de la machine d'Atwood dans le manuel de 1880

Annexe B2

Divers extraits pour la résolution du problème de la machine d'Atwood par les enseignants « actuels »

Annexe B2

IExemple tiré du site « Hyperphysics »....26
IIExemple tiré du site de l'encyclopédie libre « Wikipedia »....27
IIIExemple tiré d'un article scientifique* 28
IVBilan de forces pour le dispositif de la machine d'Atwood....29
IV.1Exemple de bilan de forces pour la machine d'Atwood -Manuel turc 29
IV.2Exemple tiré du manuel de la mécanique du point matériel* 29
IV.3Exemple tiré d'un mécanique du point matériel* 29
VEnoncé du problème de la machine d'Atwood sur le site UEL....30

Index des figures

figure 1: Résolution du problème « machine d'Atwood sur le site du département de physique de Georgia State University aux Etats-Unis : http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atwd.html... 26
Figure 2: Résolution du problème de la machine d'Atwood tiré du site http://en.wikipedia.org 27
Figure 3: Résolution du problème de la machine d'Atwood tirée d'un article de VanLehn* sur la construction d'un EIAH (Environnement Informatique d'Apprentisage Humain) visant à aider les étudiants pour la résolution de problèmes de dynamique du point matériel. 28
Figure 4:Exemple de bilan de forces pour le problèmes de la machine d'Atwood dans un manuel turc. 29
Figure 5:Exemple de bilan de forces pour le problèmes : Deux forces de tension et justification donnée pour l'égalité des forces de tension. 29
Figure 6: Bilan de forces effectué pour la résolution d'un problème « poulie-corde » : Deux forces de tension (,) et justification donnée pour l'égalité en norme des forces de tension. 30
Figure 7:Enoncé du problème « machine d'Atwood » sur le site de l'UEL. : http://www.uelpcsm.education.fr/reference/physique/meca/index.htm 30

I Exemple tiré du site « *Hyperphysics* »

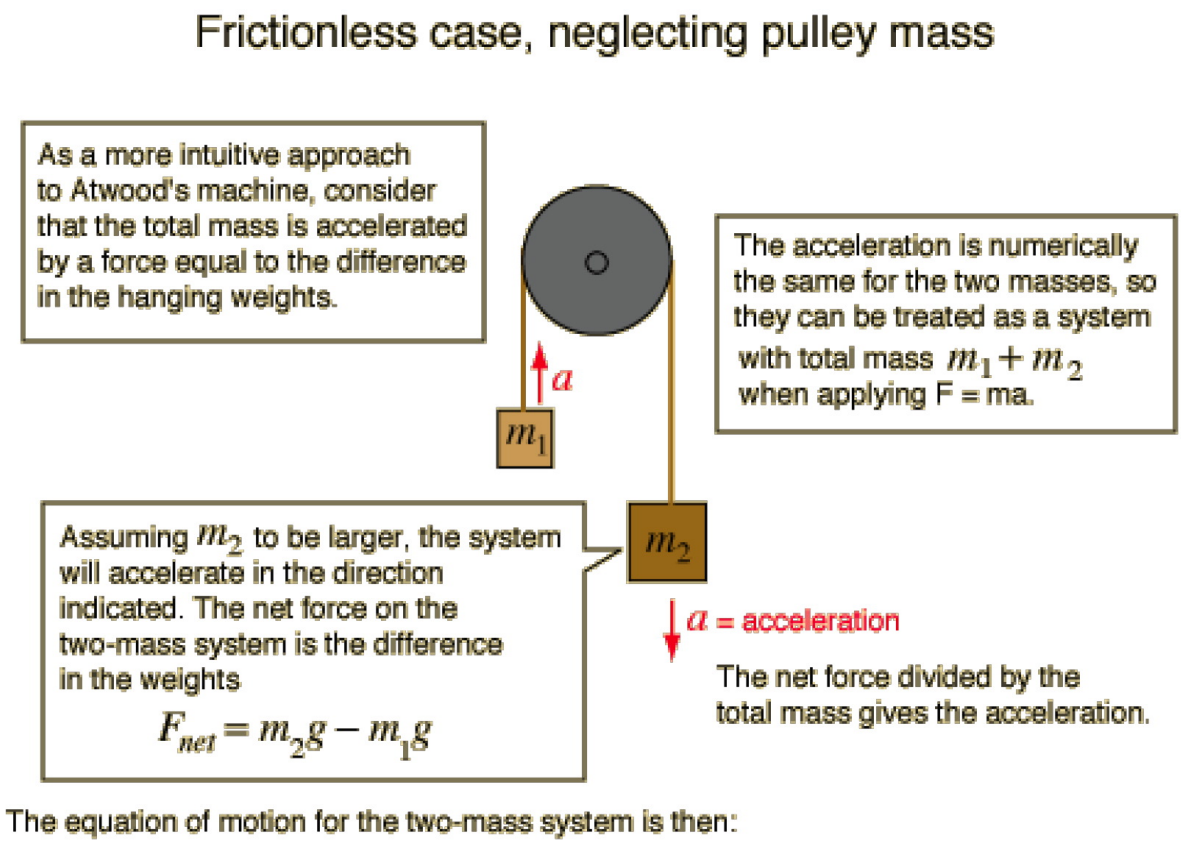


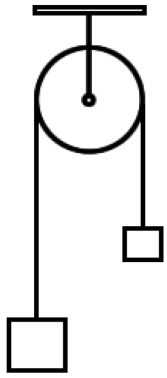
figure 1: Résolution du problème « machine d'Atwood sur le site du département de physique de Georgia State University aux Etats-Unis : http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atwd.html

II Exemple tiré du site de l'encyclopédie libre « *Wikipedia* »

Atwood machine

From Wikipedia, the free encyclopedia.

The **Atwood machine** (or **Atwood's machine**) was invented in 1784 by Rev. George Atwood as a laboratory experiment to verify the mechanical laws of uniformly accelerated motion. Atwood's machine is a common classroom demonstration used to illustrate principles of physics, specifically mechanics



The Atwood Machine consists of two masses, m_1 and m_2, connected by an inelastic massless string over an ideal massless pulley.

When $m_1 = m_2$, the machine is in stable equilibrium regardless of the position of the weights.

When $m_2 > m_1$ both masses experience uniform acceleration.

Equation for Uniform Acceleration

We are able to derive an equation for the accelration by using force analysis. Because we are using a massless, inelastic string and an ideal massless pulley the only forces we have to consider are: Tension force (T), and the Weight of the two masses (mg). To find $\sum F$ we need to consider the forces affecting each individual mass.

forces affecting $m_1 = T - m_1 g$

forces affecting $m_2 = m_2 g - T$

$$\sum F = (m_2 g - T) + (T - m_1 g) = g(m_2 - m_1)$$

Using Newton's Second Law of Motion we can derive an equation for the system's acceleration.

$$\sum F = ma$$

$$a = \frac{\sum F}{m}$$

$$\sum F = g(m_2 - m_1)$$

$m = (m_1 + m_2)$

$$a = g\frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2}$$

[note: Inversley, acceleration due to gravity (g) can be derived by timing the movement of the weights and calculating a value for the uniform acceleration (a).]

Figure

2: Résolution du problème de la machine d'Atwood tiré du site http://en.wikipedia.org

III Exemple tiré d'un article scientifique*

Problem:

Consider two unequal masses connected by a string that runs over a massless and frictionless pulley, as shown in figure A. Let m2 be greater than m1. Find the tension in the string and the acceleration of the masses.

Solution:

If the acceleration of m1 is a, the acceleration of m2 must be -a. The forces acting on m1 and m2 are shown in figure B.

The equation of motion for m1 is

$$T - m1*g = m1*a.$$

The equation of motion for m2 is

$$T - m2*g = - m2*a.$$

Combining, we obtain

$$a = \frac{m2 - m1}{m2 + m1} g$$

and

$$T = \frac{2*m1*m2}{m1 + m2} g$$

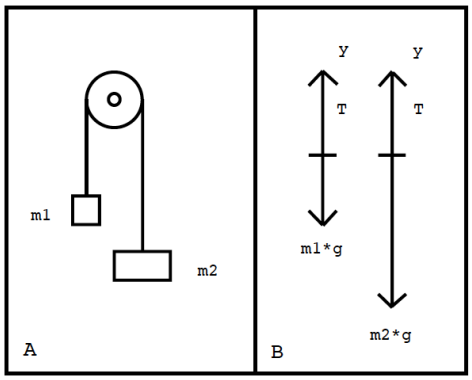


Fig. 1. A traditional physics example

Figure 3: Résolution du problème de la machine d'Atwood tirée d'un article de VanLehn sur la construction d'un EIAH (Environnement Informatique d'Apprentisage Humain) visant à aider les étudiants pour la résolution de problèmes de dynamique du point matériel.*

*VanLehn K.(1996), Conceptual and meta learning during coached problem solving In Frasson, C.,Gauthier, G., and Lesgold, A., Proceedings of the 3rd International Conference on IntelligentTutoring Systems ITS '96., Berlin

IV Bilan de forces pour le dispositif de la machine d'Atwood

IV.1 Exemple de bilan de forces pour la machine d'Atwood -Manuel turc

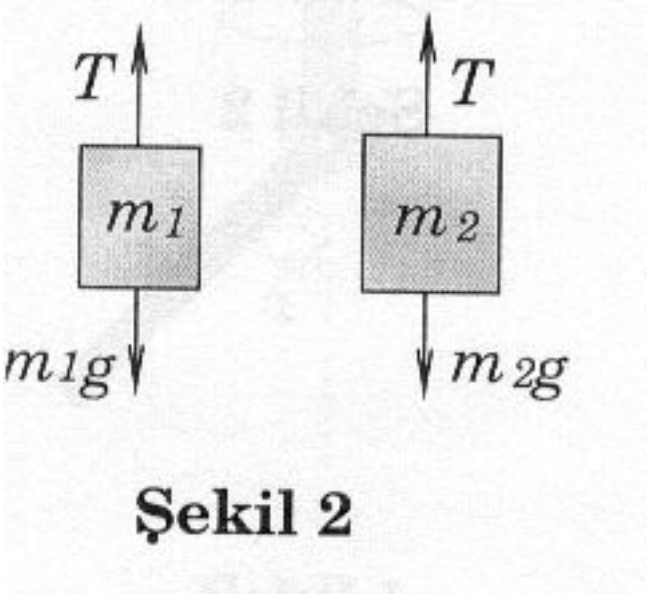


Figure 4:Exemple de bilan de forces pour le problèmes de la machine d'Atwood dans un manuel turc.

Une seule force de tension $\vec{T}$ et aucune justification de l'égalité de forces de tension qui s'exercent à la masse m_1 et m_2.

*IV.2 Exemple tiré du manuel de la mécanique du point matériel**

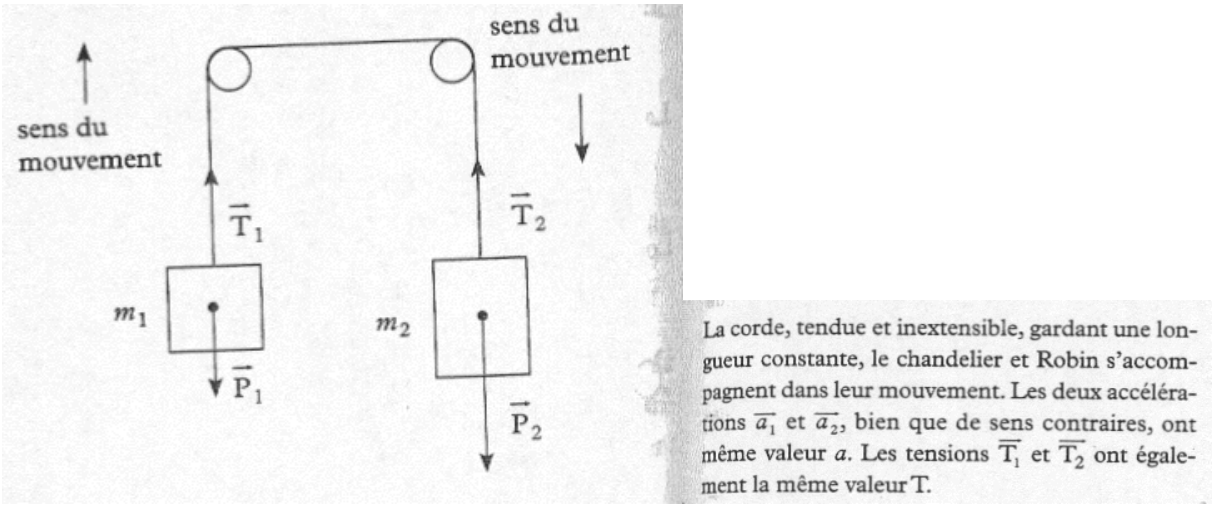


Figure 5:Exemple de bilan de forces pour le problèmes : Deux forces de tension et justification donnée pour l'égalité des forces de tension.

*De La Souchère M-C.(2005), *Un pas vers la sup en physique, De la terminale à la prépa : Cours, méthodes, exercices*, Bréal, Rosny, ISBN : 2 7495 0527 5

*IV.3 Exemple tiré d'un mécanique du point matériel**

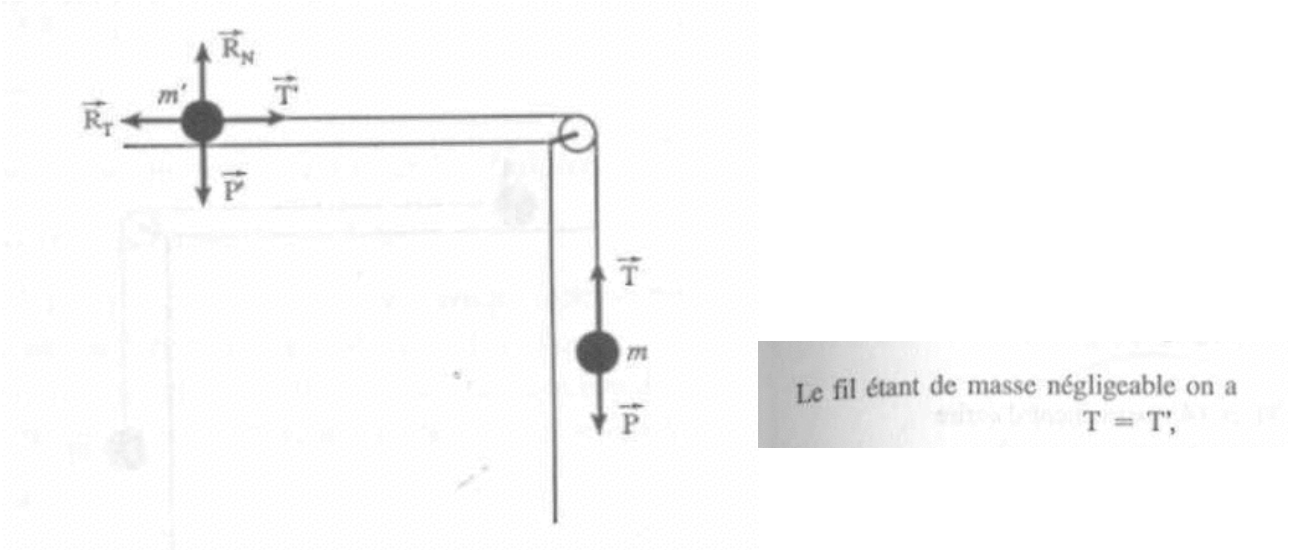


Figure 6: Bilan de forces effectué pour la résolution d'un problème « poulie-corde » : Deux forces de tension ($\vec{T}$, $\vec{T}'$) et justification donnée pour l'égalité en norme des forces de tension.

*Chen P.(1997), *Mécanique galiléen d'un corps ponctuel*, Librairie Vuibert, Paris, ISBN : 2 7117 2460 3

V Enoncé du problème de la machine d'Atwood sur le site UEL

Le dispositif connu sous le nom de machine d'Atwood est constitué comme le montre la figure, avec $m_2 > m_1$. La masse de la poulie et celle du fil sont négligeables, le fil est inextensible.

1/ Quelle est la distance parcourue par m2 à l'instant t après qu'on l'ait lâchée.

2/ Quelle est la tension du fil ?

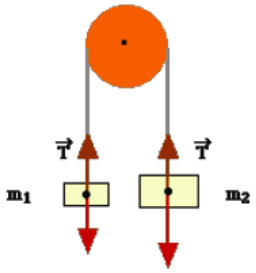


Figure 7:Enoncé du problème « machine d'Atwood » sur le site de l'UEL. : http://www.uelpcsm.education.fr/reference/physique/meca/index.htm

Le bilan de forces est fait sur le dessin dans l'énoncé du problème. L'enseignant définit une seule force de tension (T) mais lors de la résolution du problème il définit deux forces de tension (T1 et T2) et il établit la relation entre deux forces de tension (voir la résolution R4 au chapitre 4)

Annexe B3

Méthodes de résolution proposées par les enseignants et divers extraits de la résolution de problèmes de la dynamique du point matériel

Annexe B3

I« Indices » dans l'énoncé des problèmes....3
I.1Rappel des tâches à accomplir lors de la résolution....3
I.2Renvoi au cours théorique....4
I.3Indice pour la résolution du problème de la machine d'Atwood -Site UEL....5
IIMéthodes de résolution dans les manuels....6
II.1Manuel PUF 2000....6
II.2Manuel Bréal 2005....7
IIIMéthode de résolution créée par l'enseignant du TD....8
III.1 MR-UJF (forme ancienne)....8
III.2Autres méthodes de résolutions créées par l'enseignant....9
IVRésolution de problèmes dans le manuel Bréal 2003....11
VCorrigé du TD 1 à l'UJF....14
VIDiverses résolutions dans les autres manuels – Résolutions commencent souvent par un dessin 19

Index des figures

Figure 1: Enoncé de l'exercice 11 dans la feuille du TD -Dynamique du point matériel. L'enseignant propose des « indications » pour la résolution du problème. 4

Figure 2: Enoncé du 2e problème à la feuille du TD -Dynamique du point matériel. 4

Figure 3: Indices donnés les problèmes dans le manuel Bréal-2003. 5

Figure 4: L'énoncé du problème 19 dans la feuille du TD -Dynamique du point matériel.... 5

figure 5: Enoncé du problème de la machine d'Atwood sur le site UEL quand le bouton "coupe pouce" n'est pas cliqué.... 6

figure 6: Enoncé du problème de la machine d'Atwood sur le site UEL quand le bouton "coupe de pouce" est cliqué.... 6

Figure 7: Méthode de résolution -Manuel PUF 2000.... 7

Figure 8: Méthode de résolution proposée dans le manuel Bréal 2005 [1].... 8

Figure 9: Une autre méthode de résolution retrouvée dans la feuille du TD à l'UJF - Méthode de résolution pour les problèmes de quantité de mouvement.... 10

Figure 10: Méthode de résolution pour les problèmes de l'énergie - Méthode retrouvée dans la feuille du TD utilisée à l'UJF.... 11

Figure 11: Extrait de la résolution de l'exercice 2 -Manuel Bréal 2003.... 12

Figure 12: Extrait de la résolution de l'exercice 3 -Manuel Bréal 2003 13

Figure 13: Extrait de la résolution de l'exercice 5 -Manuel Bréal 2003.... 14

Figure 14: Extrait de la résolution du problème 2 -Corrigé du TD -Dynamique du point matériel.. 15

Figure 15: Extrait de la résolution du problème 9 -Corrigé du TD -Dynamique du point matériel.. 16

Figure 16: Extrait de la résolution du problème 10-Corrigé du TD -Dynamique du point matériel. 16

Figure 17: Extrait de la résolution du problème 11 -Corrigé du TD -Dynamique du point matériel 17

Figure 18: Extrait de la résolution du problème 15-Corrigé du TD -Dynamique du point matériel. 17

Figure 19: Extrait de la résolution du problème 1 -Corrigé du TD -Dynamique du point matériel.. 18

Figure 20: Extrait de la résolution du problème 2 -Corrigé du TD -Dynamique du point matériel.. 19

figure 21: Extrait de la résolution du problème du plan incliné dans un manuel de la mécanique du point matériel*. Après l'énoncé du problème, l'auteur accomplit les tâches de la définition du système, du choix de l'axe du repère et du bilan de forces à travers le dessin. 20

figure 22: Extrait de la résolution du problème du pendule simple dans le même manuel que celle dans la figure 21. L'auteur définit le système, le référentiel et fait le bilan de forces dans la première phrase. Et la tâche du choix de l'axe du repère est accomplie à travers le dessin. 21

figure 23: Extrait de la résolution du problème de la machine d'Atwood dans un manuel de Terminal*. Le dessin se trouve est tout au début de la résolution. L'auteur accomplit les tâches de la définition du système, du bilan de forces sur le dessin. 22

I « Indices » dans l'énoncé des problèmes

I.1 Rappel des tâches à accomplir lors de la résolution

11***-*Exercice de tronc commun*
Une automobile de masse 1 tonne aborde un virage circulaire de rayon 50m, à la vitesse de 144km/h. *On rappelle que le vecteur accélération dans le cas d'un mouvement circulaire* ***uniforme*** *de vitesse de norme v, a pour norme* v^2/R*, où R est le rayon du cercle, et qu'il est dirigé vers le centre du cercle (voir ultérieurement les cours et TD de cinématique).*La route étant entièrement gelée, de quel angle devrait être relevé le virage pour que la voiture ne dérape pas?
Indications **:**
0- Définir le référentiel, le système.
1- Commencer par une description précise du mouvement de la voiture lorsqu'elle ne dérape pas : préciser la forme de la trajectoire, l'orientation de la trajectoire dans l'espace (dans quel plan?), le rythme du mouvement (uniforme, accéléré, etc…). Choisir ensuite un repère et un système de coordonnées bien adaptés pour décrire cette trajectoire, faire un dessin, puis écrire le vecteur accélération dans ce repère.
2- Faire le bilan des forces extérieures appliquées à la voiture. Dans quel plan de l'espace sont elles situées? Est-ce le même plan que pour la trajectoire?
3- Ecrire la relation fondamentale de la dynamique? Quelle est la direction, le sens, de la résultante des forces? Dessiner ou redessiner les forces en respectant bien la contrainte décrite ci-dessus.
4- Si vous avez bien positionné les différents éléments, il ne vous reste qu'à effectuer les projections et conclure.

Figure 1: Enoncé de l'exercice 11 dans la feuille du TD -Dynamique du point matériel. L'enseignant propose des « indications » pour la résolution du problème.

Les indications sont des tâches à accomplir pour résoudre le problème. Les indications sont aussi des tâches proposées dans la méthode de résolution MR-UJF :

- le conseil 0 est les tâches 1 et 2 de la technique de l'utilisation du PFD (l'étape A de la méthode MR-UJF)
- le conseil 1 est les tâches 3 et 4 de la technique de l'utilisation du PFD (l'étape B et l'étape C de la méthode MR-UJF)
- le conseil 2 est la tâche 5 de la technique de l'utilisation du PFD (les étapes D, E, F de la méthode MR-UJF)
- le conseil 3 est la tâche 6 de la technique de l'utilisation du PFD
- le conseil 4 correspond à la tâche 8 de la technique de l'utilisation du PFD (l'étape J de la méthode MR-UJF).

2**-*Exercice de tronc commun*
Le système mécanique représenté sur la figure est en équilibre. Les masses des poulies et des cordes sont considérées négligeables, ainsi que les frottements. Calculer les angles α et β, entre la verticale et les cordes qui soutiennent le corps du milieu.
Conseil : commencer par préciser le ou les systèmes pris en compte, et par dessiner les forces extérieures qui s'exercent sur chaque système.

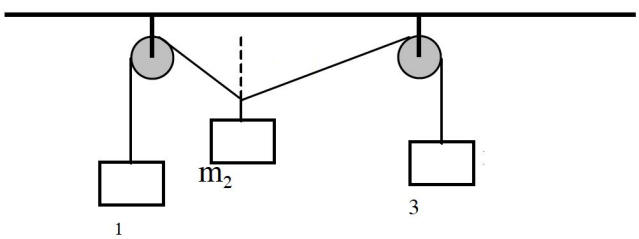
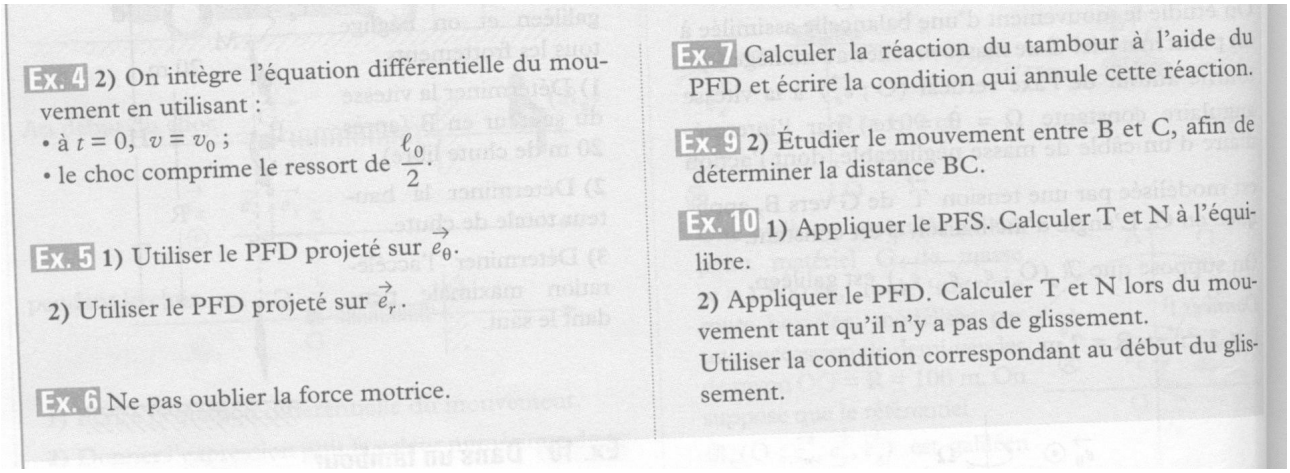


Figure 2: Enoncé du 2e problème à la feuille du TD -Dynamique du point matériel.

L'enseignant donne des conseils pour la résolution du problème :

- le premier conseil est la tâche 2 de la technique de l'utilisation du PFD
- le deuxième conseil est la tâche 5 de la technique de l'utilisation du PFD.



Ex. 4 2) On intègre l'équation différentielle du mouvement en utilisant :
• à $t = 0$, $v = v_0$;
• le choc comprime le ressort de $\frac{\ell_0}{2}$.

Ex. 5 1) Utiliser le PFD projeté sur $\vec{e}_\theta$.

2) Utiliser le PFD projeté sur $\vec{e}_r$.

Ex. 6 Ne pas oublier la force motrice.

Ex. 7 Calculer la réaction du tambour à l'aide du PFD et écrire la condition qui annule cette réaction.

Ex. 9 2) Étudier le mouvement entre B et C, afin de déterminer la distance BC.

Ex. 10 1) Appliquer le PFS. Calculer T et N à l'équilibre.

2) Appliquer le PFD. Calculer T et N lors du mouvement tant qu'il n'y a pas de glissement.
Utiliser la condition correspondant au début du glissement.

Figure 3: Indices donnés les problèmes dans le manuel Bréal-2003.

Dans le manuel de Bréal, on propose des indices pour certains problèmes. Les indices sont donnés sous le nom « indication ». Ils se trouvent après la partie « Exercices » et avant la partie «Solution des exercices ».

I.2 Renvoi au cours théorique

19* Banana James (de masse m) fuit le temple maudit à bord d'une plateforme mobile ultra-légère (de masse M) qui se dirige vers un précipice à la vitesse constante $\vec{v}_0$. Le traître ayant pris soin de bien huiler les axes des roues, les frottements sont négligeables. Banana se dit qu'en courant sur la plateforme, il devrait pouvoir faire varier la vitesse de la plateforme, et ainsi limiter les risques de se rompre le cou en sautant.

a) Pourquoi peut-il en courant modifier la vitesse de la plateforme? Dans quel sens doit il courir pour ralentir la plateforme?

b) Banana court dans le sens choisi avec une vitesse constante par rapport à la plateforme. Calculer l'expression vectorielle de la nouvelle vitesse de la plateforme par rapport au sol. Banana peut-il espérer arrêter la plateforme?

c) En fin de course, Banana saute de la plateforme. Exprimer vectoriellement sa vitesse par rapport au sol. Calculer la norme de sa vitesse.

d) Conclusion : que doit faire Banana pour arriver au sol avec une vitesse minimale : sauter sans courir, ou bien en courant dans le sens où la plateforme est ralentie, ou bien en courant en sens inverse?

Indication : à partir de la question b), il est nécessaire de faire appel à des changements de référentiel très simples (cf cours de cinématique).

Figure 4: L'énoncé du problème 19 dans la feuille du TD -Dynamique du point matériel.

L'enseignant renvoie l'étudiant au cours théorique sur la cinématique pour la résolution du problème.

I.3 Indice pour la résolution du problème de la machine d'Atwood -Site UEL

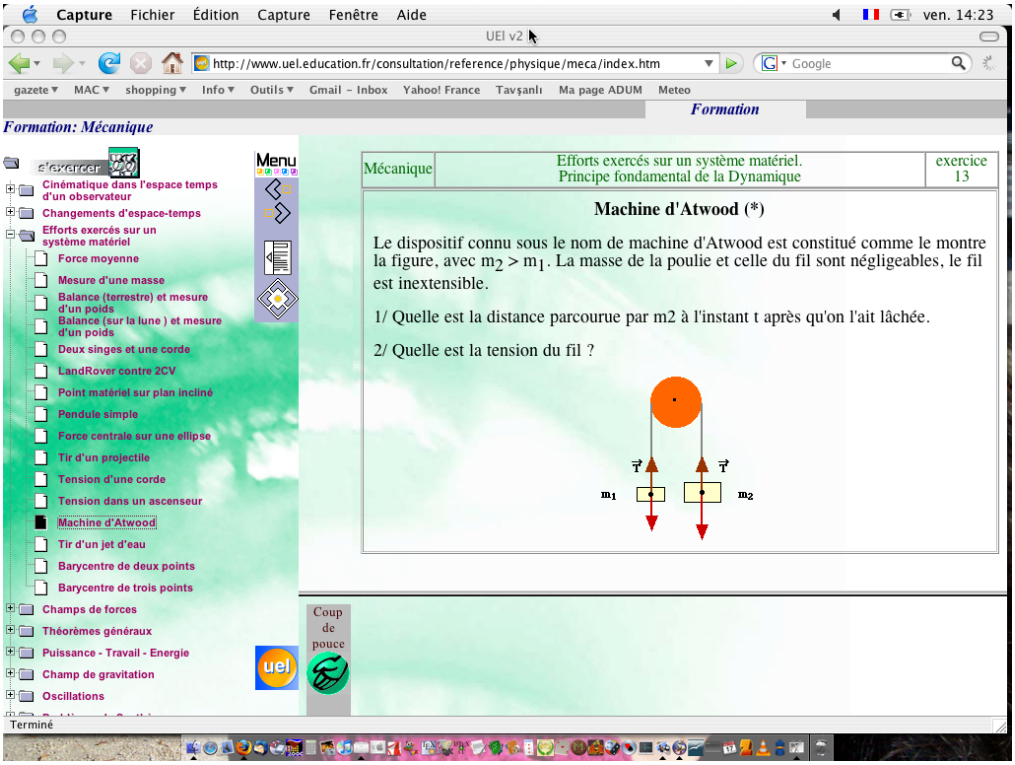


figure 5: Enoncé du problème de la machine d'Atwood sur le site UEL quand le bouton "coupe pouce" n'est pas cliqué

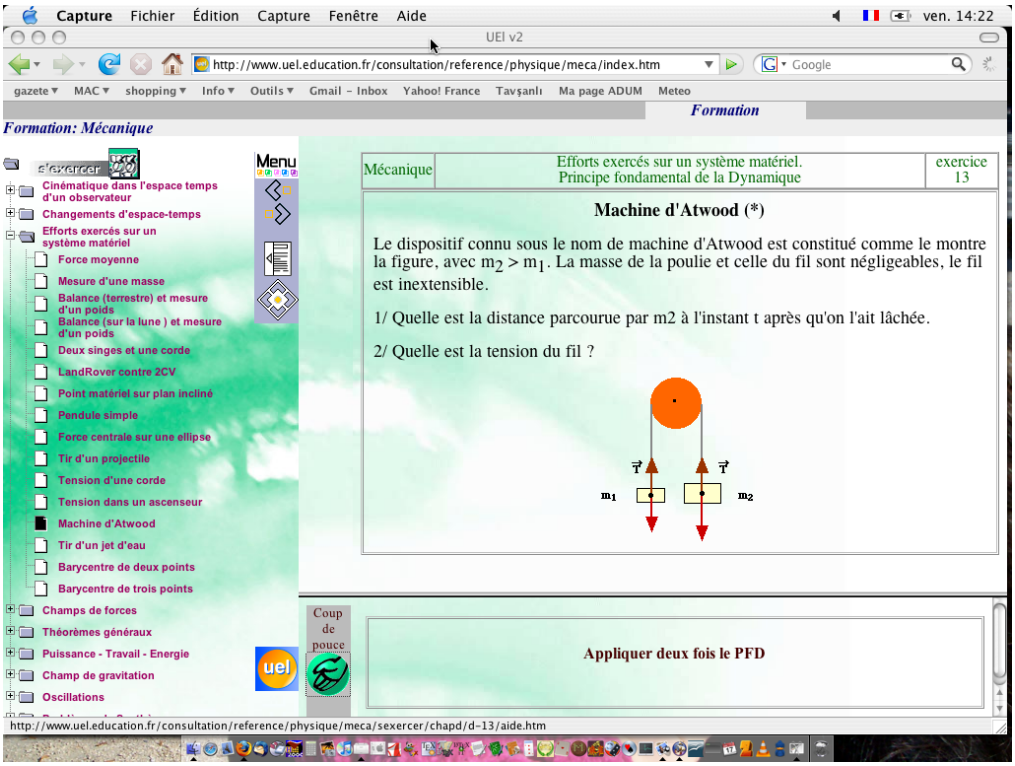


figure 6: Enoncé du problème de la machine d'Atwood sur le site UEL quand le bouton "coupe de pouce" est cliqué.

II Méthodes de résolution dans les manuels

II.1 Manuel PUF 2000

4. Comment résoudre un problème de mécanique du point ?

Le mouvement d'un point sera déterminé dans un référentiel galiléen pour commencer, car c'est dans un tel référentiel que le principe fondamental est applicable. Le mouvement dans un référentiel quelconque sera être déduit des lois de la cinématique.

Il faut choisir des variables indépendantes pour décrire la position du point à étudier dans l'espace. Elles sont au nombre de trois lorsque le point peut évoluer dans l'espace, de deux si le mouvement s'effectue sur une surface, et une seule suffit pour un déplacement le long d'une courbe, il s'agit du nombre de degré de liberté du système. Pour connaître la position du point à chaque instant, il faut déterminer l'expression de ces variables en fonction du temps. Il s'agit d'établir les équations différentielles vérifiées par celles-ci, puis de les résoudre connaissant les conditions initiales. Précisons toutefois que les équations différentielles ne sont pas toujours intégrables, on ne peut alors effectuer rigoureusement qu'une étude partielle du système (une résolution numérique est toujours possible).

Les équations différentielles du mouvement sont obtenues en appliquant le principe fondamental ou le théorème du moment cinétique, qui lui est équivalent en mécanique du point. Après avoir recensé les différentes forces exercées sur le corps étudié, l'équation du mouvement peut être écrite sous forme vectorielle. Il s'agit ensuite de la projeter ; pour cela une base quelconque peut être utilisée, toutefois les plus adaptées au problème donneront les équations les plus simples. Après projection, il faut disposer d'autant d'équations scalaires que d'inconnues pour que la résolution soit possible, les équations supplémentaires permettent d'exprimer les forces jusque-là indéterminées : tension d'un fil, réaction normale d'un support... Remarquons que les équations différentielles sont du second ordre par rapport au temps ; pour les résoudre, il faut disposer de deux conditions initiales : les valeurs de position et de vitesse en général.

Un autre point intéressant est à noter. Dans certaines circonstances, la quantité de mouvement, le moment cinétique ou l'une de leurs composantes est conservée. Cette grandeur, constante dans le temps, peut être calculée à un instant quelconque, par exemple à l'aide de conditions initiales. On dispose alors d'une relation ne faisant intervenir qu'une dérivée première des variables par rapport au temps, ce qui revient à avoir intégré une fois le principe fondamental. De telles relations de conservation simplifient l'étude du système (il n'y a plus qu'à intégrer une fois par rapport au temps) ou permettent d'effectuer cette étude en partie si les équations du mouvement ne sont pas complètement intégrables.

Figure 7: Méthode de résolution -Manuel PUF 2000

II.2 Manuel Bréal 2005

Méthode 1

Comment trouver les équations paramétriques horaires à l'aide de la deuxième loi de Newton ?

La deuxième loi de Newton donne accès au vecteur accélération du centre d'inertie. En tenant compte des conditions initiales, on peut remonter jusqu'au vecteur position.

→ Savoir faire :

❶ Effectuer le bilan des forces et les représenter sur un schéma.
❷ Écrire l'expression vectorielle de la deuxième loi de Newton.
❸ Choisir une base de projection et l'indiquer sur le schéma.
❹ Projeter la relation vectorielle sur le (ou les) axe(s) utile(s) en faisant apparaître les coordonnées $\ddot{x}\,(\ddot{y}\,,\ddot{z})$ du vecteur accélération du centre d'inertie.
❺ Intégrer une première fois $\ddot{x}\,(\ddot{y}\,,\ddot{z})$ par rapport au temps de manière à obtenir $\dot{x}\,(\dot{y}\,,\dot{z})$ en tenant compte de la vitesse initiale.
❻ Intégrer une deuxième fois par rapport au temps de manière à obtenir $x(t)$ $(y(t)\,,z(t))$ compte tenu de la position initiale du centre d'inertie.

→ Application

Figure 8: Méthode de résolution proposée dans le manuel Bréal 2005 [1]

III Méthode de résolution créée par l'enseignant du TD

III.1 MR-UJF (forme ancienne)

Conseils :
- **Dessin obligatoire**.
- La mise en équation et la **résolution** doivent toujours être faites de façon **formelle**, c'est à dire en utilisant des symboles pour représenter les grandeurs physiques; l'application numérique n'intervient qu'en tout dernier lieu.
- Vérifier l'**homogénéité** des résultats.

- **Résoudre un problème de dynamique** en utilisant le Principe Fondamental de la Dynamique.
*Ce principe met en relation d'une part les forces exercées sur un système et d'autre part une grandeur caractérisant le mouvement de ce système (dérivée du vecteur quantité de mouvement ou vecteur accélération).
*Un problème de dynamique va mettre en scène un dispositif pour lequel on dispose d'informations concernant :
- le mouvement d'une partie ou d'une autre de ce dispositif,
- les forces qui interviennent.
Le problème va consister à trouver de nouvelles informations soit sur un mouvement, soit sur une force (ou les deux).
*On doit donc commencer par mettre de l'ordre et faire des bilans : qu'est-ce que l'on connaît, qu'est-ce que l'on ne connaît pas, qu'est-ce que l'on veut savoir en matière de forces, et en matière de mouvement (voir cours de cinématique).
*Quelle manière d'aborder le problème va nous permettre de mettre relation les grandeurs que l'on souhaite connaître avec celles que l'on connaît?

*Faire autant de dessins que nécessaire pour bien visualiser la situation.

*Exemple d'une stratégie souvent efficace :
a- Définir le référentiel, le(s) système(s) à étudier.
b- A quel type de mouvement a-t'on à faire? En conséquence choisir le repère et le système de coordonnées les plus appropriés.
c- Faire le bilan des informations dont on dispose concernant le mouvement du système, et les exprimer dans le système de coordonnées choisi.
d- Faire le bilan des forces extérieures appliquées au système, en précisant ce que l'on connaît pour chaque force.
e- Ecrire la relation fondamentale de la dynamique.
f- Projeter la relation fondamentale suivant trois axes judicieusement choisis (souvent il est commode de séparer les forces inconnues des forces connues).
g- Résoudre les équations différentielles du mouvement. Exprimer les coordonnées du système en fonction du temps et des données du problème (équations du mouvement).
h- Si vous n'avez utilisé qu'une (ou deux) des trois équations obtenues par projection de la relation fondamentale (f) pour trouver les équations du mouvement, vous allez pouvoir les utiliser avec le résultat obtenu en g) pour déterminer les caractéristiques des forces inconnues.

III.2 Autres méthodes de résolutions créées par l'enseignant

RÉSOUDRE UN PROBLÈME DE CONSERVATION DE LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT.

On examine une situation dans laquelle tous les éléments sont initialement en mouvement rectiligne uniforme ou au repos. On s'intéresse à l'un des éléments, S_1 , dont le mouvement est modifié à la suite d'un événement E, par l'action d'un second système S_2 (dont le mouvement est également modifié).
Bien entendu, la méthode qui suit n'est applicable que dans un référentiel galiléen (parce qu'on fait appel au Principe Fondamental de la Dynamique)

A- Définir le référentiel galiléen

B- Identifier E. Identifier S_2 et définir le système $S = \{S_1 , S_2\}$, tels que les forces extérieures exercées sur S_1 par S_2, pendant E, soient intérieures à S.

C- Ecrire les quantités de mouvement de S, S_1 et S_2 avant E, puis après E, en paramétrant la (ou les) variable(s) inconnue(s). *Cette partie cinématique, où l'on doit écrire des vecteurs vitesses, nécessite le choix d'un repère et d'un système de coordonnées (voir D- de "Résolution d'un problème de dynamique").*

D- Ecrire la composition des quantités de mouvement, c'est à dire :

- avant E : $p_{S,\text{avant E}}$ $p_{S_1,\text{avant E}}$ $p_{S_2,\text{avant E}}$
- après E : $p_{S,\text{après E}}$ $p_{S_1,\text{après E}}$ $p_{S_2,\text{après E}}$.

E- Ecrire le Principe Fondamental de la Dynamique dans R pour S, et en déduire que : $p_{S,\text{avant E}}$ $p_{S,\text{après E}}$.

F- Expliciter l'équation ci-dessus en tenant compte des informations posées en D-. Exploiter pour obtenir la (ou les) variable(s) inconnue(s) recherchée(s) ...

Figure 9: Une autre méthode de résolution retrouvée dans la feuille du TD à l'UJF - Méthode de résolution pour les problèmes de quantité de mouvement

RÉSOUDRE UN PROBLÈME DE DYNAMIQUE PAR L'ÉNERGIE.

Cas Général

A- Définir le système, le référentiel de travail.

B- Faire le bilan détaillé des forces extérieures appliquées au système. Les classer :
- forces qui ne travaillent pas (n'entrent pas en compte)
- forces qui travaillent conservatives F_c : calculer l'énergie potentielle associée (ou encore le travail des forces en fonction de la position du mobile)
- forces qui travaillent non-conservatives F_{nc} : connaît-on le trajet du mobile pour calculer leur travail? Ou bien a-t-on des informations sur l'énergie que leur travail a dissipé ou fourni?

Conclusion : Le système est-il conservatif ?

C- Ecrire l'énergie cinétique : pour cela il peut être nécessaire de détailler le vecteur vitesse dans un système de coordonnées judicieusement choisi.

D- Ecrire la conservation de l'énergie :
- Si le système est conservatif, la conservation de l'énergie mécanique s'écrit : $E_m = E_c + E_p = cte$
(calculer la constante E_m si l'on connaît la vitesse pour une position donnée M_0 : $E_m = E_c(M_0) + E_p(M_0) = E_0$)
- Si le système n'est pas conservatif, on écrit le bilan des échanges d'énergie : $E_{m\,AB} = U_{AB}$

U_{AB} est l'énergie gagnée ou dissipée par les forces non-conservatives, entre deux points A et B de la trajectoire du mobile. Soit U_{AB} est connue, soit on peut la calculer par le travail des forces non-conservatives F_{nc}.

Deux problèmes classiques pour un système conservatif.

(Dans le cas où la position du mobile peut être repérée par une seule coordonnée "c")

I- Retrouver l'équation différentielle du mouvement pour un système conservatif.

A- , **B-** , **C-** + dans le repère et le système de coordonnées adaptés, écrire le vecteur vitesse, puis le module de la vitesse, puis l'énergie cinétique en fonction de la coordonnée "c" .

D- Ecrire et justifier soigneusement que $E_m = cte$. En déduire que $\frac{dE_m}{dt} \quad 0$.

E- L'équation différentielle du mouvement s'obtient en effectuant la dérivation $\frac{dE_m}{dt} \quad 0$. Remarquer que la dérivée première de l'inconnue $\dot{c}$ est présente dans chacun des termes de l'équation obtenue. En simplifiant par $\dot{c}$, (justifier que l'on en a le droit) on obtient l'équation différentielle du mouvement.

II- Calculer la vitesse en fonction de la position du mobile.
Très pratique car on accède directement et par des calculs simples, à l'information vitesse en fonction de la position.

A- , **B-** , **C-** + écriture de $E_c(c)$ (voir le problème I ci-dessus)

D- Ecrire l'expression de E_m et en déduire $\|v(c)\|$.

C'est à dire écrire : $E_m = E_0 = {}^1/_2\, m\, v^2(c) + E_p(c)$, et on trouve : $\|\vec{v}(c)\| \quad \sqrt{\frac{2(E_0 \quad E_p(c))}{m}}$

Figure 10: Méthode de résolution pour les problèmes de l'énergie - Méthode retrouvée dans la feuille du TD utilisée à l'UJF

IV Résolution de problèmes dans le manuel Bréal 2003

Exercice 2

1) Pour trouver la force de freinage, on va appliquer le PFD.

Système étudié : la voiture de masse m assimilée au point matériel G.

Référentiel galiléen d'étude : $\mathcal{R}_g(O ; \vec{e_x}, \vec{e_y}, \vec{e_z})$.

Forces appliquées au système :

• poids $\vec{P} = -mg\vec{e_y}$;

• réaction du sol $\vec{N} = N\vec{e_y}$;

• la force de freinage $\vec{F} = -F\vec{e_x}$.

Le PFD donne : $m\vec{a}(G)|_{\mathcal{R}_g} = \vec{P} + \vec{N} + \vec{F}$.

Vecteur position : $\overrightarrow{OM} = x\vec{e_x}$; vecteur vitesse : $\vec{v}(M)|_{\mathcal{R}_g} = \dot{x}\vec{e_x}$; vecteur accélération : $\vec{a}(M)|_{\mathcal{R}_g} = \ddot{x}\vec{e_x}$.

L'équation vectorielle issue du PFD s'écrit donc :

$$m\ddot{x}\vec{e_x} = -mg\vec{e_y} + N\vec{e_y} - F\vec{e_x}.$$

• Comme on veut calculer F et que l'on ne connaît pas N, on va projeter cette relation sur $\vec{e_x}$:

$$\vec{e_x} \cdot [m\ddot{x}\vec{e_x}] = \vec{e_x} \cdot [-mg\vec{e_y} + N\vec{e_y} - F\vec{e_x}], \quad \text{d'où} \quad m\ddot{x} = 0 + 0 - F$$

$$\boldsymbol{m\ddot{x} = -F}.$$

Figure 11: Extrait de la résolution de l'exercice 2 -Manuel Bréal 2003

Exercice 3

1) On cherche à écrire l'équation différentielle du mouvement ; on va donc appliquer le PFD (voir méthode).

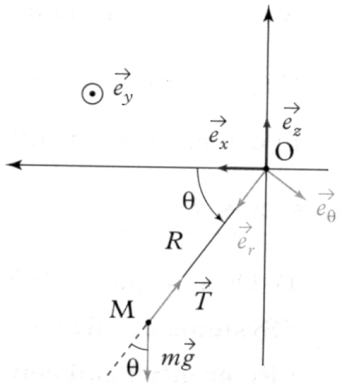
Système étudié : la balle M de masse m.

Référentiel galiléen d'étude : $\mathcal{R}_g(O ; \vec{e_x}, \vec{e_y}, \vec{e_z})$.

Forces appliquées au système :

• poids $\vec{P} = m\vec{g} = -mg\vec{e_z}$;

• tension du fil $\vec{T} = -T\vec{e_r}$.



Le PFD donne : $m\vec{a}(M)|_{\mathcal{R}_g} = \vec{P} + \vec{T}$.

Vecteur position : $\overrightarrow{OM} = R\vec{e_r}$; vecteur vitesse : $\vec{v}(M)|_{\mathcal{R}_g} = +R\dot{\theta}\vec{e_\theta}$.

R = cte et $\left(\frac{d\vec{e_r}}{dt}\right)_{/\mathcal{R}_g} = \dot{\theta}\vec{e_\theta}$.

Vecteur accélération : $\vec{a}(M)|_{\mathcal{R}_g} = -R\dot{\theta}^2\vec{e_r} + R\ddot{\theta}\vec{e_\theta}$.

L'équation vectorielle issue du PFD est : $m(-R\dot{\theta}^2\vec{e_r} + R\ddot{\theta}\vec{e_\theta}) = -mg\vec{e_z} - T\vec{e_r}$.

• Comme $\vec{T}$ est inconnue et que l'on cherche l'équation différentielle du mouvement, on a va projeter la relation vectorielle précédente sur $\vec{e_\theta}$:

$$\vec{e_\theta} \cdot [-mR\dot{\theta}^2\vec{e_r} + mR\ddot{\theta}\vec{e_\theta}] = \vec{e_\theta} \cdot [-mg\vec{e_z} - T\vec{e_r}], \text{ d'où } mR\ddot{\theta} = -mg(-\cos\theta) + 0$$

$$\ddot{\theta} = \frac{g}{R}\cos\theta.$$

Figure 12: Extrait de la résolution de l'exercice 3 -Manuel Bréal 2003

Exercice 5

1) On va appliquer le PFD pour trouver θ_0 en fonction de a_0.

Voir méthode.

• **Système étudié** : le réservoir d'eau assimilé à un point matériel M de masse m.

• **Référentiel galiléen d'étude** : $\mathcal{R}_g(O ; \vec{e_x}, \vec{e_y}, \vec{e_z})$.

• **Forces appliquées au système** :

– poids $\vec{P} = m\vec{g} = mg\vec{e_y}$;

– tension du mobile $\vec{T} = -T\vec{e_r}$.

• Le PFD donne : $m\vec{a}(M)|_{\mathcal{R}_g} = \vec{P} + \vec{T}$.

Vecteur position : $\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AM} = x\vec{e_x} + L\vec{e_r}$.

Vecteur vitesse : $\vec{v}(M)|_{\mathcal{R}_g} = \dot{x}\vec{e_x} + x\left(\frac{d\vec{e_x}}{dt}\right)_{/\mathcal{R}_g} + \dot{L}\vec{e_r} + L\left(\frac{d\vec{e_r}}{dt}\right)_{/\mathcal{R}_g} = \dot{x}\vec{e_x}$.

$\vec{e_x}$ est constant dans $\mathcal{R}_g$; L = cte donc $\dot{L} = 0$.

$\vec{e_r}$ est ici constant dans $\mathcal{R}_g$ car θ_0 = cte ($\theta_0 = 0$) ; en effet $\left(\frac{d\vec{e_r}}{dt}\right)_{/\mathcal{R}_g} = \dot{\theta}\vec{e_\theta} = \vec{0}$.

Vecteur accélération : $\vec{a}(M)|_{\mathcal{R}_g} = \ddot{x}\vec{e_x} = a_0\vec{e_x}$.

Le PFD s'écrit : $ma_0\vec{e_x} = mg\vec{e_y} - T\vec{e_r}$.

• On cherche une relation entre θ_0 et a_0. Il faut faire disparaître $\vec{T} = -T\vec{e_r}$ dans la projection.

On projette donc sur $\vec{e_\theta}$ (car $\vec{e_\theta} \perp \vec{e_r}$).

$\vec{e_\theta} \cdot (ma_0\vec{e_x}) = \vec{e_\theta} \cdot (mg\vec{e_y} - T\vec{e_r})$

$ma_0\cos(\vec{e_\theta}, \vec{e_x}) = mg\cos(\vec{e_\theta}, \vec{e_y}) - 0$.

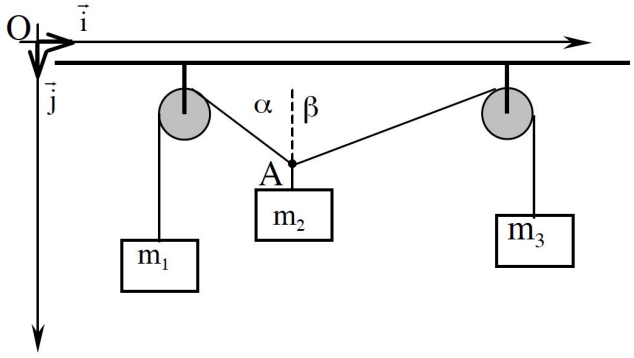
Figure 13: Extrait de la résolution de l'exercice 5 -Manuel Bréal 2003

V Corrigé du TD 1 à l'UJF

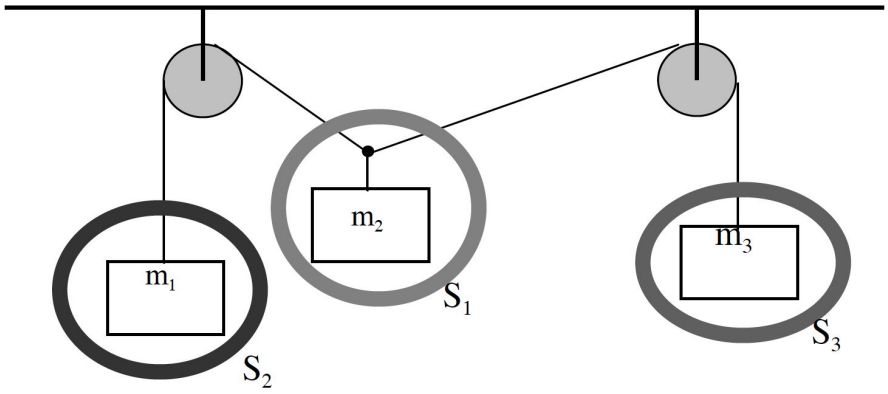
Référentiel : terrestre supposé galiléen (condition nécessaire pour utiliser le PFD et justifiée par le fait que le dispositif est petit et par la courte durée de l'observation - voir cours).

Repère : $R(O, \vec{i}, \vec{j})$. *Problème à 2 dimensions : 2 axes suffisent.*

Difficulté : choix de système. Il faut faire apparaître les angles α et β. Or les forces de tension de corde exercées au point A sont portées par les cordes ayant les directions voulues. $S_1 = \{m_2, A\}$ *est un système sur lequel elles s'appliquent.*



Systèmes utilisés :



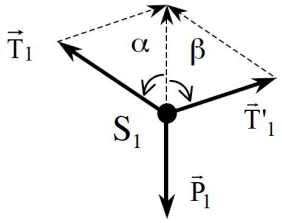
Système : S_1 = *{masse* m_2 *, point A}*

- Forces exercées sur S_1 *:*

$\vec{P}_1 = m_2\ g_0\ \vec{j}$

$\vec{T}_1 = \|\vec{T}_1\|\left(-\sin\alpha\ \vec{i} - \cos\alpha\ \vec{j}\right)$

$\vec{T'}_1 = \|\vec{T'}_1\|\left(\sin\beta\ \vec{i} - \cos\beta\ \vec{j}\right)$



- PFD : $\vec{P}_1 + \vec{T}_1 + \vec{T'}_1 = \vec{0}$

$m_2\ g_0\ \vec{j} + \|\vec{T}_1\|\left(-\sin\alpha\ \vec{i} - \cos\alpha\ \vec{j}\right) + \|\vec{T'}_1\|\left(\sin\beta\ \vec{i} - \cos\beta\ \vec{j}\right) = \vec{0}$

- Projections du PFD :

axe ox : $-\sin\alpha\|\vec{T}_1\| + \sin\beta\|\vec{T'}_1\| = 0$ *. Ce qui donne :* $\sin\alpha\|\vec{T}_1\| = \sin\beta\|\vec{T'}_1\|$ *(équation 1)*

axe oy : $m_2\ g_0 - \cos\alpha\|\vec{T}_1\| - \cos\beta\|\vec{T'}_1\| = 0$ *(équation 2)*

Figure 14: Extrait de la résolution du problème 2 -Corrigé du TD -Dynamique du point matériel

Référentiel : terrestre galiléen (voir exo2)
Repère : $R(O, \vec{i}, \vec{j})$
Système : le cube de masse m constante
Forces :

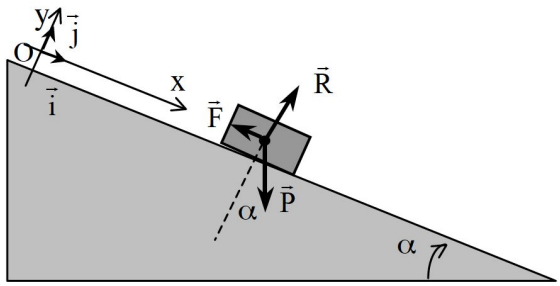
Poids $\vec{P} = m\, g_0 \left(\sin\alpha\, \vec{i} - \cos\alpha\, \vec{j}\right)$

Réaction normale du plan incliné $\vec{R} = \left\|\vec{R}\right\| \vec{j}$

Force de frottement :

cas statique $\vec{F} \leq - f_{stat} \left\|\vec{R}\right\| \vec{i}$

cas dynamique $\vec{F} = - f_{dyn} \left\|\vec{R}\right\| \vec{i}$



PFD : $\vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = m\,\vec{\gamma}$

(le cube ne décolle pas du plan incliné donc $\gamma_y = 0$, *et* $\vec{\gamma} = \gamma_x \vec{i} + \gamma_y \vec{j} = \gamma_x \vec{i}$ *)*

proj. PFD sur Ox :	$m\, g_0 \sin\alpha - \left\|\vec{F}_{stat}\right\| = 0$	*cas statique* $\alpha < \alpha_0$
	$m\, g_0 \sin\alpha - f_{stat} \left\|\vec{R}\right\| = 0$	*cas statique limite* $\alpha = \alpha_0$
	$m\, g_0 \sin\alpha - f_{dyn} \left\|\vec{R}\right\| = m\,\gamma_x$	*cas dynamique*
proj. PFD sur Oy :	$- m\, g_0 \cos\alpha + \left\|\vec{R}\right\| = m\,\gamma_y = 0$	*dans tous les cas*

Cette dernière équation permet de trouver $\left\|\vec{R}\right\| = m\, g_0 \cos\alpha$

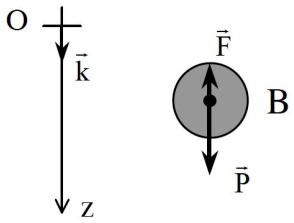
D'où :

- *cas statique limite* $\alpha = \alpha_0$: $f_{stat} = \dfrac{m\, g_0 \sin\alpha_0}{m\, g_0 \cos\alpha_0} = \mathrm{tg}\alpha_0$

$$\left\|\vec{F}_{stat\ max}\right\| = f_{stat} \left\|\vec{R}\right\| = m\, g_0 \sin(\alpha_0)$$

Figure 15: Extrait de la résolution du problème 9 -Corrigé du TD -Dynamique du point matériel

Référentiel : terrestre galiléen (cf exo2)
Système : bille B quelconque de masse m
Repère : $R(O, \vec{k})$



Forces :

Poids $\vec{P} = m\,\vec{g}_0 = m\, g_0\, \vec{k}$

Frottements avec l'air $\vec{F} = -\kappa\, \vec{v}$

où $\vec{v} = \left\|\vec{v}\right\| \vec{k}$ *est la vitesse de la bille, et* κ *le coefficient de frottement visqueux entre la bille et l'air.*

PFD : $\vec{P} + \vec{F} = m\,\vec{\gamma}_B$

Figure 16: Extrait de la résolution du problème 10-Corrigé du TD -Dynamique du point matériel

Référentiel : terrestre supposé galiléen (cf exo 2).
Système : l'automobile A - masse m = 1 t = 10^3kg

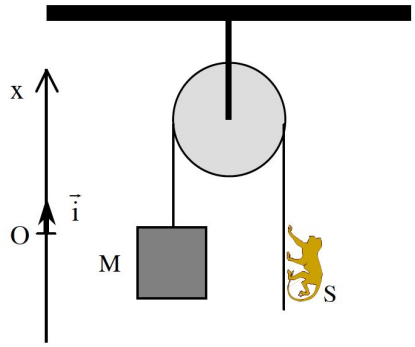
Mouvement : Si la voiture ne dérape pas, elle reste sur la route, et sa trajectoire à la forme du virage : son mouvement est circulaire horizontal, de rayon R = 50m , de centre O. De plus, le mouvement est uniforme de vitesse constante v_0 = 144km/h = 40m/s.
(Le virage étant relevé, la forme de la route est conique, d'où de fortes analogies avec le problème 11ter.)

Repères :
- Le repère R'(O',x',y',z') permet de formaliser le mouvement circulaire horizontal. Dans ce repère, On défini un axe O'h, muni d'un vecteur unitaire $\vec{u}_h$ qui tourne avec la voiture A.
- Ce repère n'est pas adéquat pour décrire les forces qui s'exercent sur la voiture A : le poids de la voiture et la réaction normale de le route sont dans le plan vertical. On défini donc un autre repère $R(O,\vec{i},\vec{j})$ qui rend compte du fait que la route est relevée.

y'

Figure 17: Extrait de la résolution du problème 11 -Corrigé du TD -Dynamique du point matériel

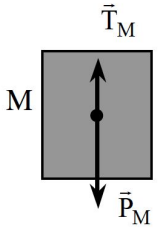
Référentiel : terrestre supposé galiléen
Repère : $R(O,\vec{i})$
Mouvements :
S : rectiligne, vertical
M : rectiligne, vertical



Si le singe ne grimpe pas, le système, initialement au repos, reste à l'équilibre.
Le singe en grimpant à la corde exerce une force supplémentaire sur la corde (par rapport à l'équilibre où il ne suspend que son poids) : la tension de corde devrait donc être plus importante lorsqu'il grimpe que lorsqu'il ne grimpe pas.
Comme lorsque le singe grimpe, la longueur de la corde diminue, on ne peut rien affirmer sur les mouvements du singe et du miroir, ni établir un lien a priori entre les deux mouvements comme on l'a fait pour la machine d'Atwood..
On notera donc : $\vec{\gamma}_S = \overline{\gamma}_S\,\vec{i}$ et $\vec{\gamma}_M = \overline{\gamma}_M\,\vec{i}$.

Remarque : $\overline{\gamma}_S$ est une "valeur algébrique", dont le signe, lorsque nous aurons trouvé l'expression de $\overline{\gamma}_S$, nous informera sur le sens du mouvement : positif, le singe monte; négatif, il descend. Idem pour M et $\overline{\gamma}_M$.

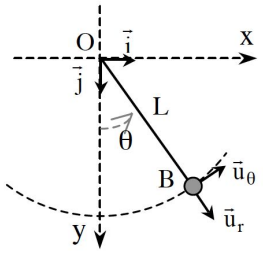
Système {Miroir}, masse m
Forces extérieures :
Poids $\vec{P}_M = -m\,g_0\,\vec{i}$
Tension de la corde $\vec{T}_M = \|\vec{T}_M\|\,\vec{i}$



RFD : $\vec{P}_M + \vec{T}_M = m\,\vec{\gamma}_M$
Projection sur Ox : $-m\,g_0 + \|\vec{T}_M\| = m\,\overline{\gamma}_M$ (1)
Remarque : Le PFD nous dit que la norme de la tension sera plus grande (faible) que le poids du miroir, si le miroir monte (descend).

Figure 18: Extrait de la résolution du problème 15-Corrigé du TD -Dynamique du point matériel

a- *Equation différentielle du mouvement.*
Référentiel : terrestre supposé galiléen.
Système : La boule B de masse m constante.
Repère : $R(O,\vec{i},\vec{j})$



Remarques sur le mouvement : tant que la corde est tendue, le mouvement de la boule est circulaire de rayon L (longueur de la corde) et de centre O (point d'attache du pendule) : il est donc commode de choisir un repère centré en O, et des coordonnées polaires. L'expérience montre que si l'on écarte le pendule d'un angle θ par rapport à la verticale, le pendule oscille autour de la verticale. Il est donc assez naturel et commode de choisir l'axe Ox vertical vers le bas; l'axe Oy sera donc choisi horizontal vers la droite pour garder le repère direct.

Mouvement du centre d'inertie de B :

$\overrightarrow{OB} = L\,\vec{u}_r$ *mouvement circulaire de centre O, rayon L*

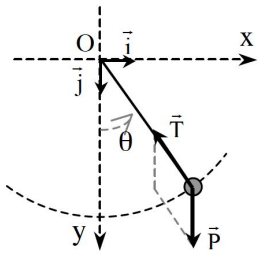
$$\vec{v}_B = \frac{d\overrightarrow{OB}}{dt} = L\frac{d\vec{u}_r}{dt} = L\frac{d\vec{u}_r}{d\theta}\frac{d\theta}{dt} = L\dot{\theta}\vec{u}_\theta$$

$$\vec{\gamma}_B = \frac{d\vec{v}_B}{dt} = L\frac{d\vec{u}_r}{dt} = L\frac{d\vec{u}_r}{d\theta}\frac{d\theta}{dt} = L\ddot{\theta}\vec{u}_\theta + L\dot{\theta}\frac{d\vec{u}_\theta}{dt} = L\ddot{\theta}\vec{u}_\theta + L\dot{\theta}\frac{d\vec{u}_\theta}{d\theta}\frac{d\theta}{dt} = L\ddot{\theta}\vec{u}_\theta - L\dot{\theta}^2\,\vec{u}_r$$

(Rappel : $\frac{d\vec{u}_r}{d\theta} = \vec{u}_\theta$ et $\frac{d\vec{u}_\theta}{d\theta} = -\vec{u}_r$ *)*

La seule inconnue du mouvement est θ (et ses dérivées temporelles).

Forces extérieures :



Forces à distance : Poids de la boule $\vec{P} = m g_0\,\vec{i} = m g_0(\cos\theta\,\vec{u}_r - \sin\theta\,\vec{u}_\theta)$

Forces de contact : Tension du fil $\vec{T} = -\|\vec{T}\|\vec{u}_r$

On néglige tout frottement

La seule inconnue du point de vue forces, est la norme de la tension $\|\vec{T}\|$.

PFD : dans un repère galiléen et pour un système de masse constante il s'écrit :

$\sum \vec{F}_{ext.\,au\,syst.} = m_{syst.}\,\vec{\gamma}_{syst.}$

Avec ce que nous avons écrit précédemment :

$\vec{P} + \vec{T} = m\vec{\gamma}_B$ *c'est à dire :* $m g_0(\cos\theta\,\vec{u}_r - \sin\theta\,\vec{u}_\theta) - \|\vec{T}\|\vec{u}_r = mL\ddot{\theta}\vec{u}_\theta - mL\dot{\theta}^2\,\vec{u}_r$

Projection // à $\vec{u}_r$ *:* $m g_0\cos\theta - \|\vec{T}\| = -mL\dot{\theta}^2$ *(1)*

Projection // à $\vec{u}_\theta$ *:* $-m g_0\sin\theta = mL\ddot{\theta}$ *(2)*

L'équation (2) ne dépend que de θ, c'est l'équation différentielle du mouvement : $\ddot{\theta} + \frac{g_0}{L}\sin\theta = 0$

Remarque

Cette équation différentielle générale n'a pas de solution analytique en termes d'équations du mouvement (expression des coordonnées en fonction du temps), c'est à dire que l'on ne sait pas la résoudre avec un crayon et un papier, sauf dans le cas de "l'approximation des petites oscillations". Hormis quelques cas particuliers, seuls des calculs approchés (effectués par ordinateur de nos jours) permettent de s'en sortir.

Figure 19: Extrait de la résolution du problème 1 -Corrigé du TD -Dynamique du point matériel

1-

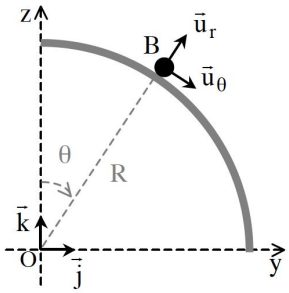
Référentiel : terrestre supposé galiléen

Système : bille B supposée ponctuelle, de masse m

Repère : $\mathcal{R}(O,\vec{i},\vec{j},\vec{k})$

Mouvement : circulaire *de rayon R et de centre O , dans le plan vertical yOz (tant que la bille reste en contact avec la butte).*

Système de coordonnées : coordonnées polaires B(R,θ) dans le plan zOy.

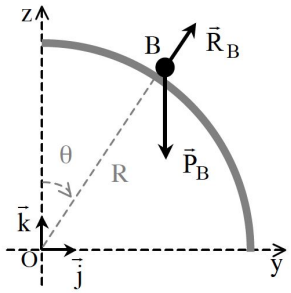


ATTENTION : $(\vec{k},\vec{j})$ *et* $(\vec{u}_r,\vec{u}_\theta)$ *ne sont pas directes. Cependant* $\frac{d\vec{u}_r}{d\theta}$ *est le vecteur unitaire obtenu par rotation de* $+\frac{\pi}{2}$ *dans le sens positif de θ. θ tournant dans le sens indirect, on a bien* $\frac{d\vec{u}_r}{d\theta}=\vec{u}_\theta$.

* $\overrightarrow{OB}=R\,\vec{u}_r$

* $\vec{v}_B=\frac{d\overrightarrow{OB}}{dt}=R\,\dot{\theta}\,\vec{u}_\theta$

* $\vec{\gamma}_B=\frac{d\vec{v}_B}{dt}=R\,\ddot{\theta}\,\vec{u}_\theta-R\,\dot{\theta}^2\,\vec{u}_r$ *(car* $\frac{d\vec{u}_\theta}{d\theta}=-\vec{u}_r$*)*



Forces :

* *à distance : poids de B* $\vec{P}_B=-m\,g_0\,\vec{k}=-m\,g_0\,(\cos\theta\,\vec{u}_r-\sin\theta\,\vec{u}_\theta)$

* *de contact : réaction normale de la butte* $\vec{R}_B=\|\vec{R}_B\|\,\vec{u}_r$

frottements avec la butte ou l'air : négligeables

PFD : $\vec{P}_B+\vec{R}_B=m\,\vec{\gamma}_B$

projection $//\vec{u}_r$ *:* $-m\,g_0\cos\theta+\|\vec{R}_B\|=-m\,R\,\dot{\theta}^2$

projection $//\vec{u}_\theta$ *:* $m\,g_0\sin\theta=m\,R\,\ddot{\theta}$

Equation différentielle du mouvement : $\ddot{\theta}-\frac{g_0}{R}\sin\theta=0$

Elle ressemble un peu à celle du pendule simple. Il n'est pas possible de la résoudre analytiquement. Ici cependant, il ne semble pas raisonnable de faire l'approximation des petites oscillations, car θ semble pouvoir devenir assez grand. Par contre on a vu comment calculer la vitesse en fonction de la position dans tous les cas.

"Equation différentielle de la vitesse" :

$v_B=R\,\dot{\theta}$

($v_B=\|\vec{v}_B\|$ *car* $\dot{\theta}\geq 0$ *: par expérience, la bille va vers le sol donc θ ne cesse d'augmenter)*

On peut donc écrire : $\frac{dv_B}{dt}=R\,\ddot{\theta}$ *d'où* $\frac{dv_B}{dt}-g_0\sin\theta=\frac{dv_B}{d\theta}\frac{d\theta}{dt}-g_0\sin\theta=0$

Or $\dot{\theta}=\frac{v_B}{R}$ *d'où* $v_B\frac{dv_B}{d\theta}-R\,g_0\sin\theta=0$.

Figure 20: Extrait de la résolution du problème 2 -Corrigé du TD -Dynamique du point matériel

VI Diverses résolutions dans les autres manuels – Résolutions commencent souvent par un dessin

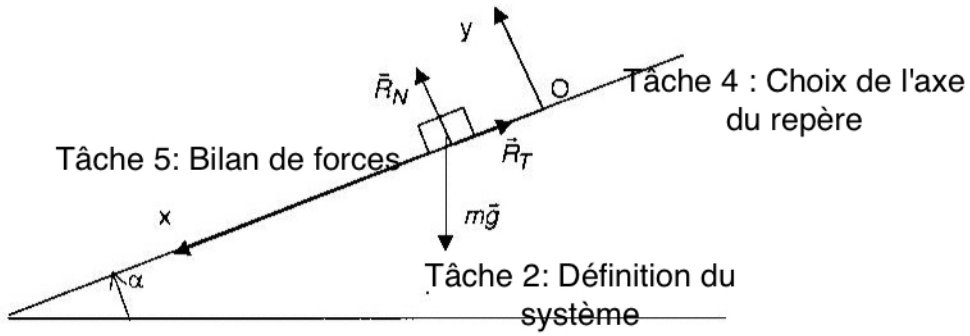
Exercice 6

Un petit cube est lancé vers le bas suivant la ligne de plus grande pente d'un plan incliné. On suppose qu'il y a une force de frottement solide avec un coefficient de frottement f. On rappelle qu'en cas de glissement les composantes tangentielle et normale de la réaction sont liées par la relation : $R_T = f.R_N$. On confond le coefficient de frottement statique et le coefficient de frottement de glissement.

L'angle du plan incliné avec l'horizontale vaut $\alpha = 15°$ et la vitesse initiale est égale à $V_0 = 3$ m/s.

Déterminer la distance parcourue par le cube à l'instant $t = 20$s après le départ.

Le champ de pesanteur sera considéré comme uniforme égal à $g = 9{,}8$ m/s^2.



L'application de la relation fondamentale de la dynamique au bloc dans le référentiel terrestre supposé galiléen donne : $m\frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{g} + \vec{R}$. Cette relation vectorielle est projetée sur les axes.

Sur Ox : $m\frac{d^2x}{dt^2} = m.g.\sin\alpha - R_T$

Sur Oy : $m\frac{d^2y}{dt^2} = -m.g.\cos\alpha + R_N = 0$

De plus tant qu'il y a glissement, on a la relation $R_T = f.R_N$.

Soit : $m\frac{d^2x}{dt^2} = m.g.\sin\alpha - f.m.g.\cos\alpha$

Par intégration $x(t) = \frac{1}{2}(g.\sin\alpha - f.g.\cos\alpha).t^2 + V_0.t$

figure 21: Extrait de la résolution du problème du plan incliné dans un manuel de la mécanique du point matériel. Après l'énoncé du problème, l'auteur accomplit les tâches de la définition du système, du choix de l'axe du repère et du bilan de forces à travers le dessin.*

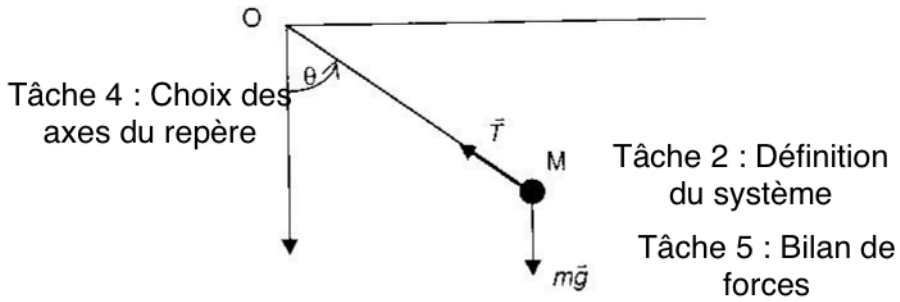
* : Delmas F., Tourret G. (2000), *Mécanique newtonienne du point*, Edition Ellipses, Aymeric Chauprode, Paris, ISBN : 2-7298-7946-3

Un point matériel M de masse m est accroché par un fil en un point fixe O. On abandonne le point M sans vitesse initiale d'une position telle que OM soit horizontal.

Quel est l'angle que doit faire OM avec la verticale pour que la tension soit égale au poids en norme ?

On néglige tous les frottements.

Considérons le point M comme système dans le référentiel terrestre supposé galiléen. Les forces appliquées sont la tension et le poids.



La relation fondamentale de la dynamique s'écrit :

$$m.\frac{d\vec{v}}{dt} = m.\vec{g} + \vec{T}$$

Cette relation vectorielle est projetée sur la base de Frenet :

- projection sur la tangente (1) $m.L.\frac{d^2\theta}{dt^2} = -m.g.\sin\theta$

figure 22: Extrait de la résolution du problème du pendule simple dans le même manuel que celle dans la figure 21. L'auteur définit le système, le référentiel et fait le bilan de forces dans la première phrase. Et la tâche du choix de l'axe du repère est accomplie à travers le dessin.

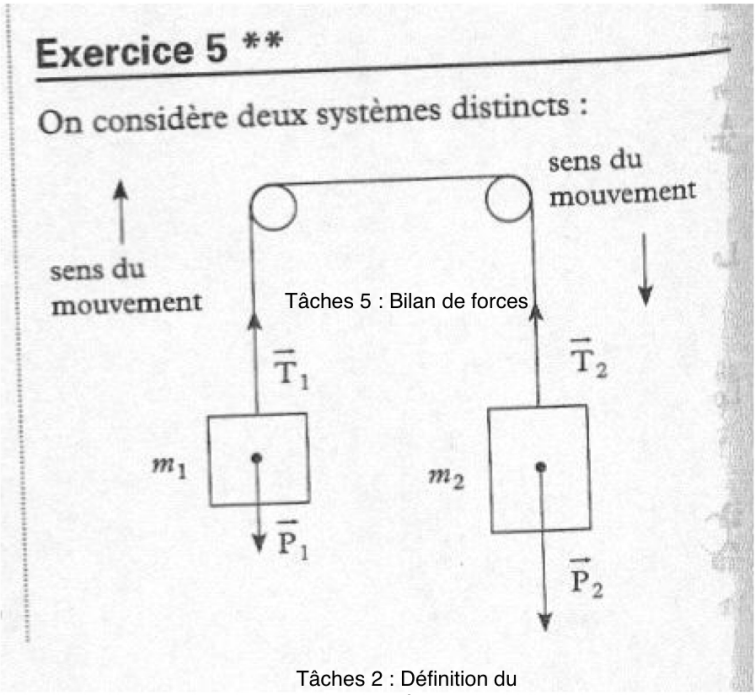


figure 23: Extrait de la résolution du problème de la machine d'Atwood dans un manuel de Terminal. Le dessin se trouve est tout au début de la résolution. L'auteur accomplit les tâches de la définition du système, du bilan de forces sur le dessin.*

* : De La Souchère M-C. (2005), *Un pas vers la sup en physique, De la terminale à la prépa* : *Cours, méthodes, exercices*, Bréal, Rosny, ISBN : 2 7495 0527 5.

Annexe B4

Comment et pourquoi l'aide « résoudre un problème de dynamique du point matériel a été est-elle construite ?

Ens-TD: Comment et pourquoi ? … C'est un peu … C'est l'historique en fait. C'est l'historique de cette méthode. Pour moi c'est un problème d'enseignement.

C'est-à-dire que je commençait à cerner les difficultés des étudiant par rapport au TD, par rapport à résolutions des problèmes de dynamique. Et en fait, je pense que je leur donnait un certain nombre de conseils. J'ai décidé de les organiser. Est-ce que on peut arriver à …? Est-ce qu'il y a une méthode d'écriture ? J'ai fait une première tentative d'écriture et puis je l'ai essayée sur des problèmes. Et ça m'a paru extrêmement intéressant. Donc ça m'a permis aussi d'affiner cette méthode et ensuite je me suis rendue compte qu'elle est extrêmement efficace. C'était extrêmement efficace.

Et si on posait bien les choses, en particulier, par exemple les aspects cinématique qui ne sont pas classiques. Quand on donne une méthodologie de ce type là, ça arrive parfois, on va parler du référentiel, on va parler du PFD, on va parler des forces, mais on va pas parler des aspects cinématiques. Et en fait je me suis rendue compte qu'à partir du moment où on posait de façon systématique ces éléments de cinématique et les conditions initiales et bien certaines difficultés aux quelles ils se heurtaient des étudiants qui les amenaient à faire des erreurs disparaissaient. Alors que c'était même pas posé là. Je dirai la bonne question physique simplement : le fait de penser à remplir cette rubrique, documenter cette rubrique qu'elles sont, permettaient de résoudre le problème et dérouler le processus jusqu'au bout. Et j'étais moi-même surprise par l'efficacité de la méthode. Une fois que je l'ai eue un petit peu rodé et après je l'ai rédigée, je l'ai donnée aux étudiants.

Donc l'idée c'est quand même : il y avait un certain nombre d'erreurs qui étaient faites et des difficultés et aussi le besoin de faire expliciter des choses.

Tu as parlé des difficultés des étudiants. Est-ce que tu as utilisé cette méthode depuis le début de ton enseignement ? Quels sont les difficultés que tu as constaté par exemple dans les copies et quelles difficultés ?

Ens-TD: : Alors ben en fait, non je ne l'ai pas utilisée au départ parce qu'au départ quand j'ai commencé à enseigner, j'étais vraiment totalement débutante dans l'enseignement. La discipline ça faisait un petit moment que je l'ai pas vue. Il a fallu que j'y remette. Ça se fait pas du jour au lendemain. Et ensuite il y a une prise de conscience à faire : des difficultés des étudiants. Puis bon, ça a évolué aussi avec le temps cette prise de conscience. Elle vient en les voyant travailler au tableau. A l'époque je le faisais beaucoup. On avait le temps de faire. Et puis avec les devoirs et les examens aussi on voit un petit peu plus ce qu'ils font. Donc non, ça prend un certain temps de prendre conscience de ces difficultés et puis de les cerner.

En fait quelles difficultés ? Le problème c'est qu'à ce moment là, qu'est-ce que j'avais en tête comme difficultés ? Quand je l'ai fait, je ne sais pas parce que j'ai quand même depuis ça a un petit peu évolué d'autres aides qui sont apportés d'autres questions qui sont venues les étudiants aussi ont changé leur formation a changé au lycée donc qu'est-ce qu'il y avait ? Il y avait la difficulté à faire un bilan de forces, il y avait à écrire correctement analyser correctement le mouvement. Il pouvait y avoir des erreurs importantes et l'identification du système et la mise en relation entre l'accélération qu'on écrit dans le PFD à qui ça se réfère. Et très souvent on a besoin, c'est ce que je disais tout à l'heure sur les aspects cinématiques, on a besoin de dérouler toute l'écriture, de se poser les questions à partir de la position, d'écrire la vitesse d'écrire l'accélération du mobile et ensuite dans un repère, référentiel , dans un système de coordonnées choisis et c'est ça qu'on va rapporter ensuite dans l'équation.

Et donc là, en fait, il y avait tout ce processus. Et en fait, je m'en suis rendue compte qu'ils avaient des difficultés à écrire cette partie là. Mais c'est en donnant une méthodologie qu'on arrive à voir ainsi les détails des difficultés.

Bon après, il y avait aussi des difficultés dans la résolution des équations différentielles, dans la projection. Il y a toujours eu mais bon. Au niveau de la méthode en général. Ils ont assez consciences de ces passages là, même s'il n'est pas très explicite : de l'équation aux projections parce que c'est quelque chose qui est acquise déjà dont ils ont pris conscience déjà au lycée. Le fait qu'il faut faire des projections mais ça ne veut pas dire qu'ils maîtrisent ces choses là.

Depuis l'utilisation de cette aide quelles sont les difficultés et avantages que tu as constaté dans ton enseignement ? Pour la mise en oeuvre tu veut dire technique ou par rapport aux étudiants ? Par rapport à ton enseignement?

Ens-TD: D'accords. Dans mon enseignement, pour ce qui est la première que j'ai conçue, aucune en réalité. Il fallait rentrer dans le détail. Et ça demandait de donner l'exemple. Ça me paraît évident que l'enseignant doit donner l'exemple. Il doit donner l'exemple en suivant la méthode quand ils corrigent au tableau. Et il doit donner l'exemple quand il produit des corrigés. En fait, ça me paraît évident si moi je fais des corrigés dans lesquels je ne respecte pas ces règles là, ils ne vont pas sentir concerner par la méthode. Et donc il y a eu la difficulté comme je te disait. En fait j'ai trouvé cette méthode extrêmement efficace même à la limite.

Ça il y avait plus besoin d'analyser dans le détail le mouvement, de réfléchir trop à la situation. Parfois on arrivait à résoudre des problèmes, c'est-à-dire ne pas faire des erreurs et écrire correctement des choses sans avoir vraiment pris conscience de la situation physique dans son détail. Donc là, je n'ai pas eu la difficulté de ce coté là. Et j'ai du être obligée d'améliorer des petits points. Mais alors là, les premiers, je ne sais pas parce que ça remonte loin. En fait je ne sais pas trop depuis 95. Il y a dix ans que j'ai mis ça en place au moins. Et donc ça je n'ai pas éprouvé des difficultés de ce coté là.

Après il y a eu des améliorations et quand on rentre dans certains détails ou quand on confronte de façon étroite par rapport à certains problèmes. On s'est rendu compte qu'il y avait d'autres difficultés que, éventuellement il fallait aménager un petit peu la méthode. Par exemple, la première adaptation, c'était de voir qu'on pouvait avoir dans un problème général plusieurs systèmes à traiter. Donc du coup, il a fallu inclure une boucle pour différents systèmes. Et puis plus récemment qu'est-ce qu'il y a eu comme adaptation ? C'est quand on a travaillé sur la machine d'Atwood, on s'est rendu compte que, je me souvient plus, ça fait longtemps que j'ai pas manipulé tout ça.

L'écriture de l'accélération ?

Ens-TD: Sur l'écriture de l'accélération ? Choix du système plutôt ? Non c'était il y a eu une chose différente, quand on a les trois équations vectorielles en fait in a trois équations scalaires, quand on les projette et ces trois équations scalaires permettent de déterminer en fait trois inconnues là. C'est vrai que les inconnues sont différentes on peut avoir une inconnue dans le mouvement et deux inconnues dans les forces que sont juste par exemple le module de l'une et la direction de l'autre d'une autre force son sens et puis un des paramètres de l'accélération , du mouvement en fait parce que en réalité ça va apparaître dans l'accélération mais c'est un des paramètres du mouvement. Par exemple une des coordonnées … là en fait je crois que la première version disait bon ben on résout l'équation différentielle du mouvement mais quelque fois il y a pas l'équation différentielle du mouvement à résoudre parce que le mouvement est parfaitement connu et toutes les inconnues vont aux cotés des forces

donc en fait de d'essayer de voir que qu'est-ce qu'on veut résoudre qu'est-ce qu'on cherche et qu'est-ce qu'on peut résoudre d'autres avec ces équations. Parce que quelque fois on s'intéresse juste à l'un des paramètres et puis on ne va pas s'intéresser à ce qui se passe dans les autres. Donc là, il y avait un petit aménagement qui permet de poser des questions, de situer un petit peu les choses de ce coté là. Mais je pense que l'aspect ce n'était pas l'explicite. Mais je l'utilisait déjà avec les étudiants dans la résolution. Qu'est-ce que je cherche ? Qu'elles sont les inconnues ? Et parmi ces inconnues, qu'est-ce que je cherche ce qui permet éventuellement d'orienter les projections ? Qu'est-ce qu'on a à faire ? Parce qu'on fait des projections de façon judicieuse et on peut éliminer une variable qui est inconnue et qui ne nous intéresse pas et dissocier les autres variables par rapport aux autres. Mais ça, ça n'a pas été formulé de façon explicite dans la méthode. Par contre je l'utilise en TD quand je guide les étudiants, quand je fais une résolution, quand ils ont besoin d'une aide, quand ils sont au tableau, quand je corrige une copie en leur disant : attention ici qu'est-ce que vous cherchez ?

En quoi l'aide modifie-t-elle le comportement de l'enseignant ?

Ens-TD: Si tu veux, je t'ai répondu là. Pour cette première aide méthodologique sur la résolution d'un problème de dynamique, donc là je pense que je t'ai répondu en partie puisque j'estime que l'enseignant doit donner l'exemple donc en ce là ça modifie sa façon de corriger au tableau, dans un corrigé qu'il a mis à écrit et qui a mis à la disposition des étudiants, de corriger aussi des copies. Ça modifie également vis-à-vis des étudiants les exigences. Ça c'est encore un autre, tout en autre registre où je vais leur demander de suivre cette méthode et donc je vais corriger leur copies en me référant à cette exigence là.

Ensuite ça a modifié quelque chose dans ma correction des copies aussi. Parce que ça m'a permis d'analyser les copies de manière différente et de montrer aux étudiants quelles étaient les problèmes auxquelles ils étaient confrontés d'un point de vue méthodologique en leur disant : vous voyez dans la méthode on vous demande de faire telle et telle chose et en fait vous avez fait telle erreur parce que vous n'avez pas abordé cet aspect là des choses, vous n'avez pas posé telle question par exemple, vous n'avez pas écrit ce que vous saviez du mouvement en fait, vous êtes allé trop vite et vous avez écrit l'accélération de manière non adéquate. Donc ça permet de dire vous n'avez pas définit le système, donc ces aides donnent une trame explicative à laquelle l'enseignant peut se référer quand il va corriger une copie ou un étudiant qui s'exprime au tableau. Par exemple, voilà là ici il y a un problème. Mais si tu te réfère à cette méthodologie, tu vas pouvoir. On voit d'où vient l'erreur et comment et par quel cheminement de résolution on va pouvoir éviter les écueils. Donc c'est aussi un outil pour comprendre les erreurs des étudiants et pour les refaire comprendre. Ils ont aussi accès à cette structure qu'on leur donne cette méthode mais ça aide donc par contre au tableau.

Quand on multiplie les aides, ça devient complexe, peut être parfois trop détaillé et quelque fois il faut passer vite sur certains aspects. Mais à ce moment là aussi dans le corrigé parce qu'on ne peut pas tout détailler et ce n'est pas intéressant de tout détailler de façon systématique : dire que le référentiel est galiléen quand on a toute une série d'exercices sous le référentiel systématiquement galiléen. C'est un peu fastidieux. Donc je pense qu'il est important de le dire parce qu'il est important de le retenir et de savoir contrôler quand on a un problème. En fait, je l'utilisais de cette manière là dans une correction au tableau. Bon le référentiel est galiléen et je passe vite là dessus. Je vais évoquer la question mais je ne vais plus la discuter. Ou dans le corrigé écrit, j'ai du le faire de façon détaillée dans un premier exercice. Dans les exercices suivants, je remplis la rubrique : référentiel est galiléen terrestre galiléen, et je mets : voir exercice … où ça a été donné dans les détails. Donc à ce moment là, je donne une référence puisque l'explication est toujours la même et que voilà quelque

fois c'est vrai que ça peut être un petit peu fastidieux quand il y a des choses évidentes on ne documente pas toujours.

Toutes les rubriques ne sont pas utilisées dans la résolution d'un exercice précis. Donc au début quand on veut mettre en évidence la méthodologie et l'usage qu'on peut en faire, on va discuter tous ces points en disant bon ben ça je ne le fais pas bon après on passe la dessus on va plus vite mais déjà c'est un des problèmes. C'est quand même lourd à mettre en place ça.

Les étudiants ont l'impression qu'on les gave dans les détails. Donc il faut faire attention dans ces détails-là. Plus on multiplie les aides, plus on va apporter des détails. Je pense qu'il y a une gestion à faire dans les corrigés, dans les exigences que l'on a en disant : vous l'utilisez quand vous en avez besoin et quelques fois vous avez des exercices dans lesquels je vous demande explicitement de détailler parce que je vous demande d'apprendre à vous servir de cette aide. Par exemple, je vais montrer l'exemple dans certains éléments. Mais c'est à ce moment-là que ça devient extrêmement utile. Quand on corrige un étudiant, quand on lui montre comment l'aide peut lui permettre, parce qu'en fait l'aide c'est une méthode générale mais il faut parfois aller plus vite. Ça c'est un des problèmes physiques : c'est les raccourcis. Il faut aller plus vite. Par contre quand une méthode est acquise quand on a un problème, une difficulté, une erreur, on peut faire appel à cette méthode pour contrôler ce que l'on a fait et retrouver les erreurs et remettre les choses à leur place. Donc en fait je ne suis pas sûr d'être dans ce stade là de gestion des choses parce que c'est relativement complexe de ce point de vue là.

Une deuxième question pour la modification des supports des cours, en quoi l'aide modifie les supports des cours ?

Ens-TD: Alors c'est sûr que au départ j'ai travaillé avec des exercices dont certains j'ai pris dans des livres, dans des polycopiés. Il y en a d'autres que j'étais amenée à créer mais avec une référence de corrigé qui sont des corrigés en général sucent non pas des corrigés détaillés, sauf peut être dans le cas de sujet d'examen parfois un petit peu plus détaillé. Et là j'ai été amené réellement à détailler à entrer dans les détails. Ça c'est un problème en fait parce que c'est ce que je disais, on peut saturer des étudiants d'informations mais il est nécessaire d'entrer dans les détails pour comprendre pour montrer des choses quand on le fais dans un corrigé papier ou dans un corrigé au tableau. Il y a des choses qu'on veut mettre en évidence. Il y a des difficultés particulières.

Et ensuite pourquoi il faut ça ? Parce que, quand j'arrive à faire détailler aux étudiants leurs raisonnements, j'arrive à cerner mieux leurs difficultés. Quand on ne rentre pas dans le détail, et bien on ne voit pas là où il y a un problème. C'est dans le détail que l'on va voir apparaître les problèmes. Donc c'est là où je vais pouvoir les aider véritablement. Je vais pouvoir leur montrer, leur faire comprendre où elle est la difficulté qu'ils ont à surmonter.

Donc il y a un élément de ce type-là et en même temps le revers de la médaille c'est trop lourd. Alors bon je leur tiens un discours. Là aussi il y a une modification du contrat avec les étudiants. Il y a un contrat implicite. Quand on ne rentre pas dans le détail qui est que, même dans la façon de procéder, ça modifie en fait énormément des choses, dans la façon de procéder dans un TD ou quand ils rendent un devoir ou un exercice ou on leur dis que ce qui est important vous ayez quelque chose qui est juste. Je vous met une bonne note, si c'est juste. Et je vous met une mauvaise note si c'est faux. Et en réalité je ne connais pas beaucoup d'enseignant sauf ce qui veut aller plus vite qui ne s'intéresse pas du tout à l'enseignement qui soit intéressé par le fait que l'étudiant ait la réponse juste et non pas ait le bon raisonnement et la bonne manière d'aborder les choses.

Donc à partir du moment où le raisonnement qu'on souhaite qu'ils acquièrent et les fondements théoriques qui sont derrière et toute la technique de modélisation qui est derrière de la résolution, on est amené à entrer dans le détail et à demander à l'étudiant de rentrer dans le détail. Alors le problème c'est que moi je vois les enseignants, comme ils ne corrigent plus de devoir et que quand ils ont à corriger des examens, c'est long. Et bien, ils ne veulent pas que les étudiants détaillent trop. Mais en ne détaillant pas trop, ils veulent qu'ils donnent l'essence des choses et bien en fait les enseignants ne voient plus les erreurs commises, n'identifient plus les difficultés. Ils sont amené à avoir des jugements, je dirai à l'emporte de pièce sur les capacités ou l'investissement des étudiants. Et donc ça c'est une chose.

Rentrer dans le détail c'est aussi rentrer là dedans. Donc il y a cet aspect. Ce n'est pas ce qui m'intéresse en tant qu'enseignant, c'est que vous compreniez ce que vous faites. Ça je pense que c'est un objectif qui est général chez les enseignants du supérieur, en tous les cas certainement du secondaire du supérieur en tous les cas. On leur demande de comprendre, mais on n'a pas toujours les exigences, les moyens aussi d'évaluer ça et de toute façon je leur dis ce que j'ajoute c'est que ils ne feront pas une résolution juste s'ils ne comprennent pas ce qu'ils font au niveau universitaire ça ne fonctionne pas. On ne va pas les entraîner à mémoriser la résolution d'un exercice précis en 15 exemplaire pour qu'ils aient acquis la technique sans qu'ils comprennent ce qu'ils font, ce n'est pas une mémorisation d'une technique quand même arriver à comprendre ce qu'on fait. A partir de là, on est obligé de rentrer dans le détail. En tous les cas, ça me parait évident. Je pense que la manière dont on procède au niveau universitaire … est souvent limite par rapport à cet objectif là. C'est une réalité.

Alors l'autre chose par rapport au contrat qui est fondamentale : moi je prends une attitude un petit peu différent, mais ce ne veut pas dire qu'il n'y a pas d'autres enseignants qui le font, qui est de dire pendant les TD vous êtes là pour apprendre, vous n'allez pas tout savoir et tout comprendre du premier coup, ça va se traduire par les erreurs entre autres. Quand on fait des erreurs, ça montre qu'il y a quelque chose qu'on n'a pas compris et c'est important justement de comprendre ces erreurs pour pouvoir progresser et pour mieux comprendre. Donc il est important pour que vous me montriez vos erreurs. Et mon rôle n'est pas de vous jouer en disant vous ne savez rien, vous ne comprenez rien ,vous êtes stupides. Mais de vous dire là il y a une erreur et là en fait il y a tel problème, il y a telles difficultés que tu n'as pas comprises, il y a telle difficulté à surmonter.

donc c'est l'aide qui t'a permis …

Ens-TD: je pense que c'est tout un cheminement en fait dans lesquels l'aide a sa part mais tout va ensemble. Je dirais aussi, c'est-à-dire que l'aide c'était essayer de les aider à mieux structurer ce qu'ils font. Il y a aussi ce problème-là de la structuration du travail. Je me suis rendue compte que qu'il y avait un défaut et puis ça oblige d'entrer dans le détail et en rentrant dans le détail je comprends mieux les difficultés des étudiants.

L'aide est pour moi un outil aussi d'analyse ce qu'ils font et la compréhension de leurs difficultés. Et donc elle m'amène moi à mieux les aider à leur montrer, identifier les difficultés. Et donc là en fait voilà le problème de ce que tu n'as pas compris plutôt que de façon général de dire non c'est faux. Je pousse à l'autre extrême : tu ne sais pas faire, t'as rien compris. même si on le dit pas. En fait je pense souvent leur manière de traduire les choses. C'est un petit peu le problème, c'est-à-dire que quand on corrige au tableau et que l'enseignant fait toujours juste, presque toujours juste et à partir du moment où on est là dedans et on demande de corriger, on demande de résoudre ces exercices si on leur met une note on leur … dans certain coté l'objectif

c'est que ce soit juste du premier coup, on oublie tout de suite qu'apprendre et comprendre c'est un cheminement qu'on ne va pas autoriser.

Là je crois qu'il y a une modification du contrat , c'est-à-dire d'autoriser l'erreur de mettre les notes sur les TD puisque quand je leur demande de rendre des devoirs je mets une appréciation il va y avoir deux types d'appréciations : la partie d'appréciation qui est voilà la note que vous auriez si vous passiez un examen donc ça vous donne le progrès que vous avez à faire et voici l'appréciation que j'ai de la qualité de votre travail qui est que par exemple la qualité est très bonne parce que le travail est très sérieux mais qu'il y a encore des difficultés qu'il y a des choses non pas comprises sur lesquelles il faut progresser pour arriver à ce qui est exigé à l'examen qui est quand même la plus juste possible effectivement.

Mais bon après le problème c'est que, quand j'enseigne dans une équipe hétérogène d'enseignant et bien noter, donner une note dans laquelle il y a une proportion importante de la note non négligeable, de la note qui soit sur la méthode sur la façon de procéder et non pas sur le résultat, c'est pas évident à imposer. Comme moi je faisais tout, ce qui m'est arrivé, je décomposait la note sur la méthode et aussi sur ce qui était su et non pas uniquement sur le résultat et là aussi ça demande une pratique au niveau de l'évaluation de ne pas coincer les étudiants en leur posant une question laquelle si sont faux tout reste est faux derrière y a plus un résultat juste ça demande vraiment toute une adaptation aussi de l'évaluation. Là ça dépend de ma position dans l'équipe et la position de l'équipe,

actuellement?

Ens-TD: actuellement, ce sont des équipes énormes dans lesquelles il est hors de question d'avoir ce genre de discussion et d'avoir ce genre d'approche.

Donc c'est le résultat ?

Ens-TD: c'est le résultat qui compte essentiellement et bon pour moi on a quelque chose qui est incohérente d'ailleurs de ce point de vue là, qui n'est pas performant.

En fait tu as parlé de la structuration de la résolution d'un problème, en fait tu as déjà constaté dans les copies des étudiants une structuration avec l'utilisation de l'aide? qu'est-ce que ça t'a permis cette structuration ?

Ens-TD: Alors c'est très variable. D'abords, je pense que si je veux avoir une efficacité, si je souhaite que les étudiants adoptent cette méthodologie, il faut que je la mette en tant qu'exigence et qu'il y a des conséquences, c'est-à-dire que je vous a demandé ça et vous ne l'avez pas eu et j'estime dans la partie qualité du travail je vais dire : je vous ai demandé ça et vous ne l'avez pas fait ça je ne suis pas contente et éventuellement ce qui est très efficace est leur montrer, leur dire : voilà vous avez fait une erreur et je ne suis pas à même de vous dire où est le problème parce que vous m'avez pas donné à voir non plus. C'est ça aussi adopter la méthode : c'est me donner à voir vos erreurs et donc là je ne peux pas vous aider donc ça sert à rien entre autres. Ça, c'est une manière d'aborder des choses. Donc, il faut mettre un dispositif en place. Je vais adopter la méthode ou je veux l'exiger sinon il y en a très peu qui vont l'adopter. Si moi je le fais au tableau, je ne l'exige pas, certains étudiants qui sont très structurés, qui ont besoin de cette structuration, qui ont déjà fait un travail la dessus, quelque fois il y a des enseignants au secondaire qui aient exigé cette structuration, ils vont rentrer dedans beaucoup plus facilement que les autres.

Il y en a d'autres : ceux qui ont certaines aisances en particulier ou qui n'ont pas envie de s'investir, qui vont dire : non j'arrive très bien sans et je ne vais pas rentrer dedans . Là, tout un travail pour les convaincre qui va être de leur dire : voilà il y a

une erreur là, je peux identifier l'erreur, je ne peux pas vous aider ou vous voyez là si vous aviez suivi cette méthode et bien vous n'auriez pas fait cette erreur parce que etc. etc. Donc ça, c'est tout un travail à faire derrière par rapport à la méthode. Et ceci dit : oui il y a un certain nombre d'étudiant qui l'adopte, ils vont rentrer dedans facilement. Il y en a d'autres qui sont très retissant parce que ça demande plus de travail ou un autre type de travail qu'ils ont l'habitude de faire. Et donc en fait, tout un travail pour les convaincre et d'adopter une méthode. Souvent quand ils ont une attitude assez intuitive et qu'ils sont des brouillards et ils résistent beaucoup tant que ça marche. Il y a toujours un moment où en fait ça ne va plus fonctionner. Donc oui.

Est-ce que tu as créé par exemple d'autres éléments d'aides de même ordre, par exemple méthodologique ?

Ens-TD: alors le premier ça vraiment c'était celui-ci, la résolution d'un problème de dynamique et puis quand j'ai intégré donc l'équipe a grossi j'intégrais une équipe un peu plus importante parce qu'au début on était deux quand j'ai fait ça on était deux, soit j'étais toute seule. C'était des petits enseignements. Je pouvait être toute seule. Là je suis à une équipe, on était 4 ou 6 personnes avec 4 ou 6 personnes on discute quand même. On arrive à se voir, à s'entendre. Et entre autres on était très d'accord avec le responsable du module.

Donc là, j'ai développé d'autres aides dans le même style. j'avais déjà développé une aide sur la résolution des équations différentielles pour ce module de la mécanique spécifique. Donc celui là, je l'avais développé. Après pour moi quelque chose d'assez différent ça. C'est un outil mathématique donc ça je l'avais développé avant, parce qu'on a toujours le problème que les math correspondants à cette partie là n'ont pas été traités. J'ai été obligé de le faire en cours et puis alors après on a développé, oui c'est ça. On a demandé aux maths de faire de la math pour la physique mais finalement on avait jamais l'outil au bon moment, sauf qu'on avait plus de temps de le faire dans le cours et dans le TD de physique. Donc j'ai rédigé cette fiche pour qu'il y ait quand même un support quelque part. Donc c'est à la fois un support de cours et de résolution.

J'ai développé deux autres aides méthodologiques du même type pour l'énergie et puis pour les problèmes strictement. C'est aussi de la mécanique dans lesquelles il va y avoir la conservation de la quantité du mouvement, le vecteur accélération est nulle pour un système déterminé. Après on se débrouille avec ça. Ça , ça permet de traiter entre outres après aussi les chocs. Donc là j'avais écris une petite méthode pour l'énergie avec *comment résoudre un problème de dynamique par l'énergie en mécanique du point matériel,* les choses classiques en fait. voilà après quand on a commencé à travailler ensemble, on a abordé d'autres éléments d'aides.

Alors c'est vrai que on se pose la question d'analyser les résultats. Des choses ce qui est très peu faite, d'analyser la situation de manière qualitative et là ça, ce sont les méthodes de physiciens qui sont assez répandues chez les scientifiques qui sont les études des cas limites. Donc ça, c'est assez différent, comme parce qu'en fait c'est leur donner un outil qui es un outil de scientifique, spécifique et essayer de développer une aide pour essayer d'expliquer comment ça fonctionne et commet peut s'en servir et à quoi ça servir aussi dans les contrôles. Donc moi je mettrai un petit peu à part ça. On peut parler de cas limites pour n'importe quel scientifique qui sait de quoi il s'agit. Alors que la méthode de résolution d'un problème de dynamique il vient nécessairement réfléchi.

c'est pour les étudiants ?

Ens-TD: pour les étudiants, même de la formaliser il n'est pas nécessairement fait. Bien qu'il y ait une méthode, elle est complètement implicite souvent. Ce n'est pas

souvent une obligation de l'avoir explicité et écrit. Et en fait, moi aussi je suis passé, je me suis dit : je suis un fil et j'ai voulu l'expliciter. C'est ça aussi pour pouvoir donner quelque chose, une référence, une structure aux étudiants. Alors par rapport aux autres aides, par contre celle sur l'acquisition d'une connaissance, ça c'est vraiment une aide spécifique pour les étudiants. Et en son origine, elle est quand même ancré sur l'utilisation de l'aide méthodologique au départ et sur un travail de méthodologie, que j'avais fait avec un autre enseignant. On avait fait des TD méthodologiques.

Quand on pose les problèmes au début, en fait dans un problème de résolution d'un problème de dynamique, ce qui est central dans l'organisation des problèmes, c'est le PFD, c'est la loi qui est utilisée. On se rend compte que c'est elle qui organise la résolution en réalité. Par rapport aux exigences qu'elle a par exemple : elle s'applique à un système etc, … Quand on pose, quand on analyse finalement cette méthode, cette méthodologie, donc en fait c'est un côté méta par rapport à la méthodologie et on voit ce qui est mis en avant c'est la loi donc là le PFD, et qu'on regarde un petit peu comment ça articulait. On voit les tenants et les aboutissants de la loi. C'est ça qui a présidé l'écriture de cette aide en se rendant compte également qu'il y a des difficultés que rencontrent les étudiants qui sont liées à l'écriture de cette loi. Comprendre que cette loi elle s'applique au système donné et donc la détermination du système est extrêmement importante que ça correspond à certaines classes de situation. On va travailler dans un référentiel galiléen et ça s'applique à d'études de translations des solides donc d'où la définition du point matériel et du fait qu'on prend pas en compte les rotations. C'est des classes de la situation physique. Il y a aussi une difficulté qui est assez général, qui est la paramétrisation d'une équation donc d'une loi qui est sous une forme mathématique. Les étudiants retiennent une formule générique et il s'agit de passer du générique à un cas particulier. Donc là, il faut bien identifier la nature physique des éléments mais aussi quelle forme est là dans cette situation particulière.

Par exemple, quand on écrit, ça c'est un grand classique quoi décrire somme des forces égales à « ma » et bien ils vont se préoccuper des forces et puis quand on va écrire ma c'est le m de quoi et c'est le a de quoi, s'il y a plusieurs systèmes possibles. Il y a en fait fréquemment des erreurs là-dessus parce qu'ils ne sont pas posés la question de l'identification des paramètres de l'expression mathématique, algébrique qu'ils vont utiliser. Donc là, en fait il y a une manière de procéder, il y a une manière de mémoriser finalement une loi. Pas uniquement une formule mathématique générique. Alors après, c'est vrai que c'est quand même lié à certain nombre d'erreurs après l'usage finalement.

Je l'ai pas mal utilisé dans mes TD parce que ça mettait en évidence un certain nombre de difficultés et ça permettait de pointer sur certaines erreurs que faisaient les étudiants. C'est intéressant de ce point de vue là. Mais très très difficile de les amener à voir cette démarche. Quand ils ont besoin de travailler le cours parce que là c'est un travail sur le cours au départ et comment est-ce que je vais utiliser le cours dans les applications de TD ? , de TP ? et autres ? Il s'agit de modéliser un système.

Moi ce que je vois quand même, il y a une résistance des étudiants à l'usage de ces choses là. Cette résistance à mon avis et c'est un a priori elle est liée à plusieurs choses : d'abord parce que ce n'est pas institutionnel, ça fait pas partie des règles qui font une modification du contrat et que ce contrat-là ce n'est pas respecté ensuite dans les examens et par les autres enseignants. Donc là, je pense qu'il y a une question d'institutionnalisation de ces choses là qui peut aider à …. Ensuite c'est lourd parfois. Et là je ne sais pas trop comment procéder pour alléger. A mon avis justement c'est en ayant, je ne sais pas parce qu'il ne faut pas avoir une diversité trop grande des outils parce qu'on va passer plus de temps à apprendre les outils.

Plutôt que sur le contenu…

Ens-TD: que sur le contenu. Ça, ça ne va pas non plus. Il faut qu'il y ait une

efficacité des outils. C'est un peu ça ensuite. Il y a un usage progressive et je pense qu'on va trop vite dans l'enseignement. Et ça ne peut pas se faire sur 3 mois d'enseignement. Ça doit se faire sur un an sur deux ans l'acquisition de ces choses-là.

Pour d'autres modules ?

Ens-TD: Oui, justement. C'est cette question d'efficacité, d'institutionnalisation mais aussi efficacité des outils. L'efficacité, ça doit être utile, pratique et pas trop coûteux non plus. Donc le coup, apprendre 15 outils sur 3 mois utiliser 15 outils sur 3 mois c'est d'une lourdeur extrême. Par contre, si on repartit ces outils, on les amène progressivement sur deux ans et c'est institutionnalisé, ça veut dire que l'évaluation, les moyens qu'on a des … c'est-à-dire ces choses là prendre en compte, on peut convaincre les étudiants et en faire un outil efficace c'est-à-dire qui soit utile pour eux.

mais quand même en fait on constate que les étudiants utilisent la méthode résolution d'un problème, au moins il y a des tâches que les étudiants explicitent souvent

Ens-TD: oui oui tout à fait mais je pense qu'il y a des choses qui viennent du secondaire. Parce que, quand même, définir le système, définir le référentiel, faire le bilan des forces, écrire le PFD, projeter ça, c'est une structure que la plupart d'entre eux ont acquis du secondaire. Après, c'est plus ou moins explicite dans leur manière de faire, suivant la position, les exigences qu'a eu l'enseignant du terminal, secondaire en fait. Et aussi le besoin de structurer leur ressenti. Ça ne veut pas dire qu'il y a certains qui sont brouillons et qui n'ont pas envie d'entrer dans le structure qui en ont besoin, mais leur ressenti de besoins de structurer des choses. Et là, on va voir beaucoup de filles par exemple qui sont plus structurées et qui ressentent plus besoin d'avoir une structure, d'avoir un support.

Le cas limite aussi par exemple, pas mal utilisé par les étudiants…

Quand on l'exige, après le problème. C'est que, en fait , c'est intéressant de leur donner des outils de vérification. Mais souvent on ne leur donne pas le temps de la vérification et ils ne se donnent pas le temps de la vérification. Il y a un effort, ça demande un effort de vérifier ce que l'on fait. Et aussi est-ce qu'on va leur demander d'aller jusqu'à l'analyse des résultats ? Par exemple dans lequel l'étude de cas limites peut être intéressant justement. On va solliciter ces choses là. En fait souvent on ne va pas jusque-là. On n'a pas le temps d'aller jusque-là. C'est dommage parce que c'est aussi ce qui est intéressant d'analyser les résultats, d'être capable de revenir en arrière. En fait quand on exige de contrôler, de vérifier ce que l'on fait, ça c'est, c'est quelque chose qui n'est pas inclut dans l'enseignement finalement. C'est fort dommage parce que ça fait partie de la méthode scientifique déjà et l'apprentissage de cette démarche scientifique. On reste à des choses très limitées très scolaires dans certain côté. Si on avait des exigences au niveau des examens de l'analyse d'un résultat par exemple d'un contrôle, ça pourrait donner des choses intéressantes. Mais il faut l'institutionnaliser, le mettre en place et l'institutionnaliser.

Donc institutionnaliser ça veut dire aller jusqu'à la mise en place dans des examens, dans les évaluations à mon avis. Sinon l'examen ou le devoir qui compte au bout du compte. Sinon certains vont s'y mettre d'autres pour juger que ça ne vaut pas la peine. Ce n'est pas exigé sans se rendre compte du service que ça peut le rendre.

Ça c'est la première année et en fait j'ai enseigné essentiellement pour la première année. Ce que ça peut donner en deuxième année c'est complètement différent. Ce que ça peut donner aussi par rapport à des étudiants qui seraient dans une préparation concours est complètement différent.

Là actuellement j'enseigne à deux étudiantes handicapées qui sont en pharmacie, la

pharmacie c'est un concours donc elles ont à mémoriser énormément de choses et là par exemple la manière de mémoriser va être extrêmement importante, ce sont des filles extrêmement structurées, par exemple la manière d'acquérir une nouvelle connaissance c'est une méthodologie que j'utilise avec elles et elles adhérent très rapidement alors peut être pas nécessairement dans le détail mais elles comprennent la nécessité très très vite. parce qu'elles sont confrontées à cette difficulté. qu'est-ce que je dois utiliser comme formule? Quand? Comment ? Et quand elles ont des QCM de contrôles de ce qu'elles font, elles se rendent compte que l'erreur peut être à ce niveau là. A ce moment là, elles sont très vite convaincues de l'utilité de ce genre de méthode, une méthodologie.

Voilà mais c'est comme tout, il n'y a pas acquisition immédiate de la méthode ni compréhension de son utilité de son efficacité immédiate. Donc, ça demande une gestion de ces choses là. Et quand on veut tout faire tout en même temps, ce qui est peut-être ce que j'ai fait là dans ces TD là, et bien on rebute aussi parfois, ça fait trop. Mais ça c'est un ressenti que j'ai. Il faudra arriver à identifier ces choses là, arriver à gérer ces choses là. Mais ça ne se fait pas comme ça. Je pense qu'il faut avoir la maîtrise d'un enseignement sur une durée suffisamment longue.

Faire des équipes de 15 enseignants avec 800 étudiants, ça pédagogiquement même humainement ce n'est pas ni agréable ni performant. C'est une erreur là. Je déteste de travailler dans ces conditions là. Je n'ai jamais eu si mauvaise condition de travailler.

-FIN-

Annexe B5

Comment avez-vous conçu cette méthode de résolution ? Pour quelles raisons ? Quelles étaient vos motivations en préparant ce type de méthode ?

Auteur du manuel : Alors bon, on a cherché globalement comme dans le but des ouvrages c'était qui est une partie de méthode, on a dégagé les concepts qui étaient communs en certains nombres d'exercices, on a essayé de les classer. Et puis, donc on est arrivé à pour la cinématique à ce schéma-là qui finalement assez évident mais finalement quand on regarde quasiment tous les exercices ils se basent sur ce schéma-là, c'est-à-dire que soit on nous donne la trajectoire et on en déduit la vitesse, l'accélération et on nous donne l'accélération et puis d'autres paramètres pour remonter à la vitesse et à la trajectoire et à la position. Puis donc du coup, et après on est passé à la dynamique ; on a juste eu à faire les liens entre les paramètres cinématiques et les paramètres dynamiques des efforts. C'était le cadre général.

Oui, ça c'est plus liée aux objectifs de classes préparatoires. Il y a encore des vieux réflexes qui consistent à faire que la physique c'est quelque chose d'assez mathématique encore. Bon, s'il faut que je dise autre chose. J'ai écrit l'ouvrage avec mon frère qui lui enseignant à l'école d'ingénieur. Donc vis-à-vis de la mécanique, il a de l'expérience beaucoup plus concrète de la mécanique. Donc, il y a des concepts beaucoup plus pratiques mais systématiquement beaucoup plus appliqués. On a quand même essayé de faire passer cet esprit là. A mon avis typiquement, ça c'est un exercice de classes préparatoires. C'est vrai que ça arrêtait à l'équation différentielle. Pas forcement beaucoup d'intérêt mais en classes préparatoires point de passage obligé. Mais quelque fois dans la classe préparatoire c'est même l'objectif final alors c'est vrai qu'en mécanique c'est pas l'objectif final. Il y a toujours l'analyse de la résolution, traces des courbes. Voilà, moi je pense que l'objectif c'est plutôt ça.

Est-ce que l'exigence des méthodes vient de la collection du manuel ?

A.M : Oui, ça c'est le concept de commun à tous les précis. C'est qu'il y a des méthodes. Alors, de nous même, je ne suis pas sur que l'on l'aura présenté comme ça. C'est-à-dire essayer de dire que tous les exercices vont utiliser ce concept là quasiment tous. Je ne suis pas certain que l'on l'aura fait comme ça nous.

Est-ce qu'il y a des contraintes sur la présentation des méthodes ?
A.M : Non.

C'est à vous de …
A.M : Oui, si ce n'est que le principe : c'est quelque chose avec une petite mise en œuvre au début, puis après quelque chose de général et puis après on l'applique. C'était la seule chose qui était imposé.

En fait, c'est vous qui décidez le nombre des étapes et le contenu ?
A.M : Oui.

En fait, vous avez dit tout à l'heure que vous ne l'auriez pas présenté comme les méthodes. Mais comment ?
A.M : Oui, mais, ici je ne sais pas. Pas forcément. Mais globalement c'est vrai que quelques fois on a du se forcer pour entrer dans ce mol-là. De nous-mêmes, on serait pas forcément allé vers des choses de ce style là.

Dans quel cursus et à quel niveau avez-vous enseigné la physique ?
A.M : Euh, classes préparatoires, IUT un peut, mais surtout aux classes préparatoires.

Est-ce que vous aviez l'intention des prises en compte des difficultés des étudiants en proposant ces types de méthodes ?

A.M : Oui, j'ai forcément dit oui. Mais, l'étudiant, même en classe de prépa, ce qu'il cherche c'est qu'on lui dise voilà si t'apprends ça, ça va marcher dans tous les cas. Il n'y aura pas de problème. Forcément, à partir du moment où on décide de faire des méthodes, pour lui, ça va être vraiment quelque chose de positif. On va résoudre sûrement certaines natures de question que les étudiants posent habituellement. C'est-à-dire mon prof a fait 20 exercices dans ce fiche de TD et comment il fait ? Il faut que j'apprenne pour le devoir. Donc, je pense que dans ce cadre-là, on prend en compte les difficultés des étudiants. Maintenant, des difficultés récurrentes, j'avais fait le bilan avant que je ne fasse le bouquin. Il y a quelques endroits où on a insisté pour. Il a quelques méthodes qui ont été conçues.

Pour répondre à des difficultés récurrentes, pour celle-là, ça me dit rien. Je pense pas que dans cette méthode on soit basé sur des difficultés récurrentes. Il y a forcément des gens qui ont des difficultés pour autre chose, mais je ne pense pas que ça soit quelque chose de commun à tout le monde. Ce n'est pas de généralité.

Vos objectifs pédagogiques en proposant des méthodes ?

A.M : Pour moi, la méthode masque beaucoup de chose. Pour les bons étudiants ça ne soit pas positif. Mais par contre, pour les étudiants moyens, ça va être quelque chose de très efficace parce que globalement ils vont arriver à sortir d'exercices. Si on ne donne pas, ils risquent de jamais sortir. C'est plutôt pour moi l'objectif c'est pour les étudiants moyens pour qu'ils sortent d'exercices.

Pour quelle raison avez-vous décidé de suivre ces méthodes-là lors de la résolution de problèmes ? quand on regarde les exercices corrigés, …

A.M : C'est pour montrer que, … on a tourné les exercices, les questions des exercices pour que la méthode s'applique ou alors on a intégrer dans les exercices la résolution telle que celle-ci. Si le but c'est que l'étudiant retient ça, il faut l'utiliser au maximum de fois cette démarche-là dans les exercices.

Avant la construction de ces méthodes résolviez-vous les problèmes de la même manière ?

A.M : Oui, mais pas forcément formalisé autant que ça. C'est-à-dire là, il y a certain nombre de points. Maintenant c'est-à-dire qu'on a fait le bouquin, je prends ça. Je prends les points un par un. Mais bon tout le monde fait la même chose. Maintenant je suis un peu exigé sur les différentes étapes. Quelques fois dans les bouquins de prépa on est allé un peu plus vite sur le système, sur le référentiel, … Ça se faisait en une ligne. Je repasse en vue de toutes ces étapes là.

Pour trouver globalement dans les exercices de dynamique les démarches types, à savoir soit on a les efforts on en déduit la cinématique. Soit on a une partie cinématique on cherche à en déduire les efforts. Ça ça a pas été très dur à identifier mais arriver à faire des méthodes cinématiques c'était très dur.

Est-ce que ça a changé de votre manière d'enseigner, de préparer vos cours, vos corrigés ?

A.M : C'est-ce que je disais, dans la structuration oui. Je m'oblige à faire apparaître ces points systématiquement. Je pense qu'effectivement pour l'étudiant c'est rassurant. Parce qu'ils se retrouvent dans le même cadre, ils savent ce qu'on va faire à chaque étape. Il y a quelque chose de rassurant là-dedans. J'ai changé sur ce point-là.

Est-ce que vous exigez aux étudiants d'utiliser les méthodes de résolution ?

A.M : Non, ce que je constate, les étudiants faibles et moyens utilisent. Des fois ils font un peu comme moi, ils s'en passent. Mais les étudiants moyens utilisent. Est-ce que ça leur permet d'aller plus loin ? ……je ne sais pas. A mon avis le problème c'est que, en même temps on leur des moyens de plus en plus facilitant pour les résolutions des exercices, en même temps on constate que il font de moins en moins physique, c'est moins en moins poussé, ils ont de plus en plus mal. On essaie de compenser en leur apportant des outils facilitant leur vie sachant que, eux ils ont moins de prérequis, le résultat n'est pas forcément bien meilleur qu'avant, à mon avis.

Comment vous utilisez la méthode dans la classe ?

A.M : ça dépend. Si c'est un exercice de dynamique, je l'introduirais sur l'exemple. En cinématique, je le ferais dans l'autre sens, je donnerais la méthode générale et ensuite l'exemple. Je trouve que c'est logique. Je n'ai pas l'impression qu'il y ait beaucoup d'intérêt de donner la méthode bien avant. Par contre le fait qu'on la réutilise systématiquement, c'est-à-dire que dans la résolution je prends les points qui sont là, c'est-à-dire, je dis on définit le système deux points le point matériel et après on définit le référentiel galiléen d'étude etc… je prends quand même toutes les étapes mais à travers l'exemple.

Connaissez-vous des enseignants qui utilisent les méthodes de résolution ?

Oui, j'en connais, au moins dans l'établissement où je travaille. En classe préparatoire, il y a quand même un objectif opérationnel vis-à-vis des concours. Sans forcément des méthodes qui sont de ce style-là, par exemple pour le lycée du Parc à Lyon, en SUP je sais pas exactement mais CP, les profs, systématiquement reprennent les problèmes de SUP très rapidement et puis il fait un résumé du cours et puis il dit : attention dans les exercices souvent on va faire ça, ça et ça. Donc, ça revient en gros à préparer à dire dans les exercices, il va falloir dérouler d'une certaine manière. Je pense qu'à mon avis dans ce sens là, je sais exactement les méthodes mais dans ce sens là, dire aux étudiants d'utiliser d'une manière les concepts, ça fait partie du job de l'enseignant. Le but c'est de préparer les étudiants aux concours en même temps que leur apprendre des choses. Celui qui ne ferait pas ne ferait pas son boulot.

Quelles sont les remarques que vous avez eu pour les méthodes proposées de la part de vos collègues ?

A.M : La part de collègues, je passe sur l'aspect un peu, comment je peux dire ça, parce qu'on a écrit un bouquin à part ça globalement, ils sont assez positifs. Même si en classe prépa, les gens ont des réflexes et des concepts particuliers, qui sont très attachés à leur manière de faire et donc il y en a certains qui ont tendance à penser que ce n'est pas comme ça qu'il faut faire et que puis… Ce que je voulais dire c'est que, … c'est que moi ce qui me rassure personne ne le dit vraiment je le sens quelques fois quoi. Quand on discute, ils sont pas forcément d'accord pas sur le fond mais sur la manière de faire. Par exemple, il y en a qui sont contre des méthodes, ils veulent pas

entendre parler ça fait partie du boulot de l'étudiant de se faire ses méthodes à lui. Moi ce qui me rassure c'est que globalement c'est un bouquin qu'on vend super bien. Je parle pas financièrement mais ça correspond à une attente. '

En fait, nous avons trouvé un autre manuel dans la collections de « les nouveaux précis ». Quand vous regardez ce type de méthode là, qu'est-ce que vous en pensez ? par rapport à la méthode qui existe dans votre manuel.

A.M : (lit la méthode).

A.M : Euh, alors donc, effectivement, ça devrait être effectivement un cheval sur les deux niveaux. Il y a pas de notion de mécanique du point. C'est un peu mélangé. On parle de centre d'inertie mais ils n'ont pas vu qu'il y avait un concept derrière mais bon.

Et puis qui est une méthode un peu mixage entre la dynamique et la cinématique. Bon, il y a des choses qui ne sont pas mal. A mon avis, on ne parle pas au début, ça serait un peut dommage. Il y a le notion de base projection. J'imagine que c'est un peu prérequis. C'est pour ça, je disais la cinématique c'est quelque chose importante. Parce que par exemple, ici le référentiel n'apparaît pas. Les étudiants ont des difficultés très importante, parce qu'il y a plusieurs bases. Il y a le base de référentiel, il y a le base de projection. C'est pas forcément la même chose. C'est pas bien si, … A mon avis, l'étudiant qui maîtrise pas bien il ne va pas savoir si je parle de base de projection, de référentiel. Même si c'est écrit le base de projection.

Pour le système ?

A.M : Beuh oui, évidemment, on ne sait pas de quoi on parle.
…
…
…
J'essaie de voir le cadre d'application de ces choses. Ça devrait être quelque chose que l'on fait en terminal. Je ne sais pas en fait mais j'imagine. Oui, effectivement, ça devrait servir pour les problèmes de projectile. Mais ça se fait cinématique. On a l'accélération, on passe à la vitesse, position. J'ai du mal à critiquer l'ouvrage. Je ne sais pas. Moi je ne ferais pas comme ça. Est-ce qu'on veut étudier la cinématique et la dynamique en même temps ?

Par exemple, dans l'université Joseph Fourrier,un enseignant utilise cette méthode de résolution. Qu'en pensez-vous de la méthode ?

A.M : (lit la méthode)
…
…
…
…
…
D'accord. Là, c'est la démarche complète. Tout est explicité. C'est détaillé. Il y a une partie qui est effectivement souvent utile, c'est d'arriver à ce qui va se passer. Si on peut prendre en compte les types de mouvement c'est avantageux.

Analyse de la situation, du dispositif ?

Oui. Ça cette partie là ça disparaît complètement en classe prépa. Le but c'est par exemple, quasiment aucun problème de concours on va laisser choisir un système de paramétrage. Quasiment c'est tout le temps, les paramètres de position sont données. Cette étape là elle est quasiment réduite à rien du tout en classe préparatoire. Même en CP, en classe industriel c'est encore pire. C'est vraiment spécifique. Là typiquement qu'on fait pas de la mécanique. C'est dommage que, oui c'est très scolaire. Ça ça peut servir dans d'autres choses.

Par exemple pour l'étape D, pour être sur, ce qui n'est pas là, je dis seulement oralement, le dessin, j'utilise la méthode classique. On isole le système et on remet les bilans de forces et on vérifie si ça fonctionne avec ce qui est possible. Typiquement, ça évite d'oublier la réaction du support. C'est-à-dire que j'enlève (l'objet) on met seul sur une feuille et puis on met les forces. Typiquement si l'objet se déplace sur un plan incliné, si celui qui met que le poids, il va pas pouvoir se déplacer sur le plan incliné. Il va falloir être en chute libre. C'est pourtant c'est quelque chose de très très très utile d'être capable d'isoler le système et de mettre les forces appliquées ça évite d'en oublier. Au moins je suis pratiquement sur que celui qui fait ça correctement, il oubliera jamais de force quoi.

C'est un élément de contrôle ?

AM : Oui, oui. (lit la méthode : D, E F, G) Oui. Moi je trouve que c'est bien. Le seul point qui m'embêterait vis-à-vis d'un étudiant, elle est très longue cette méthode. Il y a beaucoup de choses à voir donc il faut se rappeler. Le but de la méthode, c'est surtout d'aider ceux qui sont en difficulté moi c'est ce que j'essaie, c'est de leur mettre des concepts simples facile à retenir. Pas de choses trop longues trop compliquées. Sinon, ils vont l'oublier dans le problème. On leur donne 15 exercices, il faut qu'ils en tirent l'essentiel. C'est la seule chose qui m'embêterait. Par exemple, si le jour de l'exam, ils ont cette feuille, c'est parfait. Sinon, j'aurais peur qu'ils oublient une partie. Même si c'est évident mais.

Là, c'est un exercice résolu par le même enseignant.

Il ne met pas les points. Moi quand je résout un problème je met les points de la méthode. C'est pas mal. Typiquement, il a isolé le système, donc on ne peut pas tromper sur les forces par exemple.
…
…
…

Vous constaterez que quand on utilise la méthode, on a une résolution plus détaillée. Je peux vous montrer un exemple. La résolution pour le même problème chez Alonso-Finn. Qu'en pensez-vous ?

Oui. Ça c'est le système anglo-saxon. Il y a beaucoup de texte. C'est sûrement bien. Mais pour les étudiants en France, non je ne pense pas qu'on puisse se baser sur ce type de résolution même en classe de préparatoire mais pourtant on a des étudiants qui sont relativement bons. Ça passerait jamais. Je pense que chez DUNOD ciblé pour les étudiants IUT, prépa pour ce bouquin là c'est une erreur. Si c'est celui-là. C'est celui-là ?

Oui, oui, bien sur.

Pour moi, ça fait partie de bouquins de référence. Il y a beaucoup de choses dedans. Mais ce n'est pas un bouquin qui correspond à l'enseignement français.

Ça c'est la résolution d'un autre problème proche de la machine d'Atwood.

Moi je trouve que ça ça faisait partie de bouquins qui faisaient de l'actualité il y a quelques années. Mais à mon, avis on ne peut pas faire comme ça, à part quelques uns qui vont faire des liens tout ce qui est supposé là dedans. Mais…

Vous pensez que c'est un peu difficile aujourd'hui ?

C'est ce que je disais, il y a de moins en moins d'étudiants qui sont capables de faire des liens, qui sont capables de faire le travail qu'on est censé attendre d'un étudiant, qui est de, à travers des dizaines d'exercices, être capable de dégager ce qui lui paraît important. D'abord parce qu'il n'y en a pas beaucoup qui font des dizaines d'exercices, et puis en plus il y en a pas beaucoup qui font cet effort là.

Il n' y a pas de vecteur non plus ?

Non. Je vous montre un autre exemple de résolution dont je vous ai montré la méthode tout à l'heure. Il n'y a pas de rappel des éléments de la méthode.

Oui, je pense que c'est pareil. Pour l'étudiant super sérieux, ça ne peut pas poser problème. Pour celui qui va faire ça un peu rapidement qui va lire l'exercice qui va se rapporter à la méthode ça peut poser problème. Il va falloir voir qu'on n'a pas suivi une démarche logique. Moi je trouve que c'est dommage. C'est dommage de ne pas voir les points de la méthode. L'étudiant moyen, il va passer un peu de temps sur un matière, quand je dis souvent un peu, c'est un peu. Si on lui apporte des outils qui lui permette, qui l'aide à retenir les choses de manière correcte, ben c'est tant mieux. Si c'est pas le cas, il aura pas tout compris c'est tout. Donc typiquement là celui qui va revenir la méthode, qui va aller voir à chaque fois si ça correspond, à mon avis celui-là, il est rare. Moi je pense. Et puis avec le risque dans l'exercice après la méthode n'a pas été suivi exactement, ça va être embêtant.

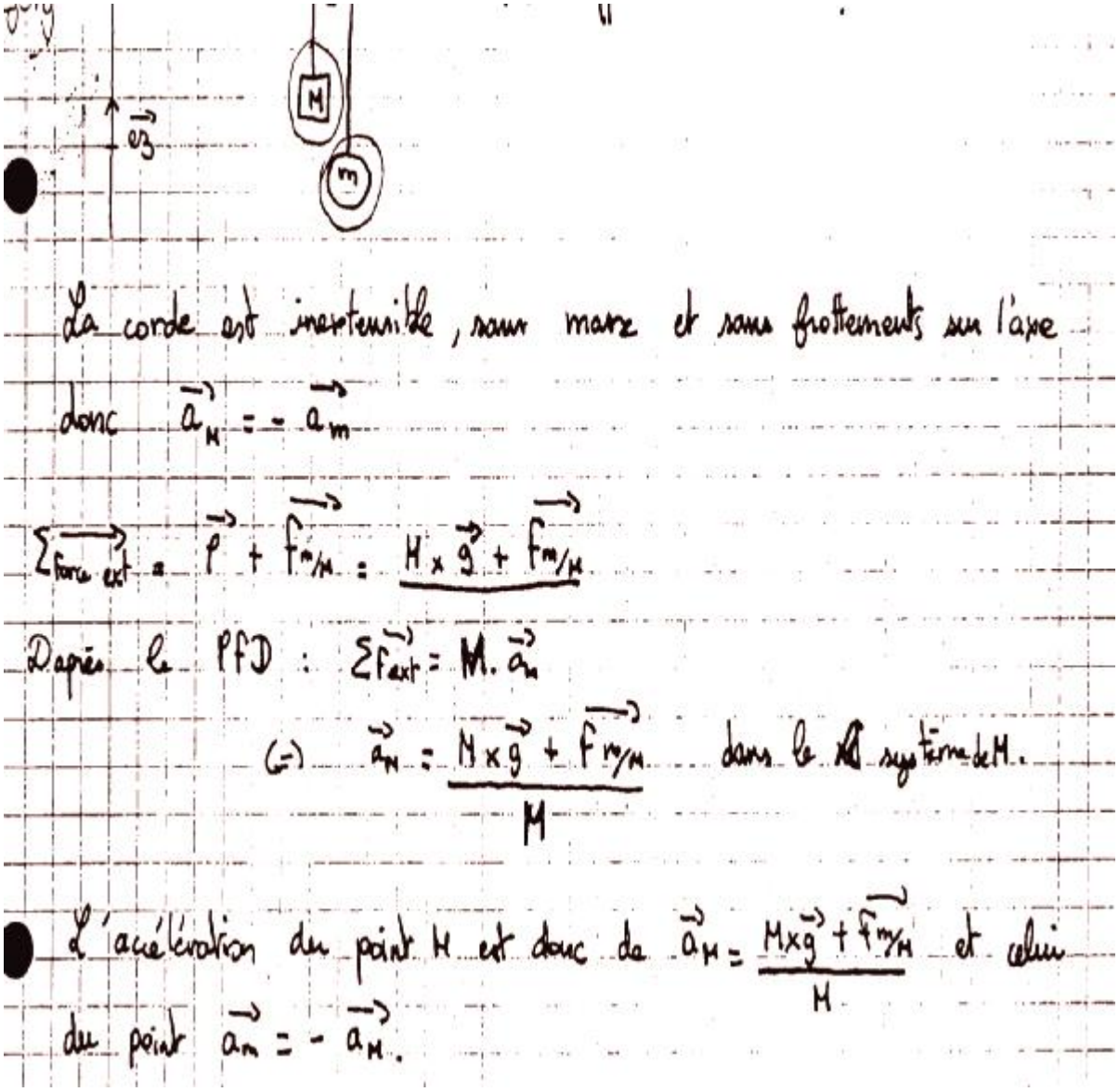
Donc, il faut bien choisir les étapes à mettre dans la méthode ?

Je pense que c'est très très important oui. D'autant plus que si on veut que ça marche dans tous les cas, parce que là on avait une méthode pour la dynamique. Il faut pas qu'elle soit trop détaillée parce qu'elle va marcher à quatre sur quatre. Parce que la difficulté c'est ça. Trouver une méthode, quand il y a des chapitres c'est simple, parce que, évidemment tous les exercices se ressemble. Il y en a mais je pense par exemple à cinématique, quand on regarde les exercices, il n'y en pas deux qui sont pareils. Je sais pas combien de méthode il y en a mais.

Annexe C1

Copies d'étudiants
Chapitre 6

Résolution de l'étudiant E1



La corde est inextensible, sans masse et sans frottements sur l'axe

donc $\vec{a}_M = -\vec{a}_m$

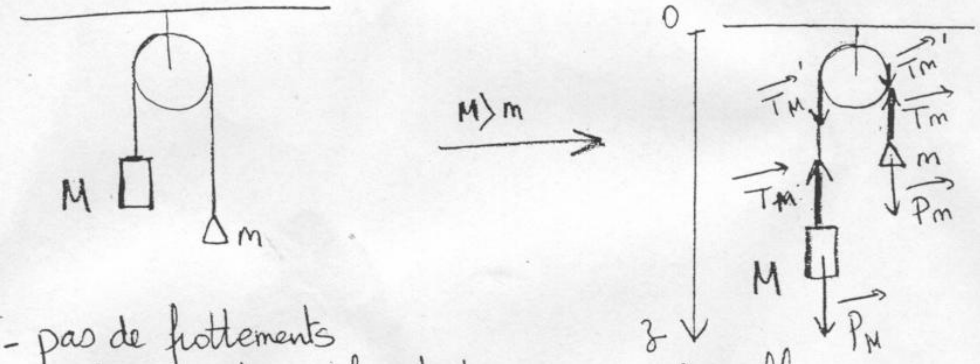
$\sum \overrightarrow{\text{force ext}} = \vec{P} + \vec{f}_{m/M} = \underline{M \times \vec{g} + \vec{f}_{m/M}}$

Daprès le PFD : $\sum \vec{F}_{ext} = M.\vec{a}_M$

$(-) \quad \vec{a}_M = \dfrac{M \times \vec{g} + \vec{f}_{m/M}}{M}$ dans le référentiel de M.

L'accélération du point M est donc de $\vec{a}_M = \dfrac{M \times \vec{g} + \vec{f}_{m/M}}{M}$ et celui du point $\vec{a}_m = -\vec{a}_M$.

Résolution de l'étudiant E2



- pas de frottements
- corde inextensible et de masse negligeable.

. réf terrestre supposé galiléen

. système $\{M+m\}$ de masse $(M+m)$

. bilan des forces : . le fil étant inextensible et de masse negligeable, les tensions se compensent de part et d'autre du fil

$\overrightarrow{T_M} = -\overrightarrow{T_M}'$ et $\overrightarrow{T_m} = -\overrightarrow{T_m}'$

. P_M et P_m ont des effets contraires sur l'evolution du système, la force subie par le système est :

$\|\overrightarrow{F_{ext}}\|$ = difference des poids.

→ En supposant $\{M\}$ va vers le bas et $\{m\}$ vers le haut, on peut dire : $\overrightarrow{F_{ext}} = \overrightarrow{P_M} + \overrightarrow{P_m}$

$$\|\overrightarrow{F_{ext}}\| = P_M - P_m.$$

. P.F.D : $\Sigma \overrightarrow{F_{ext}} = (m\overrightarrow{a})_{\{M+m\}}$

$\overrightarrow{F_{ext}} = (m\overrightarrow{a})_{\{M+m\}}$

projection suivant l'axe $\overrightarrow{Oz}$: $P_M - P_m = (M+m)\|\overrightarrow{a}_{\{M+m\}}\|$

$$(M-m)g. = (M+m)a_{\{M+m\}}.$$

$$\Rightarrow a_{\{M+m\}} = \left(\frac{M-m}{M+m}\right)g$$

l'accelération des deux masses est la même : $a_{\{M\}} = a_{\{m\}} = a_{\{M+m\}}$.

2

Résolution de l'étudiant E3

$M > m$ donc la masse M tombe.

Référentiel : terrestre galiéen
Système : la machine

* Accélération de la masse M :

$$\Sigma \vec{F}_{ext} = (M+m)\,\vec{a}_M$$

Il n'y a aucun frottement donc :

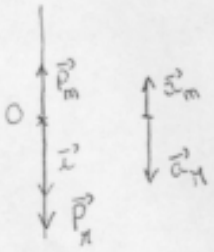
$$\vec{P}_M - \vec{P}_m = (M+m)\,\vec{a}_M$$

$$M\vec{g} - m\vec{g} = (M+m)\,\vec{a}_M$$

$$(M-m)\,\vec{g} = (M+m)\,\vec{a}_M$$

$$\vec{a}_M = \frac{M-m}{M+m}\,\vec{g}$$

$$a_M = \frac{M-m}{M+m}\,g$$



* Accélération de la masse m :

$$\Sigma \vec{F}_{ext} = (M+m)\,\vec{a}_m$$

$$\vec{P}_M - \vec{P}_m = (M+m)\,\vec{a}_m$$

$$(M-m)\,\vec{g} = (M+m)\,\vec{a}_m$$

$$\vec{a}_m = \frac{M-m}{M+m}\,\vec{g}$$

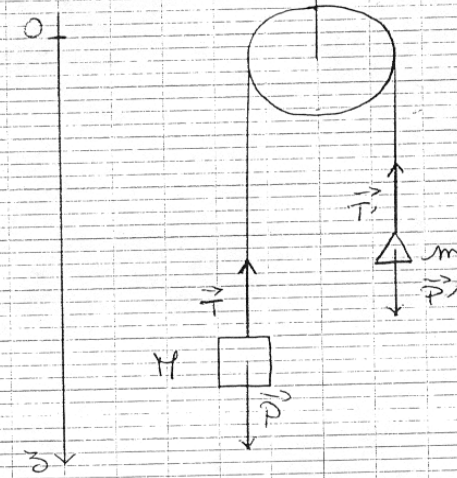
$$a_m = -\frac{(M-m)}{M+m}\,g = -a_M$$

car l'accélération des deux masses sont dans des sens opposés.

Résolution de l'étudiant E4
page 1/2

Mécanique

1.8. La machine d'Atwood



Système : les masses M et m. Référentiel : terrestre (supposé galiléen)

Bilan des forces :
- le poids $\vec{P}$ de la masse M : $\vec{P} = M\vec{g}$.
- la tension du fil attaché à la masse M : $\vec{T}$
- le poids $\vec{P}'$ de la masse m : $\vec{P}' = m\vec{g}$.
- la tension du fil attaché à la masse m : $\vec{T}'$.

On se place selon un axe vertical (O_z)
On applique le principe fondamental de la dynamique : $\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$

Résolution de l'étudiant E4
page 2/2

Pour la masse M :

$$\vec{T} + \vec{P} = M\vec{\gamma}_1$$

$$T' - Mg = M\gamma_1$$

$$\Rightarrow \gamma_1 = \frac{T - Mg}{M} = \frac{T}{M} - g.$$

Pour la masse m :

$$\vec{T'} + \vec{P'} = m\vec{\gamma}_2$$

$$T' - mg = m\gamma_2$$

$$\Rightarrow \gamma_2 = \frac{T' - mg}{m} = \frac{T'}{m} - g$$

La masse M étant supérieure à la masse m, on peut supposé que la petite masse serait entraînée par le poids de la grande masse.

On a alors :

$$\|\vec{T'}\| = \|\vec{P}\|$$

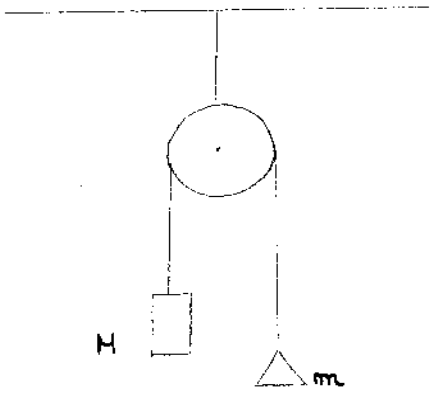
$$T' = Mg$$

$$\gamma = \frac{T' - mg}{m} = \frac{Mg - mg}{m} = \frac{(M-m)g}{m}.$$

$$\gamma = \frac{\text{Différence de masse}}{\text{masse entraînée vers le haut}} \times g.$$

Résolution de l'étudiant E5
page 1/2

Exercice 1.8 : Machine d'Atwood

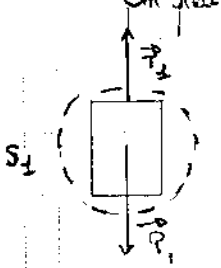


On définit deux systèmes : $S_1\{M\}$ et $S_2\{m\}$

Donc on a pour S_1

$\begin{cases} S_1\{M\} \text{ (La masse M ne varie pas au cours du temps).} \\ \text{Référentiel terrestre considéré galiléen} \end{cases}$

On peut donc appliquer la seconde loi de Newton :



donc on a $M\vec{\Gamma}_1 = \vec{P}_1 + \vec{T}_1$

or, comme on néglige les forces de frottements, la masse de la poulie ainsi que celle de la corde on a : $\vec{T}_1 = -m\vec{g}$.

donc on a : $M\vec{\Gamma}_1 = M\vec{g} - m\vec{g}$

$$\vec{\Gamma}_1 = \vec{g}\left(1 - \frac{m}{M}\right)$$

par projection on obtient :

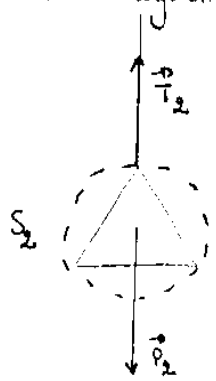
$$\Gamma_1 = g\left(1 - \frac{m}{M}\right)$$

donc l'accélération prise par la masse M est $\Gamma_1 = g\left(1 - \frac{m}{M}\right)$

car $1 - \frac{m}{M} > 0$

Résolution de l'étudiant E5
page 2/2

Pour le système $\begin{cases} S_2 = \{m\} : (m \text{ ne varie pas au cours du temps}) \\ \text{Référentiel terrestre considéré galiléen} \end{cases}$



On peut donc appliquer la deuxième loi de Newton :

$$m\vec{\Gamma}_2 = \vec{P}_2 + \vec{T}_2$$

Or comme on néglige les forces de frottement ainsi que la masse de la poulie et celle de la corde on a : $\vec{T}_2 = -M\vec{g}$

donc on a : $m\vec{\Gamma}_2 = m\vec{g} - M\vec{g}$

$$\vec{\Gamma}_2 = \vec{g}\left(1 - \frac{M}{m}\right)$$

or $1 - \frac{M}{m} < 0$ car $m < M$.

donc on a par projection :

$$\Gamma_2 = -g\left(1 - \frac{M}{m}\right)$$

Donc l'accélération prise par la masse m est $\Gamma_2 = -g\left(\frac{M}{m} - 1\right)$.

Résolution de l'étudiant E6
page 1/2

Exercice 1-8 : Machine d'Atwood.

Le système considéré est composé des 2 masses M et m, reliées par la corde inextensible.
hypothèses : - on négligera tous les frottements, la masse de la poulie et de la corde.
- M > m.

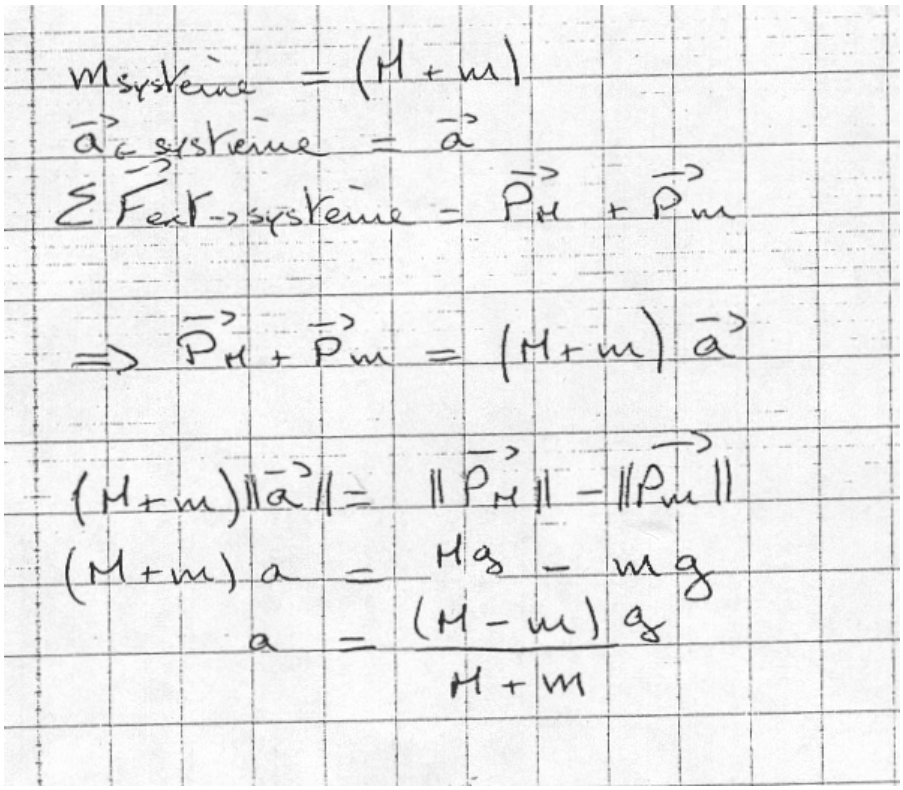
Pour calculer l'accélération de ce système on peut utiliser le principe fondamental de la dynamique :

$$\sum \vec{F}_{ext \to système} = m_{système} \vec{a}_{système}$$

Les forces extérieurs au système sont :
- Le Poid : $\vec{P}_M$ et $\vec{P}_m$

On a $\vec{P}_M = Mg$ et $\vec{P}_m = mg$
comme : $M > m \iff \vec{P}_M > \vec{P}_m$
C'est donc la masse M qui va descendre et la masse m qui va monter.
$\vec{P}_m$ s'oppose au mouvement du système (il est en sens contraire à $\vec{P}_M$ et à $\vec{a}$).

Résolution de l'étudiant E6
page 2/2



$m_{système} = (M + m)$

$\vec{a}_{\text{c-système}} = \vec{a}$

$\sum \vec{F}_{ext \to système} = \vec{P}_M + \vec{P}_m$

$\Rightarrow \vec{P}_M + \vec{P}_m = (M+m)\,\vec{a}$

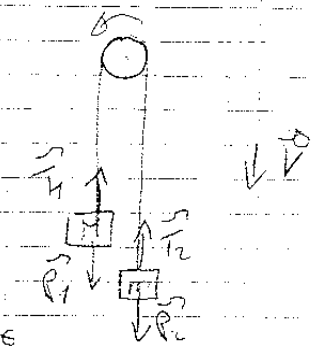
$(M+m)\,\|\vec{a}\| = \|\vec{P}_M\| - \|\vec{P}_m\|$

$(M+m)\,a = Mg - mg$

$a = \dfrac{(M-m)\,g}{M+m}$

Résolution de l'étudiant E7

DM n°2



1.8

Référentiel : galiléen terrestre

système 1 : la masse M — système 2 : la masse m

bilan des forces : $\vec{P_1}, \vec{T_1}$ — $\vec{P_2}, \vec{T_2}$

Utilisons la 2nd loi de Newton

$\Sigma \vec{F}_{ext} = M\vec{a}$ — $\Sigma \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$

$\vec{P_1} + \vec{T_1} = M\vec{a}$ — $P_2 - T_2 = -ma$

$P_1 - T_1 = Ma$ — $T_2 - mg = ma$

On a donc $\begin{cases} Mg - T_1 = Ma \\ T_1 - mg = ma \end{cases}$ (le fil est homogène $T_1 = T_2$)

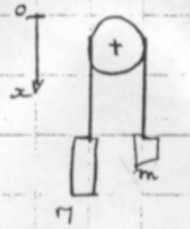
$\Rightarrow Mg - mg = Ma + ma$

$\Rightarrow a = \dfrac{Mg - mg}{M+m} = g\dfrac{(M-m)}{M+m}$

$a = g\dfrac{M-m}{M+m}$

Résolution de l'étudiant E8

1.8/



système : machine d'atwood
référentiel : terrestre galiléen
forces : $\vec{P}$; poid M
$\vec{P}$; poid m.

PFD $\quad \sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$

$\vec{P} + \vec{P} = m\vec{a}$ $\quad -mg$ car $\vec{P}$ est une force de rappel

projection $\quad Mg - mg = (M+m)\, a_x$

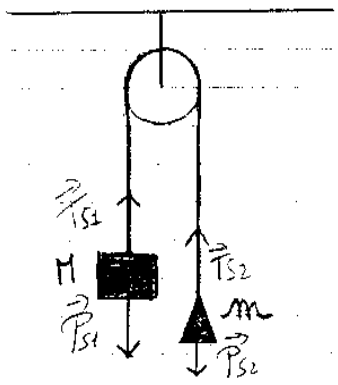
$$a_x = \frac{Mg - mg}{(M+m)}$$

$$\boxed{a_x = \frac{M-m}{M+m}\, g}$$

L'accélération acquise par les masses M et m est $a = \dfrac{M-m}{M+m}\, g$.

Résolution de l'étudiant E9
page 1/2

1.8.



Machine d'Atwood

hypothèses.

* on néglige :
  - tous les frottements
  - la masse de la poulie
  - la masse de la corde
* la corde est inextensible
* $M > m$.

Référentiel : terrestre (supposé galiléen)

Système = $S_1\{M\}$ et $\{m\} = S_2$

Bilan des forces :

Forces à distance :

$\vec{P}_{S1} = M\vec{a}$ $\quad$ $P_{S2} = m\vec{a}$

Remarque : $\|\vec{P}_{S1}\| > \|\vec{P}_{S2}\|$

Forces de contact :

$\vec{T}_{S1}$ $\quad$ $\vec{T}_{S2}$

Les systèmes S_1 et S_2 ne sont pas au repos.

Appliquons le principe fondamental de la dynamique sur S_1 et S_2 :

$$\boxed{\sum \vec{F}_{ext/syst} = m\vec{a}}$$

D'où $\vec{T}_{S1} + \vec{P}_{S1} = m\vec{a}_{S1}$

$\Rightarrow \vec{T}_{S1} + m\vec{g} = m\vec{a}_{S1}$

$\Leftrightarrow \boxed{\vec{a}_{S1} = \frac{\vec{T}_{S1}}{m} + \vec{g}}$

De même, on a : $\boxed{\vec{a}_{S2} = \frac{\vec{T}_{S2}}{M} + \vec{g}}$

Nous avons donc trouvé l'accélération d'une part de la masse m et d'autres part de la masse M. Nous allons donc maintenant supposer que le système est $S_3 = \{m+M\}$, afin de trouvé son accélération :

Système : $\{m+M\}$

Référentiel : terrestre (galiléen)

Bilan des forces :

$\vec{P}_{S3} = (m+M)\vec{g}$ (forces à distance)

$\vec{T}_{S3} = \vec{T}_{S1} + \vec{T}_{S2}$ (forces de contact)

Appliquons le principe fondamental de la dynamique :

$\vec{T}_{S2} + \vec{T}_{S1} = (m+M)\vec{a}_{S3}$

$(m+M)\vec{g} + \vec{T}_{S3} = (m+M)\vec{a}_{S3}$

$$\boxed{\vec{g} + \frac{\vec{T}_{S3}}{m+M} = \vec{a}_{S3}}$$

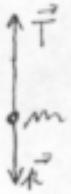
Résolution de l'étudiant E10
page 1/2

1.8.:



Tout l'exercice est pris dans un référentiel Galiléen.

Dans le système ① $\{m\}$:
Les forces appliquées sur le système sont:
- le poid $\vec{P} = m\vec{g}$
- la tension $\vec{T}$



Le système est en mouvement accéléré, donc
$$\vec{T} + \vec{P} = m\vec{a}_{(t)}$$
$$T = ma + mg$$

Dans le système ② $\{M\}$:
Les forces appliquées sur ce système sont:
- le poid $\vec{P} = M\vec{g}$
- la tension $\vec{T}$



Résolution de l'étudiant E10
page 2/2

Le système est en mouvement accéléré donc,

$\vec{T} - \vec{P} = -M\vec{a}_{c(t)}$

$T = -Ma_c + Mg$

En reliant les deux équation (T=T étant la même) on obtient :

$-Ma_{c(t)} + Mg = ma_{c(t)} + mg$ $\quad \|\vec{a}_{c(t)}\| = \|\vec{a}_{c(t)}\| = a_{(t)}$

$(m+M)a_{c(t)} = (M-m)g$

$$a_{(t)} = \frac{(M-m)}{(M+m)}g$$

Résolution de l'étudiant E11
page 1/2

Exercice 1.8

Référentiel terrestre supposé galiléen.

Système étudié : masse m.

Bilan des forces : $\vec{P}$, $\vec{T_1}$ ($\vec{T_1}$ = tension de corde sur masse)

Principe de dynamique des forces :

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

L'accélération est celle du centre de gravité de la masse (centre de masse)

$$\Leftrightarrow \vec{P} + \vec{T_1} = m\vec{a}$$

$$\Leftrightarrow \vec{a} = \vec{g} + \frac{\vec{T_1}}{m}$$

Système étudié : masse Π.

Bilan des forces : $\vec{P}$, $\vec{T_2}$ ($\vec{T_2}$ = tension de corde sur masse)

Principe de dynamique des forces :

$$\sum \vec{F} = \Pi\vec{a}$$

$$\Leftrightarrow \vec{P} + \vec{T_2} = \Pi\vec{a}$$

$$\Leftrightarrow \vec{a} = \vec{g} + \frac{\vec{T_2}}{\Pi}$$

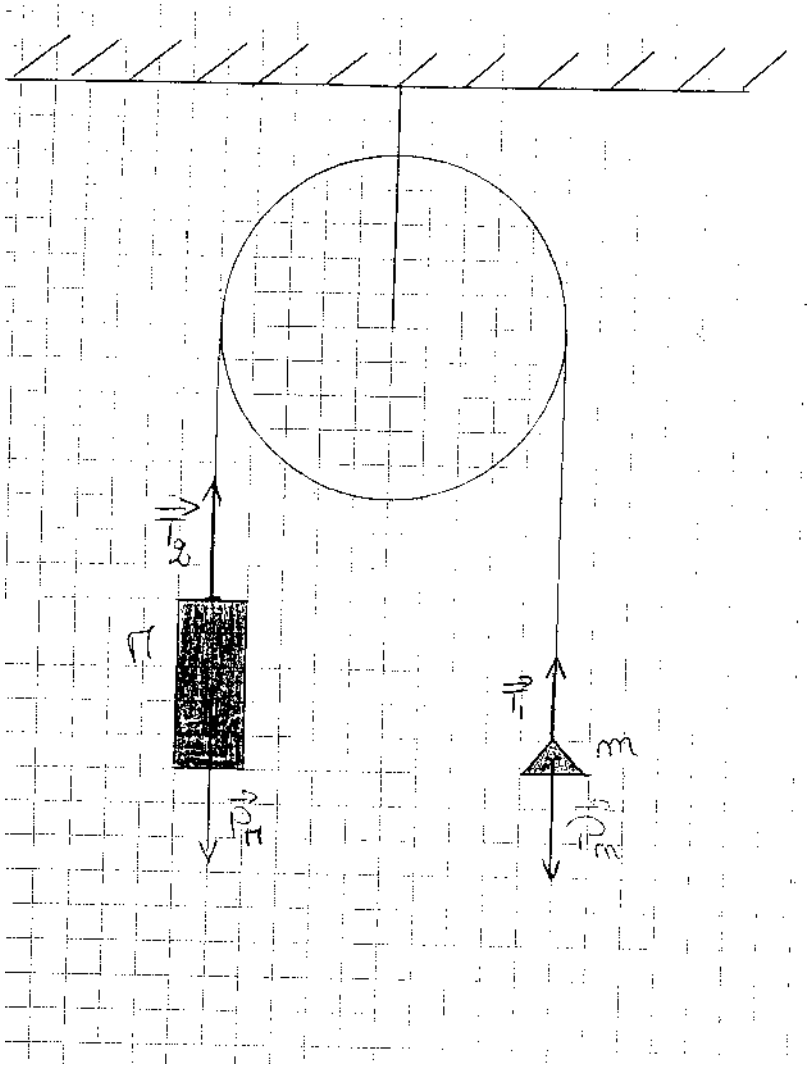
La corde est inextensible, les frottements sont négligés et les masses de la poulie et de la corde sont négligées donc l'accélération de Π et m est la même.

Donc $\vec{a} = \vec{g} + \frac{\vec{T_1}}{m} = \vec{g} + \frac{\vec{T_2}}{\Pi}$

$$\|\vec{a}\| = g - \frac{\|\vec{T_1}\|}{m} = g - \frac{\|\vec{T_2}\|}{\Pi}$$

Remarque : $\Pi = T_2$ donc $T_2 > T_1$.

Résolution de l'étudiant E11
page 2/2



Résolution de l'étudiant E12
page 1/2

Exercice : 1.8

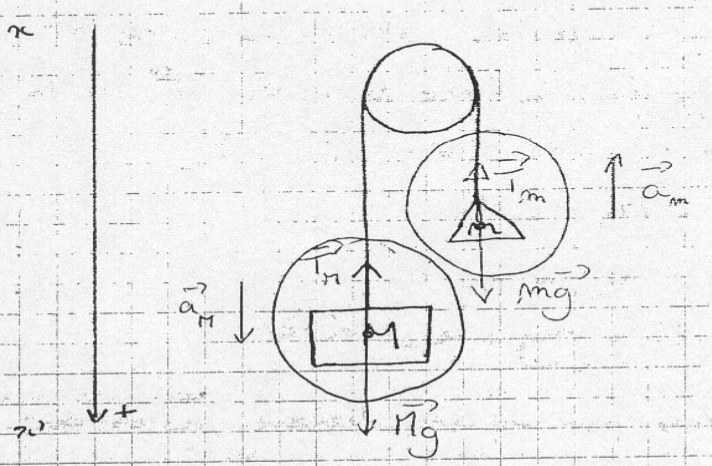
La machine d'Atwood:

Conditions : $m < M$

Masse de la corde négligée

Frottements de la poulie négligés

Objectif : Calculer l'accélération de M.



Remarque : $M > m$ donc la masse M descend tandis que la masse m remonte. D'où les vecteurs d'accélération $\vec{a}_M$ et $\vec{a}_m$ des 2 masses tels que sur le schéma.

$S_1 = \{\text{masse M}\}$

Bilan des forces : $\vec{T}_M$ (force de rappel), $\vec{Mg}$ (poids)

Application du théorème fondamental de la dynamique :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$$

$$\vec{T}_M + \vec{Mg} = M\vec{a}_M$$

En projetant sur l'axe vertical (descendant) :

$$-T_M + Mg = M \cdot a_M$$

alors $a_M = \dfrac{Mg - T_M}{M}$ ①

$S_2 = \{$ masse $m\}$

bilan des forces : $\vec{T}_m$, $m\vec{g}$

PFD : $\vec{T}_m + m\vec{g} = m\vec{a}_m$

En projetant sur (descendant) : $-T_m + mg = -m a_m$

$$a_m = \frac{T_m - mg}{m}$$

Or, puisque la masse de la poulie, celle de la corde et les frottements sont négligés, la force de tension $\vec{T}_m$ est la même en tout point de la corde. Soit : $\vec{T}_M = \vec{T}_m$.

Or d'après ① : $T_M = Mg - a_M M$

et d'après ② : $T_m = mg + a_m \cdot m$

alors $Mg - a_M \cdot M = mg + a_m \cdot m$ ③

Or m et M sont reliés par une corde tendue, ils ont donc la même accélération en norme (mais de sens contraire).

Dans ③ : $Mg - a_M \cdot M = a_M \cdot m + mg$

alors $\boxed{a_M = \left(\dfrac{M-m}{M+m}\right) g}$

Remarque :

$M - m < M + m$ (car $m > 0$)

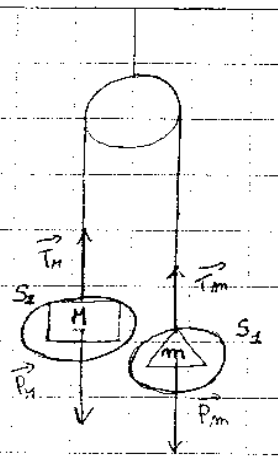
d'où $\dfrac{M-m}{M+m} < 1$

alors l'accélération sera plus faible que g, ce qui est intuitif.

Résolution de l'étudiant E13
page 1/2

Exercice 1.8 :

Machine d'Atwood



Hypothèses de départ :

→ tous les frottements sont négligeables

→ les masses de la poulie et de la corde sont négligeables

→ la corde est inextensible

→ $M > m$

Référentiel : galiléen

Système : il y a 2 systèmes : $S_1 : \{m\}$ et $S_2 : \{M\}$

Bilan des forces à S_1 :

* forces à distance :

$\vec{P}_m = m\vec{g}$

* forces de contact :

$\vec{T}_m$ (frottements négligeables)

Résolution de l'étudiant E13
page 2/2

On applique le principe fondamental de la dynamique :

$$\vec{P}_m + \vec{T}_m = m\vec{a}_m$$

d'où $$\boxed{\vec{a}_m = \frac{m\vec{g} + \vec{T}_m}{m} = \vec{g} + \frac{\vec{T}_m}{m}}$$

Bilan des forces à S2 :

* forces à distance :

$$\vec{P}_M = M\vec{g}$$

* forces de contact :

$$\vec{T}_M$$

(frottements négligeables)

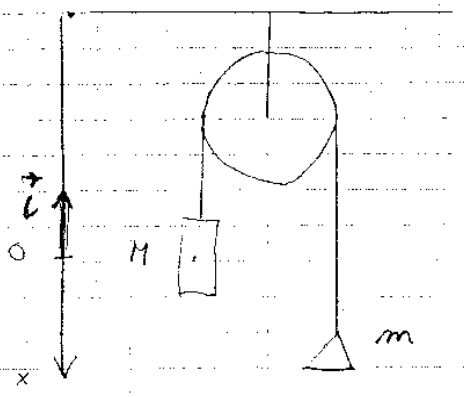
On applique le principe fondamental de la dynamique :

$$\vec{P}_M + \vec{T}_M = M\vec{a}_M$$

d'où $$\boxed{\vec{a}_M = \frac{M\vec{g} + \vec{T}_M}{M} = \vec{g} + \frac{\vec{T}_M}{M}}$$

Résolution de l'étudiant E14

Exercice 1.8



M > m

- M descend de Δx pendant Δt
- m monte de Δx pendant Δt
- les modules et la direction de $\vec{a}$ sont identiques, mais sont de sens opposé

• système : {M} : $\vec{P}_M = -M g_0 \vec{i}$

$\vec{T}_M = |\vec{T}_M| \vec{i}$

PFD : $\vec{P}_M + \vec{T}_M = M \vec{a}_M$

projection sur Ox : $-M g_0 + |\vec{T}_M| = -M a$ (1)

• système : {m} : $\vec{P}_m = -m g_0 \vec{i}$

$\vec{T}_m = |\vec{T}_m| \cdot \vec{i}$

PFD : $\vec{P}_m + \vec{T}_m = m \vec{a}_m$

projection sur Ox : $-m g_0 + |\vec{T}_m| = m a$ (2)

$|\vec{T}_m| = |\vec{T}_M| = T$

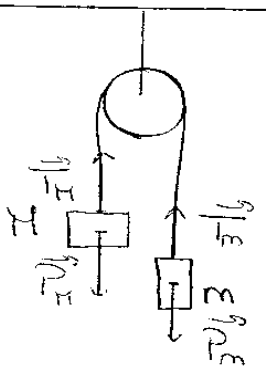
$-M g_0 + T = -M a$ (1')

$-m g_0 + T = m a$ (2')

$$a = \frac{M-m}{M+m} g_0$$

Résolution de l'étudiant E15

U.8 Exercice de tronc commun



On néglige les frottements, les masses de la poulie et de la corde.
De plus la corde est inextensible.
M > m.

On se place dans un référentiel terrestre et à l'équilibre donc les forces se compensent sur chaque masse.
Quand le système est M:
$\vec{P_M} + \vec{T_M} = \vec{0}$ donc $\|\vec{P_M}\| = Mg$ et $\|\vec{T_M}\| = \|-Mg\|$
Quand le système est m:
$\vec{P_m} + \vec{T_m} = \vec{0}$ donc $\|\vec{P_m}\| = mg$ et $\|\vec{T_m}\| = \|-mg\|$

On applique la 2e loi de Newton pour connaître l'accélération des masses:

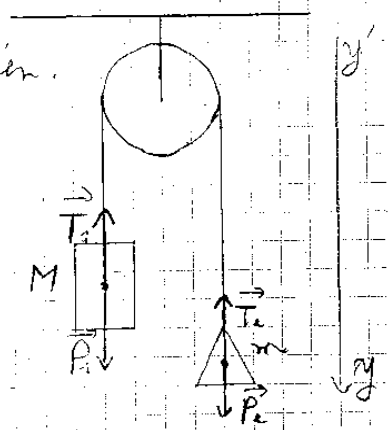
$$\begin{cases} \vec{P_M} + \vec{T_M} = M\vec{a} \\ \vec{P_m} + \vec{T_m} = m\vec{a} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} Mg + Mg = Ma \\ mg + mg = ma \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} 2g = a \\ 2g = a \end{cases}$$

Donc l'accélération acquise par les masses est $a = 2g$.

Résolution de l'étudiant E16
page 1/2

Exercice 1.S:



* Le référentiel est terrestre donc galiléen.

* Le système: $S_1 = \{\text{La masse M}\}$
- Les forces exercées sur S_1: $\vec{P_1}$, $\vec{T_1}$, Frottements visqueux (négligés)
- PFD: $\vec{P_1} + \vec{T_1} = M\vec{a}_{S_1}$
Il n'y a pas de mouvement horizontal donc on projette sur l'axe vertical (y y'):
$\|\vec{P_1}\| - \|\vec{T_1}\| = M a_{S_1}$
$Mg - \|\vec{T_1}\| = M a_{S_1}$
$\boxed{\|\vec{T_1}\| = M(g - a_{S_1})}$

* Le système: $S_2 = \{\text{La masse m}\}$
- Les forces exercées sur S_2: $\vec{P_2}$, $\vec{T_2}$, Frottements visqueux (négligés)
- PFD: $\vec{P_2} + \vec{T_2} = m\vec{a}_{S_2}$
Il n'y a pas de mouvement horizontal donc on projette sur l'axe vertical (y y'):
$\|\vec{P_2}\| - \|\vec{T_2}\| = m a_{S_2}$
$mg - \|\vec{T_2}\| = m a_{S_2}$
$\boxed{\|\vec{T_2}\| = m(g - a_{S_2})}$

D'après les conditions de l'exercice (masse de la poulie et ie la corde négligeable et frottements négligeable) on obtient:
$\|\vec{T_1}\| = \|\vec{T_2}\|$
$M(g - a_{S_1}) = m(g - a_{S_2})$
Quand la mass comme la corde est tendue alors $\|\vec{a}_{S_1}\| = \|\vec{a}_{S_2}\|$

Résolution de l'étudiant E16
page 2/2

$x_{S_2} = -a_{S_2}$ d'où :

$M(g - a_{S_1}) = m(g + a_{S_1})$

$g - M a_{S_1} = m g + m a_{S_1}$

$(m+M)\, a_{S_1} = (M-m)\, g$

$a_{S_1} = \frac{M-m}{M+m} g$ et donc

$S_2 = \frac{m-M}{m+M} g$ mais :

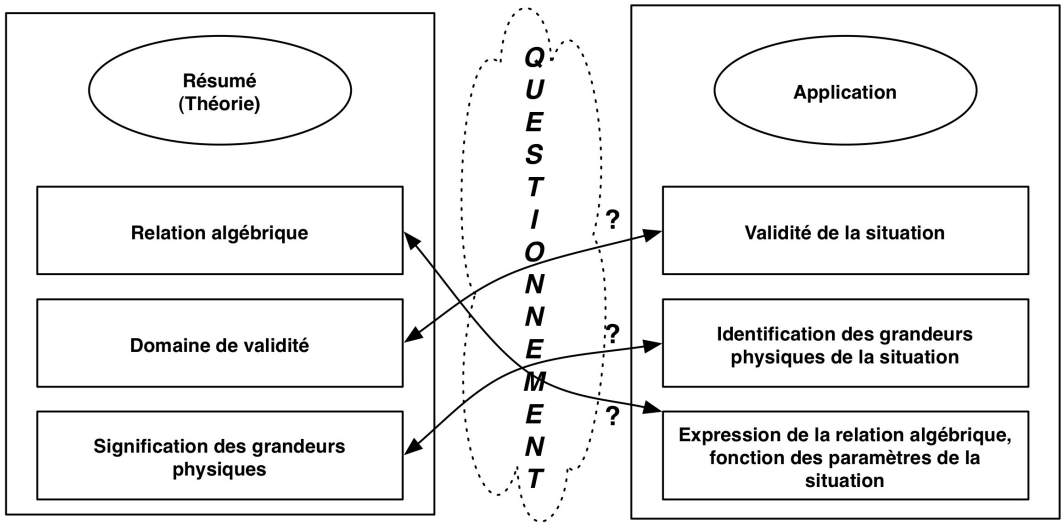
$\| \vec{a}_{S_1} \| = \| \vec{a}_{S_2} \| = \frac{M-m}{M+m} g$ car $M > m$

Annexe C2

Fiches Méthodologiques à la disposition de l'étudiant pour la résolution du problème présenté au Chapitre 7

I Acquisition et utilisation d'une nouvelle connaissance

Comment procéder lorsqu'un exercice aborde une notion que vous ne connaissez pas *(ou que vous ne maîtrisez pas encore)*



1- Construire une information théorique complète sur cette nouvelle connaissance.

a- Chercher cette connaissance dans des ouvrages de référence (cours, manuels, etc...)

b- Quelles sont les caractéristiques des situations physiques dans lesquelles la notion théorique est valide? Définir le domaine de validité.

c- Que désignent chacun des termes de l'expression algébrique ?

d- Rédiger un résumé : que faut il retenir ?

2- Adapter cette connaissance théorique générale au cas particulier du problème que vous traitez.

a- Vérifier que les caractéristiques de la situation physique traitée dans l'exercice sont dans le domaine de validité de l'expression théorique.

b- Ecrire l'expression algébrique adaptée au cas de l'exercice : avec les symboles adoptés dans cette situation particulière, et en contrôlant que ces symboles désignent bien les paramètres adéquats de cette situation.

3-Utiliser cette approche pour la recherche d'erreurs

- Vérifiez que l'expression est utilisée dans son domaine de validité (1-b + 2-a).

- Vérifier que l'expression algébrique théorique a été correctement adaptée à la situation de l'exercice (1c + 2b).

ETUDE DE "CAS LIMITES"

A quoi sert l'étude de cas limites ?

- A explorer qualitativement la situation physique étudiée : la connaissance du comportement* quantitatif du dispositif physique étudié, dans un (ou des) cas particulier(s), permet de prédire un certain nombre de choses sur le comportement* quantitatif général du dispositif. (Il reste ensuite à les démontrer par les lois de la physique.)

- A vérifier les résultats obtenus. Les résultats obtenus par la résolution du problème doivent être cohérents avec les valeurs connues (sans calcul) pour des cas particuliers : une incohérence révèle une erreur.

(*comportement quantitatif du dispositif = l'expression algébrique (ou la valeur numérique) de la grandeur physique recherchée dans le problème posé)

Qu'est-ce qu'un "cas limite" ?

- En fait, c'est un abus de langage, il s'agit de cas particuliers. Mais très souvent, ces cas intéressants, dont le comportement est connu, se situent à la limite de la situation étudiée. Il est donc toujours intéressant d'aller explorer les limites de la situation posée, pour voir si on connaît le comportement du dispositif pour ces cas limites.

- Un "cas limite" est souvent défini par un couple :
  - la valeur (limite) prise par la grandeur physique (paramètre) qui caractérise le "cas limite".
  - la valeur de la grandeur physique recherchée (qui caractérise le comportement du dispositif).

Comment procéder ?

1- Rechercher des cas limites :
   a- Identifier les grandeurs physiques qui caractérisent la situation en jeu.
   b- Identifier le domaine de validité de la situation physique étudiée ? (domaines de validité des principales grandeurs physiques)
   c- Existe-t'il un (des) cas particulier(s) pour lesquel(s) on connaît le comportement du dispositif?
      ⇨ définir alors les valeurs particulières prises par les paramètres de la situation.

(2- Prédire ce qui va se passer dans le cas général : quelles informations nous sont données par ces cas particuliers, sur le comportement général?)

(3- Résoudre le problème.)

4- Contrôle et analyse des résultats quantitatifs obtenus (au 3-)
   a- Détections d'erreurs éventuelles
   Les résultats obtenus (3-) doivent être cohérents avec les "cas limites" envisagés
   (On doit retrouver le comportement connu du cas limite : l'expression algébrique du résultat, doit donner une valeur correspondant à la valeur du cas limite (donnée au 1-c-).
   (b- Analyse du comportement général du dispositif
   Examiner le comportement (quantitatif et qualitatif) du dispositif : comment varient les grandeurs physiques recherchées si on agit sur tel paramètre? Vérifier la cohérence avec les prédictions faites au 2-.)

Exemple :

Un conducteur de résistance R et un condensateur de capacité C sont reliés en série avec un générateur qui délivre une tension continue. On veut calculer l'intensité du courant dans le circuit.

1- Recherche des cas limites

1-a Grandeurs physiques qui caractérisent la situation : E, R, C et I *(et pour être complet, le temps...)*

Grandeur physique recherchée ? I Paramètres de la situation : E, R et C

1-b Domaines (théoriques : pas expérimentaux!) de validité des paramètres : R=[0, ∞[C=[0, ∞[E=[0, ∞[

1-c Identifier les cas particuliers intéressants : rechercher les valeurs de E, R et C pour lesquelles on connaît le comportement de I

1ère méthode : Comment peut-on obtenir une valeur nulle pour I? si E = 0 ou bien si R est ∞ ou si C=0.

2ème méthode : Explorer les valeurs limites des paramètres

si R→∞ : circuit ouvert : I=0

(pour R→O : I? pas raisonnable : Court-circuit, problème de sécurité, de protection des appareils)

si E = 0 : circuit ouvert : I=0 (E→∞ pas raisonnable)

si C→∞ : circuit fermé = simple circuit (générateur, résistance) où I=E/R connu

si C = 0 : circuit ouvert : I=0

(3-Résolution **:** après écriture et résolution des équations, on trouve $I = \frac{E}{R} e^{-t/RC}$ **)**

4-a Vérification avec les "cas limites" :

si C→0 $\frac{1}{RC}$ →∞ et $e^{-t/RC}$ → 0 l'expression algébrique de I donne bien I=0

si C→∞ $\frac{1}{RC}$ →0 et $e^{-t/RC}$ →1 donc on obtient bien I=E/R

etc...

Il y a bien cohérence entre la prédiction dans l'analyse qualitative et les résultats obtenus lors de la résolution.

4-b Analyse des résultats : (analyse de l'expression $I = \frac{E}{R} e^{-t/RC}$ en utilisant les "cas limites")

I a une valeur maximale E/R lorsque t=0, qui décroît exponentiellement avec le temps.

- si R augmente, la valeur maximale de I (E/R) diminue, mais I décroît plus rapidement avec le temps. A la limite E/R = 0 si R→∞ , donc I est toujours nulle quelles que soient les valeurs de E et C.

- si C augmente, cela n'influe pas sur la valeur maximale de I (E/R); par contre I décroît plus rapidement avec le temps. A la limite, si C→∞, I ne varie plus et a la valeur E/R. Si C=0, I = 0 à cause de l'exponentielle qui donne toujours 0.

ANALYSE DIMENSIONNELLE

Grandeur physique = toute caractéristique quantifiable (mesurable) d'un système physique *: masse, vitesse, charge, température, ... Contre-exemples : beauté, intelligence, ...*

Grandeurs physiques fondamentales : toutes les grandeurs physiques peuvent être définies à partir d'un très petit nombre de grandeurs physiques appelées "grandeurs fondamentales" et choisies arbitrairement.
Il y a sept grandeurs fondamentales en physique.
En mécanique, on en utilise essentiellement trois : Temps, Longueur, et Masse.

Grandeur fondamentale	Unité S.I. (unité de base)	Symbole de l'unité S.I.	Symbole de la dimension
Temps	seconde	s	[T]
Longueur	mètre	m	[L]
Masse	kilogramme	kg	[M]
Intensité de courant	Ampère	A	[I]
Température thermodynamique	degré Kelvin	°K	[θ]
Intensité lumineuse	Candéla	Cd	[J]
Quantité de matière	Mole	mol	

Grandeurs physiques dérivées : toutes les autres grandeurs physiques sont dites dérivées, car elles peuvent être obtenues par multiplication, division, puissance, ... des 7 grandeurs fondamentales.
La vitesse moyenne d'un mobile sur un trajet est la distance parcourue divisée par le temps de trajet : une vitesse peut donc être obtenue en divisant une longueur par un temps. La vitesse est donc une grandeur physique dérivant d'une longueur et de l'inverse d'un temps.

Dimension d'une grandeur fondamentale = symbole associé à chaque grandeur fondamentale (voir tableau).
Dimension d'une grandeur dérivée = la dimension s'exprime en fonction des dimensions des grandeurs fondamentales, et on parle de l'**équation aux dimensions** d'une grandeur dérivée. La dimension se note entre crochets. *La vitesse moyenne v sur la distance d parcourue en un temps t : $v = d / t$.*
$[v] = [d] / [t] = [L] / [T] = [LT^{-1}]$. $[v] = [LT^{-1}]$ se lit " la dimension de v est L, T moins un ".

Remarque : On a choisi un symbole particulier et unique pour exprimer la dimension d'une grandeur physique fondamentale. On n'utilise pas les symboles des unités pour cela, car il existe un grand nombre d'unités différentes, donc de symboles différents pour une seule et même grandeur physique. *Le Newton, le dyne, le $kg.m.s^{-2}$, le $Pa.m^2$, etc..., sont toutes des unités de force, trois sont équivalentes dans le système S.I.*

Remarque : certaines grandeurs sont sans dimension, mais se mesurent et par conséquent possèdent des unités.
Un angle n'a pas de dimension, mais c'est une grandeur physique puisqu'il est mesurable. Démonstration : $l = r \alpha$, où l longueur d'un arc de cercle, r rayon, α angle au centre : $[\alpha] = [r / l] = [L / L] = [.]$

HOMOGENEITE D'UNE EQUATION : Une équation est dite "homogène" si les conditions suivantes sont vérifiées. ("homogène" = "cohérent du point de vue de la dimension physique")

Règles du calcul dimensionnel :

1- L'équation aux dimensions d'une grandeur physique peut-être établie à partir de n'importe quelle relation liant cette grandeur aux grandeurs fondamentales (ou à des grandeurs dérivées dont on sait déterminer la dimension).
2- Les 2 membres d'une égalité sont de même dimension. *vitesse = vitesse*.
3- On ne peut additionner ou soustraire que des grandeurs de même dimension. *vitesse + vitesse*
4- Le produit (ou le quotient) de 2 grandeurs physiques a la dimension du produit (ou du quotient) des dimensions de ces 2 grandeurs. Par extension, le carré (cube, racines diverses, et toutes puissances

réelles ...) d'une grandeur a la dimension du carré (cube, racines diverses, et toutes puissances réelles ...) de la dimension de la grandeur initiale. $[v^{3/2}] = [LT^{-1}]^{3/2} = [L^{3/2}\ T^{-3/2}]$

5- L'argument de toutes les autres fonctions usuelles (log, exp, sin, cos, tan, ...) est sans dimension.

6- Intégration/dérivation : la dimension de la grandeur physique par rapport à laquelle on intègre (ou dérive) doit être prise en compte : le "petit élément de longueur" (de temps, d'angle, ...), noté dx (dy, dt, dα ...), est à traiter comme toute autre grandeur physique. $[dx] = [dy] = [L]$, $[dt] = [T]$

7- Les constantes numériques n'entrent pas en ligne de compte. *$[1/2\ mv^2] = [mv^2]$: le 1/2 n'est pas une grandeur physique, il n'a ni unité, ni dimension. Idem pour e et π. Faux par contre pour les constantes physiques comme G ou ε_0, qui sont des grandeurs physiques, avec unité et dimension.*

Remarque :

Vecteurs et scalaires se traitent de manière identique : un vecteur a la même dimension que sa norme; les produits entre vecteurs se traitent comme un produit entre scalaires.

A QUOI SERT L'ANALYSE DIMENSIONNELLE :

- Identifier la nature des grandeurs physiques utilisées, savoir quelles unités utiliser. *On ne peut appeler force le résultat d'une expression ayant la dimension d'une énergie*.
- Vérifier l'homogénéité (cohérence dimensionnelle) d'une expression. O*n ne peut pas additionner des masses avec des longueurs.*
- Détecter la présence d'erreurs dans une expression, à partir d'une incohérence dimensionnelle.
- Identifier et corriger certaines erreurs dans un calcul ou un raisonnement.
- Fournir des indications pour compléter une "formule", lorsque la mémoire fait défaut.
- ...

1- Connaître (ou savoir retrouver) **la dimension des principales grandeurs physiques** que l'on manipule, et leurs relations dimensionnelles, est la base du savoir-faire de l'analyse dimensionnelle.

En mécanique :

- Connaître, savoir retrouver, les dimensions d'une force, vitesse, accélération, énergie, moment cinétique, quantité de mouvement.
- Comparer leurs dimensions pour connaître la nature de leurs relations dimensionnelles.

$[force]=[MLT^{-2}] =[M]\ .\ [LT^{-2}]= [masse][accélération]= [ML^2T^{-2}]/[L]=[énergie]/[distance]$

2- Détecter et identifier des erreurs

- Vérifier l'homogénéité de l'expression que l'on veut contrôler.
- Relever l'incohérence et sa nature dimensionnelle, remonter les calculs pour identifier où se trouve la source de l'incohérence.

Incohérence : force + accélération + force = force

Comme [force]= [masse][accélération] cette incohérence indique probablement que la masse a été oubliée dans le 2nd terme. Il suffit de "pister" la dimension de ce terme, en remontant le déroulement des calculs pour retrouver l'endroit précis de l'erreur.

3- Compléter une expression algébrique ("formule") dont on ne se souvient pas précisément.

- cas (a) : Ecrire ce dont on se souvient de l'expression, c'est à dire une expression incomplète
  cas (b) : Faire une ou plusieurs hypothèses sur son expression, c'est à dire écrire 1, 2 ou 3 expressions complètes hypothétiques.
- cas (a) : Faire l'analyse dimensionnelle de l'expression incomplète et comparer cette dimension avec ce que l'on devrait avoir : cela donne la nature dimensionnelle de ce qui manque.
  cas (b) : Faire l'analyse dimensionnelle des différentes expressions hypothétiques : la bonne expression a des chances d'être celle qui a la bonne dimension

Exemple1*- Recherche de l'expression de l'énergie cinétique : E = 1/2 m v ou 1/2 m v^2 ?*
$[E] = [ML^2T^{-2}]$ et $[1/2\ m\ v] = [M\ LT\text{-}1]$: ça ne marche pas!
Par contre $[1/2\ m\ v^2] = [M][L\ T^{-1}]^2 = [ML^2T^{-2}]$ est correct du point de vue dimensionnel.
Mais si c'est le 1/2 qui a été oublié, l'analyse dimensionnelle n'aidera pas du tout.

Exemple 2- *Recherche de l'expression du théorème du moment cinétique : on se souvient de quelque chose de la forme : On écrit que est égal à* $[? \wedge \vec{F}] = [? \, MLT^{-2}]$ *d'où [?] = [L] : le terme manquant a la dimension d'une longueur.*
(L'expression de ce théorème est $\frac{d\vec{L}_O}{dt} = \overrightarrow{OM} \wedge \vec{F}$ *)*

APPLICATIONS ET EXERCICES

1- Construire un formulaire, résumant les équations aux dimensions de toutes les grandeurs physiques courantes utilisées dans ce cours de mécanique du point matériel.
- En parcourant le cours et les TD, identifier et établir une liste de toutes ces grandeurs.
- Etablir l'équation aux dimensions de chaque grandeur, et préciser l'unité (les unités) S.I..
- Comparer les dimensions des grandeurs les plus courantes (énergie/force, ...)

2- Deux sac de masses m1 et m2 (m2>m1), sont suspendus aux extrémités d'une corde via des poulies. On calcule l'accélération $\vec{a}_1$ du sac m1. Parmi les solutions proposées ci-dessous, indiquer celles qui sont correctes du point de vue dimensionnel. En vous appuyant sur d'autres arguments, que vous préciserez, éliminez les solutions qui vous semblent déraisonnables.

a) b)

c) $\|\vec{a}_1\| = \frac{m_1(m_1 - m_2)}{m_2(m_1 + m_2)} g_0$ d)

e) $\|\vec{a}_1\| = \frac{m_1 + m_2}{m_1 - m_2} g_0$ f)

g)

3- La résolution de l'exercice ci-dessous, comporte des erreurs. Utiliser l'analyse dimensionnelle pour détecter, caractériser et corriger ces erreurs.

4- Vérifier l'homogénéité des expressions suivantes, et proposer une expression plausible (lorsque c'est possible) :

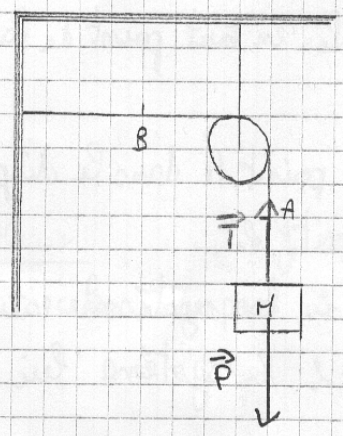
a) $\vec{F}_{ie} = -\vec{\gamma}_0 - m\,\vec{\omega} \wedge \left(\vec{\omega} \wedge \overrightarrow{OM}\right) + \frac{d\vec{\omega}}{dt} \wedge \overrightarrow{OM}$ où F_{ie} est une force, m une masse, γ_0 une accélération, ω une vitesse angulaire, O et M deux points de l'espace.

b) $\frac{m\,v^2}{2} + 2\,S\,g\,h^2 + \rho\,g\frac{h^2}{2} + p = E$ où m est la masse du système, v sa vitesse, S sa surface, h sa hauteur, p une pression, E une énergie, ρ la masse volumique du système et g l'accélération de la pesanteur.

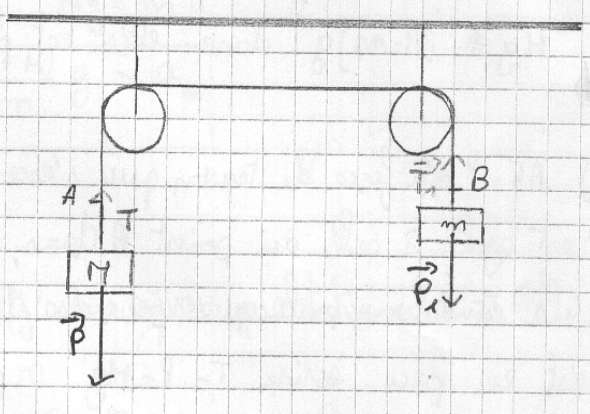
Annexe C3

Copies d'étudiants
Chapitre 7

Résolution de l'étudiant e1
page 1/3



Dispositif 1



Dispositif 2

1) * Pour le dispositif 1 on peut remarquer que le fils est attaché au mur s'est grâce à cela quand peut dire que le système {m;} est en équilibre statique.

* Pour le dispositif 2 tout dépend des valeurs de M et m puisque on néglige les dissipations par frottement, se que l'on peut dire que ce dispositif ressemble plus à une balance et au mouvement de ce dernier

2) a) A.1: "La tension de la corde est nulle dans les parties horizontales" Cette affirmation est Fausse car on sait que le module de la tension est constante sur toute la longueur du fil et elle n'est en aucun cas égale à 0.

b) A2: "Au point A la force de tension est plus grande qu'au point B"
cette affirmation est vrai pour le dispositif 2 car M > m mais elle est totalement Fausse pour le dispositif 1 car comme le fil système est en équilibre statique ça veut dire que la tension $\vec{T}$ est la même en tout point du fil.

c) A3: " Dans le dispositif 2, la force de tension vaut $(M-m)g$ en tout point de la corde".
Cela est Faux, prenant le système {M} on aura la $T = P = Mg$ or $Mg \neq (M-m)g$ donc elle est pas égale en tout point de la corde.

d) A4: " La force de tension qui s'exerce au point A dans le dispositif 1, est égale à celle au point A dans le dispositif 2".
Cela est Faux, parce que pour le dispositif 1 le système est en équilibre est en peu écrire $T = P = Mg$ or pour le 2 le système lui n'est pas en équilibre donc on a $\vec{P} - \vec{T} = m\vec{a}$.

1/ Résolution de l'exercice:

1) Dans le référentiel terrestre considéré Galiléen on choisit le système {masse M}. Le système est bien en équilibre statique donc on a:

$$\sum \vec{F}_{ex} = \vec{0}$$
$$\vec{P} + \vec{T} = \vec{0}$$

Projetons sur l'axe oy: $P - T = 0$

$$P = T = Mg$$

Le résultat est le même en tout point du fil y compris le point B.

2) Dans le référentiel terrestre considéré Galiléen, on choisit le système {M}.

$$\sum \vec{F}_{ex} = M\vec{a}$$
$$\vec{T} + \vec{P} = M\vec{a}$$

Comme le fil est inextensible on peut dire que la tension $T = P_1$

Résolution de l'étudiant e1
page 3/3

$P - P_1 = M a_M$

$Mg - mg = M a_M$

$(M-m)g = M a_M$

$$\frac{(M-m)}{M} g = a_M$$

Pour le système $\{m\}$ on a : $\sum \vec{F}_{ex} = m\vec{a}$

comme on a $T = P'$ (2)

$\vec{P}_1 + \vec{T}_1 = m\vec{a}$

$mg - Mg = ma$

$$\frac{(m-M)}{m} g = a_m$$

IV/ Conclusion :

1) Ainsi cela correspond à ce que j'avais prévu qualitativement au I.

Résolution de l'étudiant e2
page 1/3

I/ Approche qualitative:

1) Dispositif 1 : un solide de masse M se trouve suspendu à une corde accrochée à un mur, passant par une poulie. Il a donc un mouvement immobile, il est à la verticale.

Dispositif 2 : 2 solides sont suspendus aux extrémités d'une corde passant par 2 poulies. Ils ont un mouvement de translation rectiligne accéléré. Ils se déplacent verticalement.

2) ⓐ L'A1 est fausse. En effet, il y a 2 poulies, donc la tension entre ces 2 poulies n'est pas nulle. On aurait eu à la place des poulies un objet qui ne coulisse pas, là la tension aurait été nulle.

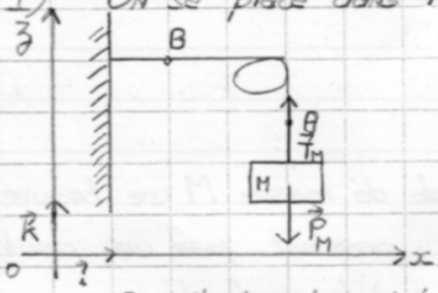
ⓑ L'A2 est fausse. En effet, les cordes sont inélastiques et de masses négligeables. De plus, on ne tient pas compte des frottements. La poulie (ou les poulies) fait "tourner" la force exercée par la corde. Donc la force de tension est la même en tout point de la corde.

ⓒ

d) L'A4 est fausse car dans le dispositif 2, il y a un facteur de plus qui s'exerce sur la tension au point A: en effet, il y a le solide de masse m.

II/ Résolution de l'exercice

1) On se place dans R_T, référentiel terrestre supposé galiléen.



On étudie le solide de masse M soumis à son poids $\vec{P}_M = M\vec{g}$ et à la force de tension $\vec{T}_M$.

Le mouvement est immobile.

D'après le principe d'inertie: $\sum \vec{F}_{ext. \to système} = \vec{0}$

d'où $\vec{P}_M + \vec{T}_M = \vec{0}$.

Soit le repère $R(O, \vec{i}, \vec{k})$:

en projettant sur Oz: $-Mg + T = 0$

$\Leftrightarrow \boxed{T = Mg.}$

Et comme la corde est inélastique, la tension est la même au point B.

2) On étudie le système $\{m + M\}$ dans R_T.

D'après le principe fondamental de la dynamique:

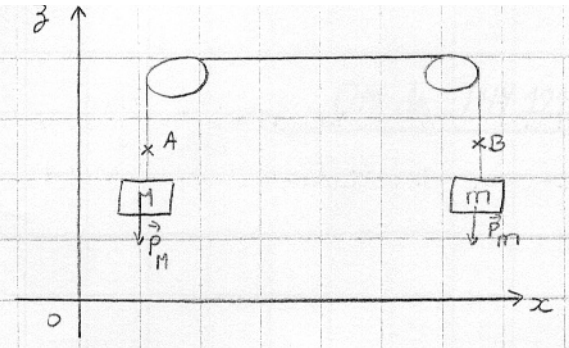
$\sum \vec{F}_{ext. \to système} = (m + M)\vec{a}$

d'où $\vec{P}_M + \vec{P}_m = (m + M)\vec{a}$ (les forces de tension dans ce système sont des forces intérieures).

En projettant sur Oz: $Mg - mg = (m + M)a$

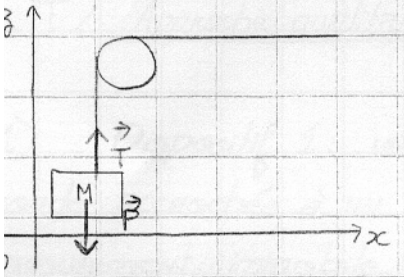
$\Rightarrow a = \frac{M - m}{m + M} g.$

Résolution de l'étudiant e2
page 3/3



De plus, la corde est inextensible, donc la force de tension est la même en tout point de la corde.

Prenons le système $\{M\}$ dans R_T :



D'après le principe fondamental de la dynamique :

$$\vec{T} + \vec{P} = M\vec{a}.$$

On projette sur Oz :

$$T - Mg = M\vec{a}$$

$$\Leftrightarrow T = M(g+a).$$

$$\Leftrightarrow T = Mg + M.\frac{M-m}{m+M}g$$

de même, avec le système $\{m\}$, on obtient :

$$T_m = mg + m.\frac{M-m}{m+M}g.$$

Résolution de l'étudiant e3
page 1/3

I 1.

dispositif 1:

La masse M tend la corde qui est accroché à un mur. La masse M est donc immobile.

dispositif 2:

M > m donc la masse M entraîne dans sa chute la masse m. La masse m monte verticalement et la masse M descend verticalement grâce au jeu des deux poulies.

2.

A1: Faux

Lorsqu'une corde est tendue et inextensible, la tension de la corde est constante tout le long de la corde. Dans les deux cas, il y a une force de tension due aux masses, la tension de la corde est donc constante et différent de zéro dans les parties horyzontales.

A2: Faux

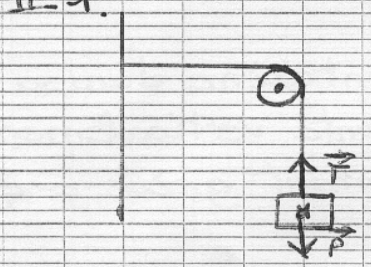
Dans le dispositif 1 $T_A = T_B$ car il y a seulement une masse appliquée au système. Dans le dispositif 2, la force de tension au point A est plus grande qu'au point B. c'est parce que M > m.

Résolution de l'étudiant e2
page 2/3

A3: Vrai
La force de tension totale de la corde vaut
$T_{tot} = P_H - P_m$ soit $T_{tot} = (H-m)g$
Elle est donc constante en tout point de la cord et vaut $(H-m)g$.

A4: Vrai
les masses suspendues à la corde étant identiques
$T_{Adispositif1} = T_{Adispositif2}$

II=1.



Référentiel Galiléen
Système : {Masse + poulie}

le système n'est pas en mouvement
le système est donc pseudo isolé.

D'après le principe fondamental de la dynamique, on a $\sum \vec{F} = \vec{0}$. Donc au point A, on a

$\vec{P} + \vec{T} = \vec{0} \Leftrightarrow \|\vec{P}\| = \|-\vec{T}\|$

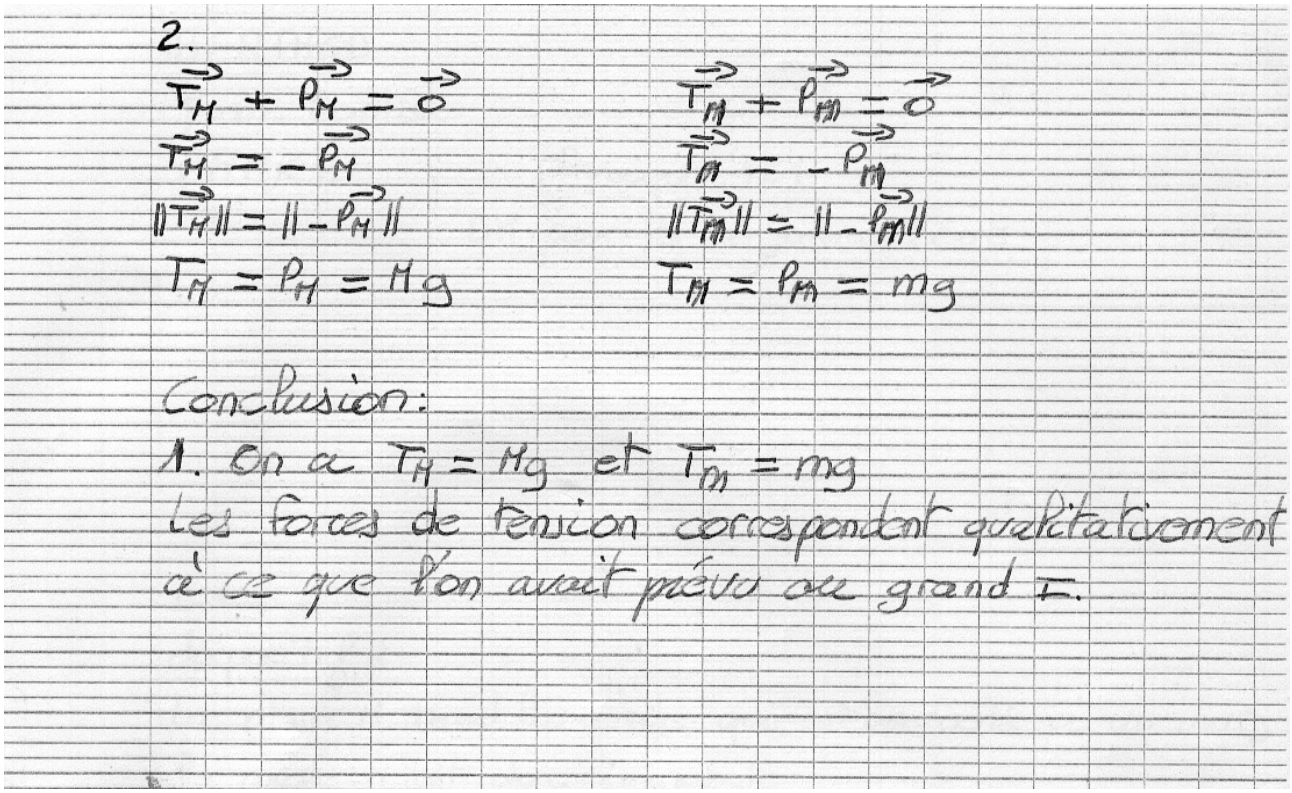
$\Leftrightarrow T = mg$

avec $g = 10\ m^2/s$, on trouve

$T_H = 10H$

De la même manière, $T_B = 10\ m$

Résolution de l'étudiant e3
page 3/3



2.

$\vec{T_H} + \vec{P_H} = \vec{0}$ $\qquad$ $\vec{T_m} + \vec{P_m} = \vec{0}$

$\vec{T_H} = -\vec{P_H}$ $\qquad$ $\vec{T_m} = -\vec{P_m}$

$\|\vec{T_H}\| = \|-\vec{P_H}\|$ $\qquad$ $\|\vec{T_m}\| = \|-\vec{P_m}\|$

$T_H = P_H = Mg$ $\qquad$ $T_m = P_m = mg$

Conclusion:

1. On a $T_H = Mg$ et $T_m = mg$
Les forces de tension correspondent qualitativement à ce que l'on avait prévu au grand I.

Résolution de l'étudiant e4
page 1/4

DM - PHYS 1

I - Approche qualitative -

1 - Dispositif 1 :

Une masse M est attachée, par une corde inélastique à un mur après être passée par une poulie. Le système est statique, il n'y a pas de mouvement

Dispositif 2 :

Deux masse M et m sont attachées l'une à l'autre par une corde de masse négligeable et inélastique, suspendues à deux poulies. Si les deux masses sont égales, le dispositif va s'équilibrer et sera statique, sinon la masse la plus importante va descendre et faire monter l'autre masse.

2 - a. La tension de la corde dans les parties horizontales ne peut pas être nulle, Si on coupe la corde dans la partie horizontale, les masses tombent, il y a donc une tension dans ces parties.

b. C'est faux, les poulies sont considérées négligeables ainsi que leur frottements. Les poulies se contentent donc de transmettre les forces, la tension est égale en tout point de la corde.

c. Faux. Si on étudie un cas limite où $M = m$, cela voudrait dire que la tension serait nulle. Or on a vu que la tension de la corde n'est pas nulle. Donc $T \neq (M-m)g$.

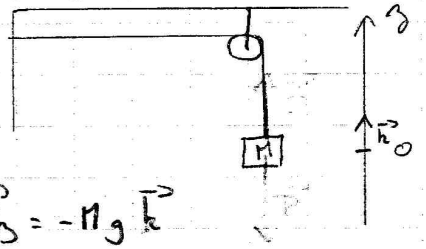
d. Faux. car cela signifierait que la force exercée par la masse $(-Mg)$ serait égale à la force exercée par la masse m du dispositif 2. Or m et M sont supposées différentes. Cette affirmation n'est vraie que si $M = m$.

II - Résolution de l'exercice.

1 - Système : La masse M.
Référentiel : terrestre supposé Galiléen
Bilan des forces : $\vec{P}$, $\vec{T}$ (force de tension de la corde).

Le système est immobile, $a = 0$, d'après la troisième loi de Newton :

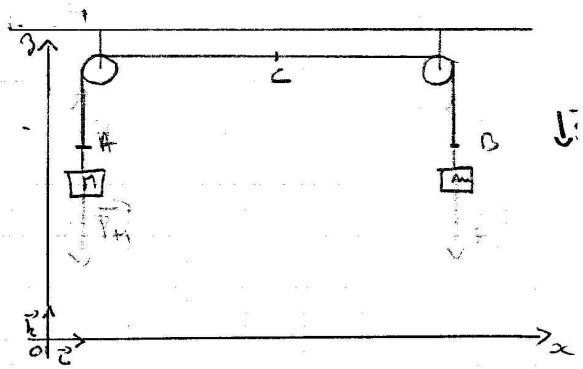
$$\Sigma \vec{F} = 0.$$
$$\vec{P} + \vec{T} = 0.$$



Sur un axe Oz.
$$\vec{P_3} + \vec{T_3} = 0$$
$$\vec{T_3} = -\vec{P_3}$$
$$\vec{T_3} = -(-Mg\vec{k})$$
$$\vec{T_3} = Mg\vec{k}$$
d'où $\|\vec{T_3}\| = Mg$

Par transmission de force de la poulie, le poids de la poulie et les frottements étant négligeables, la tension au point B est identique à celle au point A : $\|T_B\| = Mg$

2 -



① - Système : La masse M.
- Référentiel : Terrestre supposé Galiléen.
- Bilan des forces : $\vec{P_M}$, $\vec{T_M}$.
Le système est dynamique.

PFD : $\sum \vec{F} = m\vec{a}$,
d'où $\vec{P_M} + \vec{T_M} = M\vec{a_M}$
$\vec{P_M} = M\vec{g}$
En projection sur Oz :
$\|\vec{T_M}\| - \|\vec{P_M}\| = M\,\vec{a_M}$ (1)

② - Système : La masse m
- Référentiel : Terrestre supposé galiléen.
- Bilan des force : $\vec{P_m}$, $\vec{T_B}$

PFD : $\sum \vec{F} = m\vec{a}$.
d'où $\vec{P_m} + \vec{T_B} = m\vec{a_e}$
$P_m = m\vec{g}$
En projection sur Oz : $\|\vec{T_B}\| - \|\vec{P_m}\| = m\,\vec{a_m}$ (2)

Rq : On suppose les fils inextensibles et les poulies de masse nulle tournants sans frottements, c'est à dire que les tensions du fil de part et d'autre des poulies sont identiques.
$\Rightarrow T_A = T_B = T$

De plus, les deux masses étant reliées par un fil inextensible de masse négligeable, l'accélération subit par les deux masses est opposée :
$\Rightarrow \vec{a_M} = -\vec{a_m} \Rightarrow \|\vec{a_M}\| = \|\vec{a_m}\| = a$

(1) $\|\vec{T}\| - \|\vec{P_M}\| = M\,a$

(2) $\|\vec{T}\| - \|\vec{P_m}\| = m\,a$

(1) - (2) $= \|\vec{T}\| - \|\vec{P_M}\| - \|\vec{T}\| + \|\vec{P_m}\| = (M-m)\,a$

$m\,g - M\,g = (M-m)\,a$

$\Rightarrow a = \left(\frac{m-M}{M-m}\right) g$

III - Conclusion :

1- Les Tensions trouvées sont non nulles comme prévue qualitativement dans le I.

Dispositif 1 : $T_A = T_B$ comme vu dans le I.

Dispositif 2 : $T_A = T_B$ même si $M > m$ comme vu dans I.

2- Il ne semble pas apparaître de contradiction.

Vérifions que l'accélération trouvée a bien la dimension d'une longue distance par un temps au carré.

$\left(\frac{m-M}{M-m}\ g\right)$ en $\left(\frac{[kg]}{[kg]}\,[m]\cdot[s]^{-2}\right)$

d'où a en $[m]\,[s]^{-2}$

ccl° : a a bien la dimension d'une accélération

Approche qualitative

1 : • Dispositif 1 :

La masse M est au repos. Aucun objet du dispositif 1 n'est en mouvement ⇒ Dispositif statique. (fil inextensible)

• Dispositif 2.

+ Les masses M et m sont en mouvement si $M > m$.
ou $m > M$ ⇒ étude cinématique { si $M > m$ M descend et m monte ; si $m > M$ m descend et M monte

+ Les masses M et m sont au repos si $M = m$
⇒ Dispositif statique. (fil inextensible)

2 :

a) Dire que la tension de la corde est nulle dans les parties horizontales équivaut à dire que si on coupe la corde dans une partie horizontale, l'experience n'est pas modifié.

Or si on coupe la corde en B dans le dispositif 1. le dispositif n'est alors plus statique la masse M tombe. De même si on coupe la corde dans la partie horizontale dans le dispositif 2, l'experience est modifié

les 2 masses tombes.

A1 → FAUX

b) On suppose les fils inextensibles et les poulies de masse nulle tournant sans frottement, c'est-à-dire que les tensions du fil de part et d'autres des poulies sont identiq
donc la tension en A est la même qu'en B

A2 → FAUX

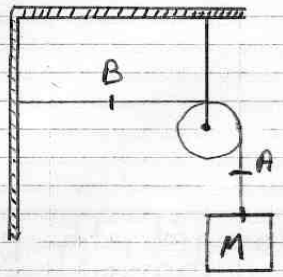
c) Supposons que M = m si la tension vaut (M-m) g
cela veut dire que la tension est nulle. Or si la tension est nulle cela équivaut à dire que chaque masse subit comme seule force son poids.
Donc M et m sont en chute libre. Ce qui est contradictoire avec l'expérience.

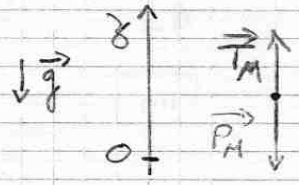
A3 → FAUX

d) La force de réaction du mur est égale (en norme) au poids de M.
Si en A du dispositif 2, la force de tension développé vaut celle du mur du dispositif 1, alors M = m, or ce n'est pas le cas (M supposé supérieur à m)

II Résolution de l'exercice

1: Dispositif 1 :





M (assimilée à un point

Référentiel : Terrestre supposé galiléen (car l'expérience est petite par rapport à la Terre et courte dans le temps)

$\{M\}$

La masse M est au repos $\Rightarrow$ dispositif statique.

- Bilan des forces extérieurs appliquées au système :

+ $\vec{P}$ poid de la masse . $\vec{T_M}$ tension du fil

D'après la 3ème loi de Newton

$$\vec{P_M} + \vec{T} = \vec{0} \quad \text{(système en équilibre)}$$

On projette les forces sur (Oy)

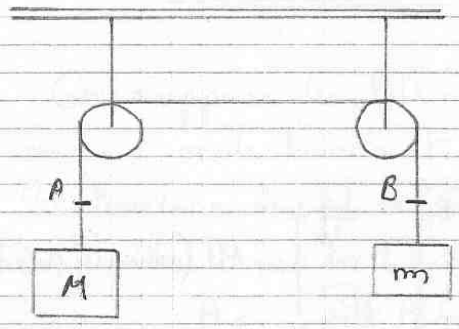
$$\|\vec{P_M}\| - \|\vec{T_M}\| = 0$$

$$\|\vec{T_M}\| = \|\vec{P_M}\| = M.g$$

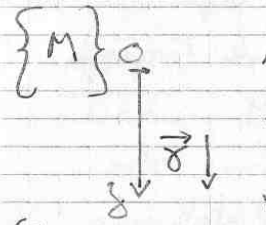
Le fil est inextensible et la poulie de masse nulle tourne sans frottement donc les tensions de part et d'autre de la poulie sont identiques

$$\|\vec{T_M}\| = \|\vec{T_A}\| = \|\vec{T_B}\| = M.g$$

2ème Dispositif 2.



Référentiel: terrestre supposé galiléen (car l'expérience est petite par rapport à la Terre et courte dans le temps).

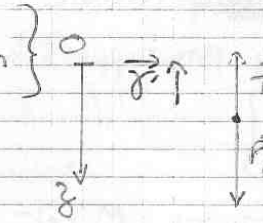


$\vec{T_M}$: tension du fil en M
$\vec{P_M}$: poids de M
M (assimilé à un point)

La masse M est en mouvement rectiligne ⇒ Etude dynamique.
D'après le principe fondamental de la dynamique on a :

$$\sum \vec{F}_{\text{forces extérieures au système}} = M\vec{\gamma}$$

$$\vec{P_M} + \vec{T_M} = M\vec{\gamma}$$



$\vec{T_m}$: tension du fil en m
$\vec{P_m}$: poids de m
m (assimilé à un point)

La masse m est en mouvement rectiligne ⇒ Etude dynamique
D'après le principe fondamental de la dynamique on a :

$$\sum \vec{F}_{\text{forces extérieures au système}} = m\vec{\gamma'}$$

$$\vec{P_m} + \vec{T_m} = m\vec{\gamma'}$$

On suppose les fils inextensibles et les poulies de masse nulle tournant sans frottement, c'est-à-dire que les tensions du fil de part et d'autre des poulies sont identiques.

donc $\|\vec{T_M}\| = \|\vec{T_m}\|$

la corde reste tendue au cours de l'expérience donc $\|\vec{\gamma}\| = \|\vec{\gamma'}\|$

Finalement en projetant sur un axe (Oz)

$\|\vec{P_M}\| - \|\vec{T_M}\| = M\gamma_z$ et $\|\vec{P_m}\| - \|\vec{T_m}\| = -m\gamma_z'$

On a $\gamma_z = \gamma_z'$

donc $\|\vec{P_M}\| - \|\vec{T_M}\| = M\gamma_z$ et $\|\vec{P_m}\| - \|\vec{T_m}\| = -m\gamma_z$

(1) (2)

(1) - (2) $\|\vec{P_M}\| - \|\vec{T_M}\| - \|\vec{P_m}\| + \|\vec{T_m}\| = M\gamma_z + m\gamma_z$

$\|\vec{T_m}\| = \|\vec{T_M}\|$

donc

$\|\vec{P_M}\| - \|\vec{P_m}\| = M\gamma_z + m\gamma_z$

$Mg - mg = (M+m)\gamma_z$

$$\boxed{\gamma_z = \left(\frac{M-m}{M+m}\right) g}$$

On a $\|\vec{P_M}\| - \|\vec{T_M}\| = M\gamma_z$

$\|\vec{T_M}\| = \|\vec{P_M}\| - M\gamma_z$

$\|\vec{T_M}\| = Mg - M\left(\frac{M-m}{M+m}\right) g$

$\|\vec{T_M}\| = g\left(\frac{M(M+m) - M(M-m)}{M+m}\right)$

$\|\vec{T_M}\| = g\left(\frac{M^2 + mM - M^2 + mM}{M+m}\right)$

$\|\vec{T_M}\| = \|\vec{T_m}\| = \frac{2gmM}{M+m}$

III Conclusion

1°) Les différentes forces de tension calculées au II sont différentes entre les 2 dispositifs conformément à l'approche qualitative.

2°) a) Les tensions trouvées à la fin de l'exercice sont cohérentes aux niveaux des dimensions

ex: $\|\vec{T_m}\| = \frac{2g.m.M}{M+m}$ $\quad [N] = \frac{[N.\cancel{kg^{-1}}].[\cancel{kg}][kg]}{[\cancel{kg}]}$

b) Etude de cas limites dans le dispositif 2

- si $M = m$ Le système doit être immobile vérifions que l'accélération des 2 masses et nulles.

$$\|\vec{\gamma}\| = \left(\frac{M-m}{M+m}\right) g$$

si $M = m$.

$\|\vec{\gamma}\| = 0 \cdot g = 0$.

donc le système est immobile ou de vitesse constante. Les masses étants lachées sans vitesse initiale ($v = 0$); le système reste immobile

- si $M \gg m$ On peut considéré que M est en chute libre donc son accélération est g.

Vérif: $\|\vec{\gamma}\| = \left(\frac{M-0}{M+0}\right) g = g$ donc le système M est en chute libre si $M \gg m$

c) d) Controler.

Résolution de l'étudiant e6
page 1/3

I/ Approche qualitative :

① Dispositif 1 : les cordes sont inelastiques donc M est immobile.

Dispositif 2 : Pas de frottement donc le mouvement de M et m dépend de leur masse : si $M > m$, M descent et m monte et inversement si $M < m$. Si $M = m$, les deux masse conservent leur accélération (si $v_i = 0 \Rightarrow$ M et m restent immobiles).

② a/ Dispositif 1 : faux, les frottement de la poulie étant négligeable la tension est transmise avant et après la poulie.

Dispo. 2 : idem.

b/ Dispo. 1 : faux, pas de frottement donc la tension avant et après la poulie est strictement égale.

Dispo. 2 : idem (pas de frottement $\Rightarrow$ transmission).

c/ faux : cas limite : $M = m$, alors, suivant A_3, la tension serait nulle, ce qui est absurde.

d/ faux : dispo. 1 : tension en B = tension en A or si dans le dispo. 2, tension au point de la corde horizontale = tension en A, cela signifie que $M = m$, ce qui n'est pas le cas.

II/ Résolution de l'exercice :

① Dispositif 1 : Referentiel : terrestre (supposé galiléen).

Système : masse M.

La corde étant inélastique, la masse M est immobile et donc la force de tension qui s'exerce sur M est égale (en norme) au poids de M. On a donc :

$\overrightarrow{T_A} = -M.\vec{g}$ En prenant comme repère, le repère Oz : 

donc on a:

$\boxed{T_A = M.g}$

On néglige les dissipations par frottement des poulies et de plus la corde est inélastique. La force de tension est donc intégralement transmise au point B :

$\boxed{T_A = T_B = M.g}$

② Dispositif 2 :

• Accélération de M : Utilisons le PFD :

$\overrightarrow{\Sigma_{Ferb\to M}} = M.\vec{a_M} \iff \overrightarrow{P_M} + \overrightarrow{T_A} = M.\vec{a_M} \Rightarrow -P_M + T_A = M.(-a_M)$ (1)

$\iff \vec{a_M} = \dfrac{\overrightarrow{P_M} + \overrightarrow{T_A}}{M}$

• Accélération de m :

$\overrightarrow{\Sigma_{Ferb\to m}} = m.\vec{a_m} \iff \overrightarrow{P_m} + \overrightarrow{T_B} = m.\vec{a_m} \Rightarrow -P_m + T_B = m.a_m$ (2)

$\iff \vec{a_m} = \dfrac{\overrightarrow{P_m} + \overrightarrow{T_B}}{m}$

Les poulies transmettent les tensions sans perte. De plus les cordes sont inélastiques.

Donc $\|\overrightarrow{T_A}\| = \|\overrightarrow{T_B}\| = \|T\|$

Donc $\|\vec{a_m}\| = \|\vec{a_M}\| = \|\vec{a}\|$ et $\vec{a_m} = -\vec{a_M}$

(1) devient : $\overrightarrow{P_M} + \overrightarrow{T} = M.\vec{a} \iff -M.g + T = -M.a$

$\iff M.g - T = M.a$ (1')

(2) devient : $\overrightarrow{P_m} + \overrightarrow{T} = -m.\vec{a} \iff -m.g + T = m.a$ (2')

(1') - (2') $\Rightarrow M.g + T - (-m.g + T) = m.a - M.a$

$\iff M.g + T + m.g - T = a(m - M)$

$\iff g\,\dfrac{M-m}{M+m} = a$

On a donc :

$$a_M = a_m = g\,\frac{M-m}{M+m}$$

Tension identique en tout point :

$$\vec{P_M} + \vec{T} = M.\vec{a} \iff \vec{T} = -M.\vec{a} + \vec{P_M}$$

$$\|\vec{T}\| = -M\|\vec{a}\| + \|\vec{P_M}\|$$

$$\|\vec{T}\| = -M.g\,\frac{M-m}{M+m} + M.g$$

$$\|\vec{T}\| = -Mg\left(\frac{M-m}{M+m} + 1\right)$$

$$\Rightarrow \boxed{T = \frac{2Mmg}{M+m}}$$

III/ Conclusion :

① Les forces de tension calculées au II/ correspondent bien au jugement qualitatif du I.

② a/ La valeur des tensions du II correspondent aux niveaux des dimensions :

$$\|\vec{T}\| = \frac{2Mmg}{M+m} \qquad [N] = \frac{[N.kg^{-1}].[kg][kg]}{[kg]}$$

b/ Cas limite : $M = m$. $\Rightarrow$ Système doit être immobile.

$$\|\vec{a}\| = \left(\frac{M-m}{M+m}\right)g \quad \text{si } m = M \quad \|\vec{a}\| = 0.g = 0$$

Donc le système est bien immobile ou de vitesse constante.

Résolution de l'étudiant e7
page 1/6

I) Approche qualitative.

1_

Dans le dispositif 1, le mouvement est immobile.

Dans le dispositif 2, le mouvement est uniforme accéléré car le poid de la masse M est supérieur au poid de la masse m.

2_

Pour A1. C'est faux. Car si la corde est tendue c'est qu'elle subit une tension.

Pour A2. C'est faux. Car la tension est la même tout au long de la corde.

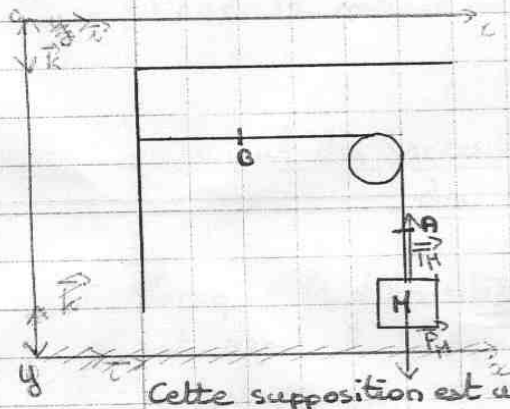
Pour A3. C'est faux

Pour A4. Faux. Car dans le dispositif 1, le montage est immobile alors le point A subit le poid de la masse M. Dans le dispositif 2, le point A subit en plus le poid de la masse m.

II) Résolution de l'exercice.

1-

Calcul de la force de tension qui s'exerce sur M.



référentiel : terrestre supposé galiléen
système étudié : {M}
C'est un mouvement immobile.
On néglige le poid de la corde ainsi que le poid de la poulie par rapport au poid de M. La corde est inextensible.
Cette supposition est utilisée tout au long de l'exercice II.
Bilan des forces extérieur appliqué à M
- à distance : le poid $\vec{P_H}$
- de contact : la tension de la corde : $\vec{T_H}$

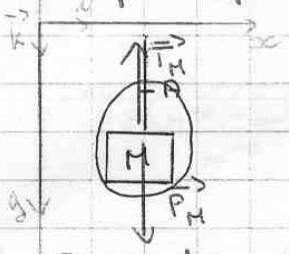
Formule :
La masse M est immobile donc on utilise la formule de l'inertie : $\sum \vec{F}_{ext \to M} = \vec{0}$
Projection du PFD :
$\vec{P_H} + \vec{T_H} = \vec{0}$ ainsi $\|\vec{P_H}\| = \|\vec{T_H}\| = m_H g \vec{k}$ avec m_H : masse de M

Donc la force de tension qui s'exerce sur M est $\boxed{\vec{T_H} = -m_H g \vec{k}}$

Calcul de la force de tension qui s'exerce au point B.

référentiel : terrestre supposé galiléen.
système étudié : {M+A}
Si la corde est tendue, inextensible et s'il n'y a pas de "perte" dû aux frottements alors la tension en module de la corde peut être considère constante tout le long de la corde.
Cette affirmation sera utilisée tout au long de l'exercice II.

D'après l'affirmation précédente, le point B peut être remplacé par le point A.



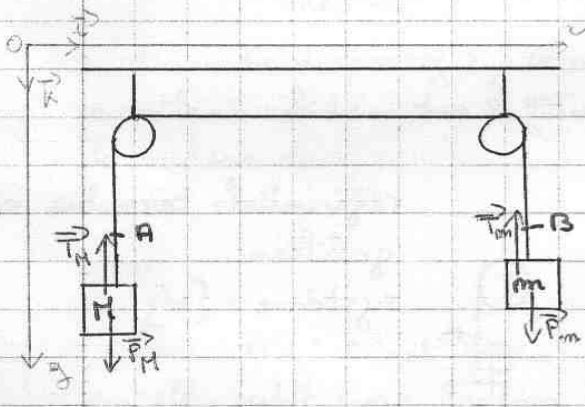
Le bilan des forces extérieur appliqué à $\{M+A\}$
→ de distance : poids de M : $\vec{P_M}$
→ de contact : tension de la corde : $\vec{T_M}$

Formule de l'inertie : $\sum \vec{F}_{ext-\{M+A\}} = \vec{0}$

Projection PFD :
$\vec{P_M} + \vec{T_M} = \vec{0}$ d'où $\|\vec{P_M}\| = \|\vec{T_M}\| = m_M g \vec{k}$
Donc $\vec{T_M} = -m_M g \vec{k}$
Donc la tension au point B est de $\boxed{\vec{T_B} = \vec{T_M} = -m_M g \vec{k}}$

2-

Calcul de l'accélération de la masse M.



L'accélération de la masse M : a est le contraire de l'accélérati de la masse m : a_m (on remplace m_p M_p,
Référentiel : terrestre supposé galiléen.
système : $\{M\}$

Bilan des forces extérieur agissant sur M.
→ de distance : le poid de M : $\vec{P_M}$
→ de contact : la tension de la corde : $\vec{T_M}$

Formule : $\sum \vec{F}_{ext \to M} = m_M . \vec{a}$ avec m_M : masse de M
Projection du PFD :
$\vec{P_M} - \vec{T_M} = m_M . \vec{a}$ et $\|\vec{T_M}\| = \|\vec{T_m}\| + \|\vec{P_m}\| = -\vec{T_m} + \vec{P_m}$
D'où $\sum \vec{F}_{ext \to M} = \vec{P_M} - (-\vec{T_m} + \vec{P_m}) = m_M \cdot \vec{a}_M$

$$\sum \vec{F}_{ext \to M} = \vec{P}_M + \vec{T}_{Mm} - \vec{P}_m = m_M \cdot \vec{a}_M$$

$$m_M g \vec{k} + m_M g \vec{k} - m_m g \vec{k} = m_M \cdot \vec{a}_M$$

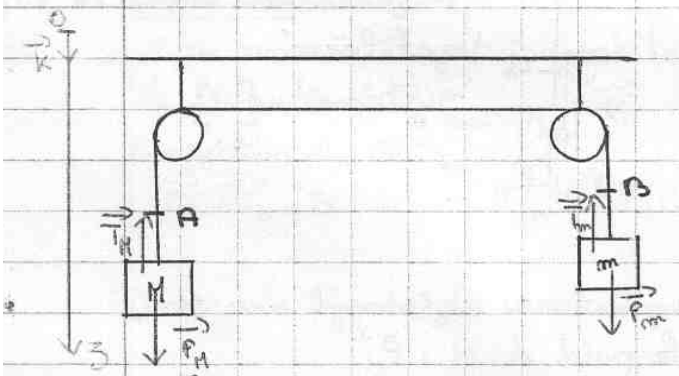
D'où $\boxed{\vec{a}_M = \dfrac{2 m_M g \vec{k} - m_m g \vec{k}}{m_M}}$

Pour la masse m : $\boxed{\vec{a}_m = \dfrac{(2 m_m - m_M) g \vec{k}}{m_m}}$

Calcul des forces de tension qui s'exerce sur chacune des masses.

Lorsque le dispositif 2 est immobile (la masse m est remonté jusqu'à la poupie) les forces de tension subit par M sont les même que celles dans le dispositif 1. Pour m il suffit de remplacer m par B dans le dispositif 1.

Lorsque le dispositif 2 est mobile:



référentiel : terrestre supposé galiléen.
système : {M}

Bilan des forces extérieur sur M:
- de contact : la tension de la corde: $\vec{T}_M$
- à distance : le poid de M : $\vec{P}_M$

Formule:

$$\sum \vec{F}_{ext \to M} = m_M \cdot \vec{a}_M$$

Projection du PFD:

$$\sum \vec{F}_{ext \to H} = \vec{P}_H + \vec{T}_H = m_H \cdot \vec{a}_H$$

Mais $\|\vec{T}_H\| = \|\vec{T}_m\| - \|\vec{P}_m\| = \|\vec{P}_H\| - \|\vec{P}_m\| - \|\vec{P}_m\|$

$= \|\vec{P}_H\| - 2\|\vec{P}_m\|$

Car la masse M est freiné par la masse m.

Ainsi $\|\vec{P}_H\| + \|\vec{T}_H\| = \|\vec{P}_H\| - 2\|\vec{P}_m\| = m_H \cdot \vec{a}_H$

D'où

$$\|\vec{T}_H\| = \|\vec{P}_H\| - \|\vec{P}_H\| - 2\|\vec{P}_H\| = m_H \cdot \vec{a}_H$$
$$= -2\|\vec{P}_H\| - m_H \cdot \vec{a} = -2 m_H g \vec{k} - m_H \cdot \vec{a}_H$$

La force de tension exercé sur M est $\boxed{\vec{T}_H = -m_H(2g\vec{k} + \vec{a}_H)}$

Pour la masse m

référentiel : terrestre supposé galiléen.

système étudié : $\{m\}$

Bilan des forces extérieur appliqué sur m.

- de contact : la tension de la corde : $\vec{T}_m$
- de distance : le poid : $\vec{P}_m$

Projection du PFD:

$$\sum \vec{F}_{ext \to m} = \vec{P}_m + \vec{T}_m = m_m \vec{a}_m$$

$$-\vec{T}_m = -\vec{P}_m + m_m \vec{a}_m$$
$$\vec{T}_m = \vec{P}_m - m_m \vec{a}_m = m_m(g\vec{k} + \vec{a}_m)$$

Donc la force de tension exercé sur m est $\boxed{\vec{T}_m = m_m(g\vec{k} + \vec{a}_m}$

III) Conclusion.

1- Oui. Cela correspond.

Résolution de l'étudiant e8
page 1/5

I - Approche qualitative

1) Dispositif 1

La corde est attachée à un mur d'un côté et est reliée à une masse M de l'autre en passant par une poulie. Le système est immobile.

Dispositif 2

La corde est reliée à une masse M d'un côté et à une masse m de l'autre côté en passant par deux poulies. La masse M, supérieure à la masse m, "tire" la masse m. Son mouvement se fait vers le bas pendant que celui de m se fait vers le haut.

2) a) FAUX

Les masses de la corde et des poulies sont négligeables ainsi que les frottements. La corde est inélastique. La poulie fait donc "tourner" la force de tension de la corde, mais cette dernière, en module, est considérée comme constante tout au long de la corde. Comme la masse M (et m dans le deuxième dispositif)

exercent une tension non nulle sur la corde, alors la tension de la corde n'est pas nulle dans les parties horizontales,
De plus, si c'était le cas, la corde serait "molle", on n'aurait aucune difficulté à la soulever avec un doigt, ce qui paraît difficile si on suppose M et m très grandes.

b) FAUX

Comme pour le cas précédent, étant donné les hypothèses (corde inextensible, corde et poulies de masses négligeables, frottements négligés), on peut dire que le module de la tension est le même en tout point de la corde.
Au point A, la force de tension est la même qu'au point B.

c) VRAI

La tension d'une corde dépend du poids des masses qui y sont accrochées. L'ajout de la masse m (par comparaison avec le dispositif 1) permet de réduire la tension de la corde en tout point.

a) FAUX

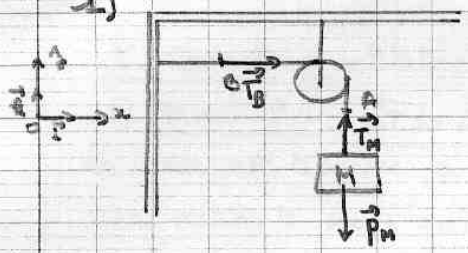
Dans le dispositif 1, la force de tension qui s'exerce au point A est générée par le poids de la masse M.

Dans le dispositif 2, c'est le cas aussi mais le poids de la masse m joue un rôle, il doit être pris en compte pour déterminer la tension de la corde en A.

Cette proposition serait par ailleurs incohérente avec le fait que la tension de la corde (en tout point) est en relation avec les masses présentes, c'est-à-dire avec la proposition c)

II - Résolution de l'exercice

1)



* Au point M

Référentiel terrestre Galiléen

Système : $S = \{M\}$

Système à l'équilibre donc $\sum \vec{F}_{ext \to syst} = \vec{0}$

Forces : poids : $\vec{P}_T = M\vec{g} = -Mg\vec{k}$

Tension $\vec{T}_M = \|\vec{T}_M\|\vec{k}$

PFD $\vec{P}_M + \vec{T}_M = \vec{0}$

projeté sur (Oz) : d'où $\boxed{\|\vec{T}_M\| = Mg}$

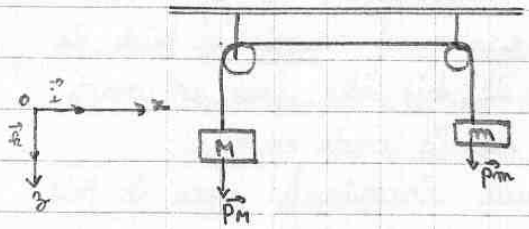
* Au point B

Comme la corde est inélastique, les frottements et les masses de la corde et des poulies sont négligeables, la tension est la même en tout point de la corde : $\boxed{\|\vec{T}_B\| = \|\vec{T}_M\| = Mg}$

2) Dispositif 2

Référentiel terrestre supposé galiléen

$S = \{ M + m \}$



Système en mouvement :

$\sum \vec{F}_{ext\ sys} = (m+M)\vec{a}$

Forces extérieures :

$\vec{P}_M = M\,g\,\vec{k}$

$\vec{P}_m = -m\,g\,\vec{k}$

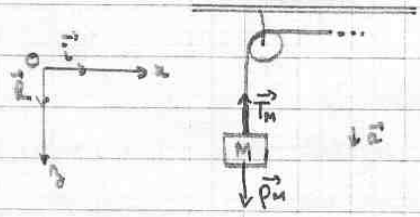
PFD : $\vec{P}_M + \vec{P}_m = (m+M)\vec{a}$

projection sur (Oz) : $-mg + Mg = (m+M)a$

$$\boxed{\frac{(M-m)\,g}{M+m} = a}$$

Calcul des forces de tension $\vec{T}_M$ et $\vec{T}_m$

* $S = \{ M \}$

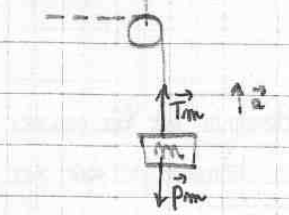


PFD : $\vec{P}_M + \vec{T}_M = M\vec{a}$

d'où $Mg - T_M = Ma$

$$\boxed{T_M = Mg - \frac{M(M-m)}{M+m}g}$$

* $S = \{ m \}$



PFD : $\vec{P}_m + \vec{T}_m = m\vec{a}$

d'où $mg - T_m = -ma$

$$\boxed{T_m = mg + \frac{m(M-m)}{M+m}g}$$

III - Conclusion

1) Calculons $T_M - T_m$

$$T_M - T_m = Mg - \frac{M(M-m)}{M+m}g - mg - \frac{m(M-m)}{M+m}g$$

$$= (M-m)g + \frac{(-M^2 + mM - mM + m^2)g}{M+m}$$

$$= (M-m)g + (m-M)g$$

$$T_M - T_m = 0$$

Ainsi $\underline{T_M = T_m}$

Cela correspond à ce qui a été prévu dans la première partie. pour a) b) et d).

Cependant, la valeur de $T_M = T_m$ n'est pas de $(M-m)g$ (en tout point de la corde).

2)

b) Si $T_M = T_m = T = (M-m)g$, en considérant le cas particulier où $M = m$, on aurait $T = 0$ en tout point de la corde dans le dispositif 2, ce qui serait en contradiction avec I)2) a)

La proposition I) 2) c) était donc FAUSSE.

Résolution de l'étudiant e9
page 1/3

devoir 26.01.2005

I. 1. dispositif 1 : statique, il n'y a aucun mouvement, la masse est accrochée au mur.

dispositif 2 : si $M = m$, il n'y a aucun mouvement. Si une masse est supérieure à l'autre elle se dirige vers le bas.

2. a) A1 cette affirmation est fausse sauf si les masses M ou m sont égales à zéro.

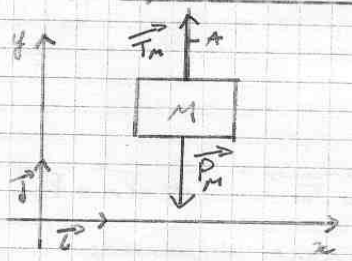
b) A2 la force de tension est égale en tous points de la corde. (pas de frottement)

c) A3 A priori cette affirmation est vraie.

d) A4 A priori cette affirmation est fausse car le dispositif 1 est statique tandis que le dispositif 2 est dynamique.

II. Résolution

1. force de tension exercée sur M :



Le système isolé (masse M) est statique. La somme des forces extérieures exercées sur le système est donc égal à zéro.

$$\sum \vec{F}_{ext/M} = \vec{0}$$

$$\| \vec{T_M} \| = \| \vec{P_M} \|$$

$$\| \vec{T_M} \| = M \vec{g} \cdot \vec{j}$$

$$T_M = M.g$$

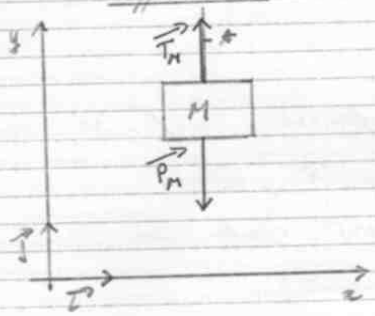
Ayant pris l'hypothèse de négliger les frottements et les masses des cordes et des poulies, la tension est la même en tous points de la corde.

$$\vec{T_B} = -M.\vec{g} \cdot \vec{i}$$

2. Ayant pris l'hypothèse de négliger les frottements et les masses des cordes et des poulies, l'accélération de M sera égale au signe près à l'accélération de m.

Bilan dynamique sur M :

Hypothèse : la masse M est supérieure à la masse m.

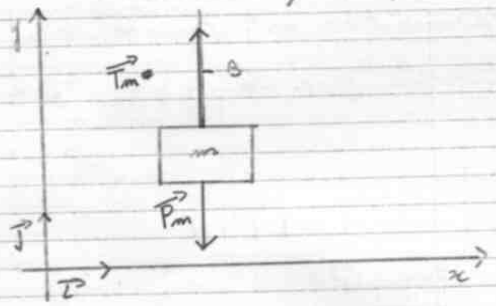


Principe fondamental de la dynamique :

$$\vec{P_M} + \vec{T_M} = M\vec{\gamma_M}$$

$$M\vec{\gamma_M} = M\vec{g} + \vec{T_M}$$

Bilan dynamique sur m :



PFD :

$$\vec{P_m} + \vec{T_m} = m\vec{\gamma_m}$$

$$m\vec{\gamma_m} = m\cdot\vec{g} + \vec{T_m}$$

Nous avons donc deux équations :

① $\vec{P_M} + \vec{T_M} = M\vec{\gamma_M}$

② $\vec{P_m} + \vec{T_m} = m\vec{\gamma_m}$

Les frottements étant négligés, $\vec{T_M} = \vec{T_m}$ et $\vec{\gamma_M} = \vec{\gamma_m}$ et nous avons deux équations pour deux inconnues

Accélération de M :

$$-M\vec{g} + \vec{T} + m\vec{g} - \vec{T} = -M\vec{\gamma} - m\vec{\gamma}$$

$$\vec{\gamma_M} = \vec{g}\cdot\frac{(m-M)}{-M-m}\vec{j}$$

Accélération de m :

$$\vec{\gamma_m} = -g\cdot\frac{(m-M)}{-M-m}\vec{j}$$

Tension de la corde :

On peut déduire de ces équations la tension de la corde en tt point :

$$2T = Mg + mg - M\gamma + m\gamma$$

$$T = \left(g(M+m) - \frac{g(m-M)(M+m)}{-M-m} \right) \times \frac{1}{2}$$

$$T = \frac{g(M+m)(-m-M) - 2gmM}{2(-m-M)}$$

$$\boxed{T = \frac{-2gmM}{-m-M}}$$

Conclusion :

Les suppositions faites au début de l'exercice ne se sont pas toutes avérées exactes, le calcul nous l'a montré par la suite.

A priori ces résultats correspondent à une réponse possible, ils sont cohérents lors de l'étude de ces limites

1 Approche qualitative :

1. 1er dispositif : la masse accrochée est en équilibre.

2ème dispositif : la grosse masse suspendue entraîne la petite masse dans un mouvement rectiligne vertical, se faisant vers le bas pour la grosse masse et vers le haut pour la petite masse, ils sont de sens contraire.

2. a. A1 : Dispositif 1 : l'affirmation est fausse : la masse est accrochée et à l'équilibre, il existe donc une tension en A. La masse de la corde est négligeable, celle ci est tendue, inextensible, cette tension en A peut donc être considérée comme constante le long de toute la corde. La tension de la corde n'est donc pas nulle dans la partie horizontale.

Dispositif 2 : Une tension existe en A et en B, en suivant le raisonnement précédent, celle ci est constante le long de la corde, donc même dans la partie horizontale, l'affirmation est fausse.

b. A2 : Dispositif 1 : on a vu que la tension est constante, donc sa norme est la même en A et en B, c'est faux.

Dispositif 2 : Même justification.

c. A3. Dispositif 1 : En imaginant que les 2 masses M et m soient égales, le dispositif serait alors à l'équilibre. Avec cette formule de la tension, on trouverait $T = (M-m)g = 0\,N$. Il y aurait donc une tension nulle aussi bien en A qu'en B, ce qui voudrait dire que les masses se décrocheraient.

Si on prend $m = 0$, on a $\|\vec{T}\| = Mg = \|\vec{P}\|$, ce qui est significatif d'un état d'équilibre. Or ce ne devrait pas être le cas, en effet si la masse m était nulle, la masse M serait en chute libre, avec une tension nulle en A.
L'affirmation A3 est donc fausse.

d. A4 : Si ces tensions étaient égales, alors le dispositif 2 serait aussi à l'équilibre, ce n'est pas le cas, c'est donc FAUX.

II. Résolution de l'exercice :

1. Dispositif 1 :

- Système $\{M\}$ dans le référentiel terrestre.
- Le système est à l'équilibre, on peut donc directement en déduire que :

$$M\vec{a} = \Sigma \vec{F}_{ext} = 0 \quad \text{d'après le PFD}$$

- Bilan des forces :
  - de contact : la tension qu'on cherche à connaître
  - à distance : le Poids.

. Donc $\vec{P} + \vec{T}_A = \vec{0}$

. Ces forces sont de direction verticale et de sens opposé, par projection sur un axe vertical on obtient alors :

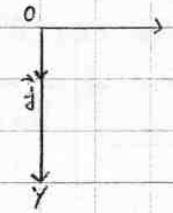
$$T_A - P = 0 \iff T_A = P = Mg$$

- La force de tension s'exerçant sur M est donc $\vec{T} = -\vec{F}$
C est une force de même norme mais de direction horizontale qui s'exerce au point B.

2. Dispositif 2 :

- L'accélération et la vitesse de la masse M sont opposées à celles de la masse m, mais elles sont égales en normes.
- les forces de tension s'exerçant en M et m sont égales.

- On étudie le système $\{M\}$ dans le référentiel terrestre.
- Le système a un mouvement rectiligne vertical accéléré dirigé vers le bas.
On peut donc choisir un repère orienté vers le bas :



- $\vec{a} = a\vec{j}$ et $a > 0$
- $\vec{v} = v$

- Bilan des forces :
  - de contact : la tension en A, inconnue.
  - à distance : le Poids

- Cependant on peut écrire : $\vec{T_A} = -\|\vec{T_A}\|\vec{j}$
$\vec{P_M} = \|P_M\|\vec{j}$

Donc d'après le PDF : $M\vec{a} = \vec{T_A} + \vec{P_M}$

. En procédant de même pour la masse m (la seule différence est le sens du mouvement, dirigé vers le haut pour le système $\{m\}$)

On obtient : $m\vec{a} = \vec{T}_B + \vec{P}_m$ (où $\vec{T}_B = \|\vec{T}_B\|\vec{j}$ et $\vec{P}_m = \|\vec{P}_m\|\vec{j} = \|mg\|\vec{j}$)

. l'accélération a la même norme : en A et B :

. On a donc :

$$\begin{cases} M\vec{a} = \vec{P}_M + \vec{T}_A \\ m\vec{a} = \vec{P}_m + \vec{T}_B \end{cases}$$

. On projetant ces relations sur l'axe $(O,\vec{j})$, on obtient un système de deux équations d'inconnues (a) et (T_A) et (T_B) :

$$\begin{cases} Ma = -T_A + P_M \\ -ma = -T_B + P_m \end{cases}$$

.

Le fil étant inextensible, de masse négligeable, et tendu, on peut en déduire : $T_A = T_B = T$ (la tension est constante le long du fil)

Donc $\begin{cases} Ma = -T + P_M = -T + Mg \\ -ma = -T + P_m = -T + mg \end{cases}$

En soustrayant ces deux équations : $Ma + ma = -T + T + Mg - mg$

$$a(M+m) = g(M-m)$$

$$a = g\frac{(M-m)}{(M+m)}$$

L'accélération de la masse M est donc $\boxed{\vec{a}_M = \frac{g(M-m)}{(M+m)}\vec{j}}$

L'accélération de la masse m est $\boxed{\vec{a}_m = -\vec{a}_M = \frac{-g(M-m)}{(M+m)}\vec{j}}$

En remplaçant l'accélération dans une des 2 équations du système, on peut alors trouver les forces de tensions s'exerçant sur chacune des masses.

$$T = Mg - Ma = M(g-a) = M\left(g - \frac{g(M-m)}{(M+m)}\right)$$

$$= Mg\left(1 - \frac{(M-m)}{(M+m)}\right)$$

$$= Mg\left(\frac{M+m-M+m}{M+m}\right)$$

$$T = \left(\frac{2mMg}{(M+m)}\right) N$$

Donc $\boxed{\vec{T}_M = -\frac{2mMg}{(M+m)}\vec{j} = \vec{T}_m}$

III Conclusion :

1. Ou ces forces de tension calculées au II correspondent à ce que j'avais prévu qualitativement au I.

Par exemple pour le dispositif 2, en prenant 2 masses égales, le dispositif devrait être ici à l'équilibre, ce qui confirmerait :

$\|\vec{a}\| = \frac{g(M-m)}{M+m} = \frac{g(M-M)}{2M} = 0$ → pas d'accélération

et $\|\vec{T}\| = \frac{-2mMg}{(M+m)} = \frac{-2MMg}{M+M} = \frac{-2M^2g}{2M} = -Mg$ → une tension de norme égale à l'inverse des poids, ce qui est significatif d'un état d'équilibre (dispo 1

Si maintenant on prenait une des deux masses = 0 kg, on aurait alors.

Résolution de l'étudiant e10
page 6/6

$\|\vec{a}\| = \frac{g(M-m)}{M+m} = g$

et $\|\vec{T}\| = 0$

La masse restante serait en chute libre, ce qui correspond à ce que j'avais prévu en I(A).

Résolution de l'étudiant e11
page 1/5

I Approche qualitative

1/ — Dispositif 1 :

C'est un dispositif statique, car le fil qui retient la masse est accroché au mur. aucuns mouvements n'est alors possible

— Dispositif 2 :

C'est un système dynamique car les masses M et m ne sont pas égales. Il semblerait que la masse M descende alors que la masse m monte.

2/ A1 : Faux

Car si la tension sur les parties horizontale est nulle, cela revient à dire qu'elle n'est pas utile pour le système {M, m, 2 poulies}, or c'est faux, elle retient les masses M et m.

A2 : Faux les fils sont inextensibles

Dispositif 1 : le rôle des poulies est la transmission des forces ; ici nous négligeons les frottements dû à la poulie et son poids. Il y a donc conservation de la force de tension.

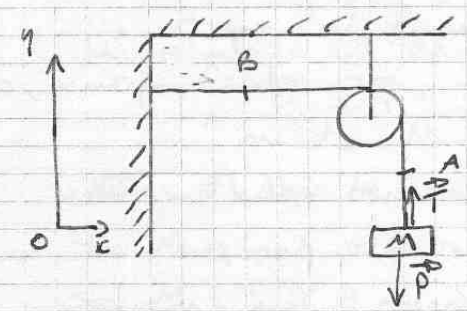
la tension en A vaut celle en B.
Dispositif 2 : la tension est la même en tout point du fil car il y a transmission des tensions par les poulies

A3 : Faux
si on pose $M = m$, avec cette affirmation, cela veut dire qu'il n'y a pas de tensions de corde. Or on a vu (en A2) qu'il existe bien une tension appliquée au fil.

A4 : Faux
la force de réaction du mur est égale (en norme) au poids de M.
Si en A du dispositif 2, la force de tension développé vaut celle du mur du dispositif 1, alors $M = m$, or ce n'est pas le cas ($M > m$)

II Résolution de l'exercice

1/ Dispositif 1 :



système : $\{M\}$
référentiel : terrestre supposé galiléen.
forces : $\vec{P} = Mg$ le poids de M et $\vec{T}$ la tension du fil

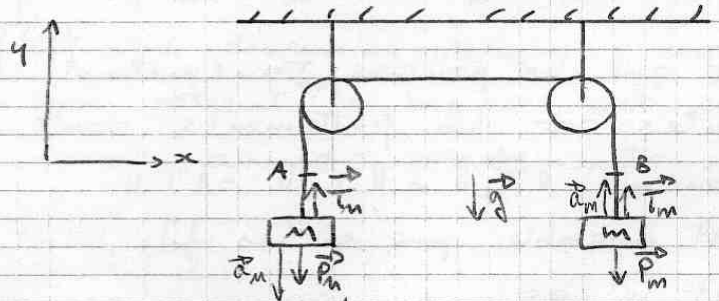
D'après le principe fondamental de la statique :

3ème loi de Newton : $\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0} \iff \vec{P} + \vec{T} = \vec{0}$ sur (Oy)
$\iff \|\vec{T}\| = \|\vec{P}\| = mg$

et par transmission des forces via la poulie, on a la tension en A vaut la tension en B donc en B :

$$T = m g.$$

2/ <u>Dispositif 2</u> :



<u>Référentiel</u> : le référentiel est terrestre et supposé galiléen.

a) pour le système : {M}
forces appliquées à la masse M :
- force à distance => inexistante
- force : $\vec{P}_M = M\vec{g}$ la force de gravitation
$\vec{T}_M$ la tension de la corde.

donc d'après le principe fondamentale de la dynamique, on a :

$$\sum \vec{F}_{ext} = M\vec{a}_M$$
$$\Leftrightarrow \vec{P}_M + \vec{T}_M = M\vec{a}_M \quad (1)$$

b) pour le système : {m}
forces appliquées à la masse m :
- forces à distances : inexistantes

- forces de contact :
  - $\vec{P}_m = m.\vec{g}$ la force de gravité sur m.
  - $\vec{T}_m$ la tension de la corde.

C'est un système dynamique, donc d'après le principe fondamental de la dynamique :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}_m$$
$$\Leftrightarrow \quad \vec{P}_m + \vec{T}_m = m\vec{a}_m \qquad (2)$$

- On sait que les poulies transmettent les tensions sans pertes car les frottements sont négligeables.
donc on a : $\|\vec{T}_M\| = \|\vec{T}_m\| = \|T\|$
cela est possible que si les fils sont inélastiques et c'est le cas.
- le fil est inélastique donc quand la masse M se déplace, la masse m est activé par le mouvement inverse à la masse M.

donc $\|\vec{a}_m\| = \|\vec{a}_M\| = \|\vec{a}\|$
et $\vec{a}_m = -\vec{a}_M$

la relation (1) devient :

$$\vec{P}_M + \vec{T} = M\vec{a} \quad \Leftrightarrow -M.g + T = -Ma \quad \Leftrightarrow M.g - T = Ma \qquad (1bis)$$

la relation (2) devient :

$$\vec{P}_m + \vec{T} = -m\vec{a} \quad \Leftrightarrow -m.g + T = ma \qquad (2bis)$$

donc : (1bis - 2bis)

$$M.g + T - (-m.g + T) = m.a - M.a$$
$$\Leftrightarrow M.g + \cancel{T} + m.g - \cancel{T} = a(m - M)$$
$$\Leftrightarrow g\frac{M-m}{M+m} = a$$

L'accélération vaut :

$$a_M = a_m = g\,\frac{M-m}{M+m}$$

Pour la tension (qui est la même en tout point de la corde)

$$\vec{P}_M + \vec{T} = M\vec{a}$$

$$\Leftrightarrow \vec{T} = -M\vec{a} + \vec{P}_M$$

$$\|\vec{T}\| = -M\,\|\vec{a}\| + \|\vec{P}_M\|$$

$$\|\vec{T}\| = -M \cdot g\,\frac{M-m}{M+m} + M \cdot g$$

$$\|\vec{T}\| = -M \cdot g\left(\frac{M-m}{M+m} + 1\right) \Rightarrow \boxed{T = \frac{2gmM}{M+m}}$$

Cette tension s'applique à chacune des forces

III Conclusion

1/ $T_{\text{Dispositif 1}} > T_{\text{DISPOSITIF 2}}$

donc c'est bien ce qu'on avait prévu au I/.

2/ homogénité de T

T est une force donc en Newton

$$\frac{2gmM}{M+m} \Rightarrow \frac{[kg][N][kg][kg]}{[kg]} = [N]$$

il y a alors homogénité dans la formule.

Les suppositions faites au I/ concordent avec les résultats trouvés aux II/ et III/.

Résolution de l'étudiant e12
page 1/5

I Approche qualitative.

1.1.

le dispositif 1:

Une masse M est suspendu à un fil inélastique fixe a un mur verticale par l'intermédiaire d'une poulie dont l'on négligera les frottements. Ce système ({M}) est immobile.

dispositif 2:

Deux masses sont suspendus et reliées entre elles par un fil inélastique et de masse négligeable, et par l'intermédiaire de deux poulies.
Les deux masses M et m avec M > m sont en mouvement; elles ont un mouvement rectiligne uniforme accéléré. Les deux masses ont la même norme d'accélération.

1.2.

* a- A, faux

Une tension nulle sur les parties horizontale équivaudrait à ce que le fil ne soit pas tendu sur ces portions, ce qui n'est pas le cas, le fil est tendu en tout point.

* b. A_2

Faux

le fil étant inélastique et concidéré de masse négligeable, tendu et les frottements ainsi que les masses dues aux deux poulies les tensions sont de mêmes normes tout du long du fil, quelque soit les masses M et m.

* C. A_3 FAUX

Au point A la tension (sa norme) doit être inferieur au poids de la masse M. (M-m)g est homogène à une force, inférieur à Mg et peut donc correspondre à la tension au point. De plus d'après A_2 la tension est la même en tout point du fil. Mais si m=M alors la tension serait nulle ce qui n'est pas possible

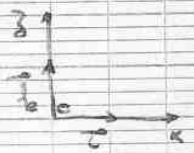
* D. A_4 Faux

le dispositif 1 est au repos et le dispositif 2 en mouvement donc pour le 1 la tension vaut le poids de la masse M et pour le 2 elle inferieur à ce dernier.

II Resolution de l'exercice.

1. Dispositif 1:

Isolons le système {A} (le point A),
Le referentiel (Ox_3) raccroché à la terre est supposé galiléen.
Etablisons le bilan des forces appliquées au point materiel A:



- $\vec{P}$: poids de la masse M $= M\vec{g} = -Mxg \times \vec{k}$
- $\vec{T_A}$: tension de la corde en A $= T_A \times \vec{k}$

On peut appliquer le principe fondamental de la statique

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0}$$
$$\vec{P} + \vec{T_A} = \vec{0}$$
$$-mg\vec{k} + T_A\vec{k} = \vec{0}$$

On projette sur l'axe oz pour obtenir l'équation :

$$T_A - mg = 0 \iff T_A = mg.$$

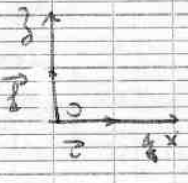
$$\boxed{\vec{T_A} = mg\vec{k}}$$

Pour le point B : Le fil étant tendu, de masse négligeable, inextensible, les frottements et la masse de la poulie étant négligés ; la tension (sa norme) est la même en tout point du fil ; ainsi $T_B = T_A$

d'où $\vec{T_B} = mg\vec{k}$

2-

Repère : oxz repère galiléen



Isolons le point A :

Bilan des forces : • $\vec{F_A} = m\vec{g} = -mg\vec{k}$
• $\vec{T_A} = T_A\vec{k}$

Appliquons le principe fondamental de la dynamique :

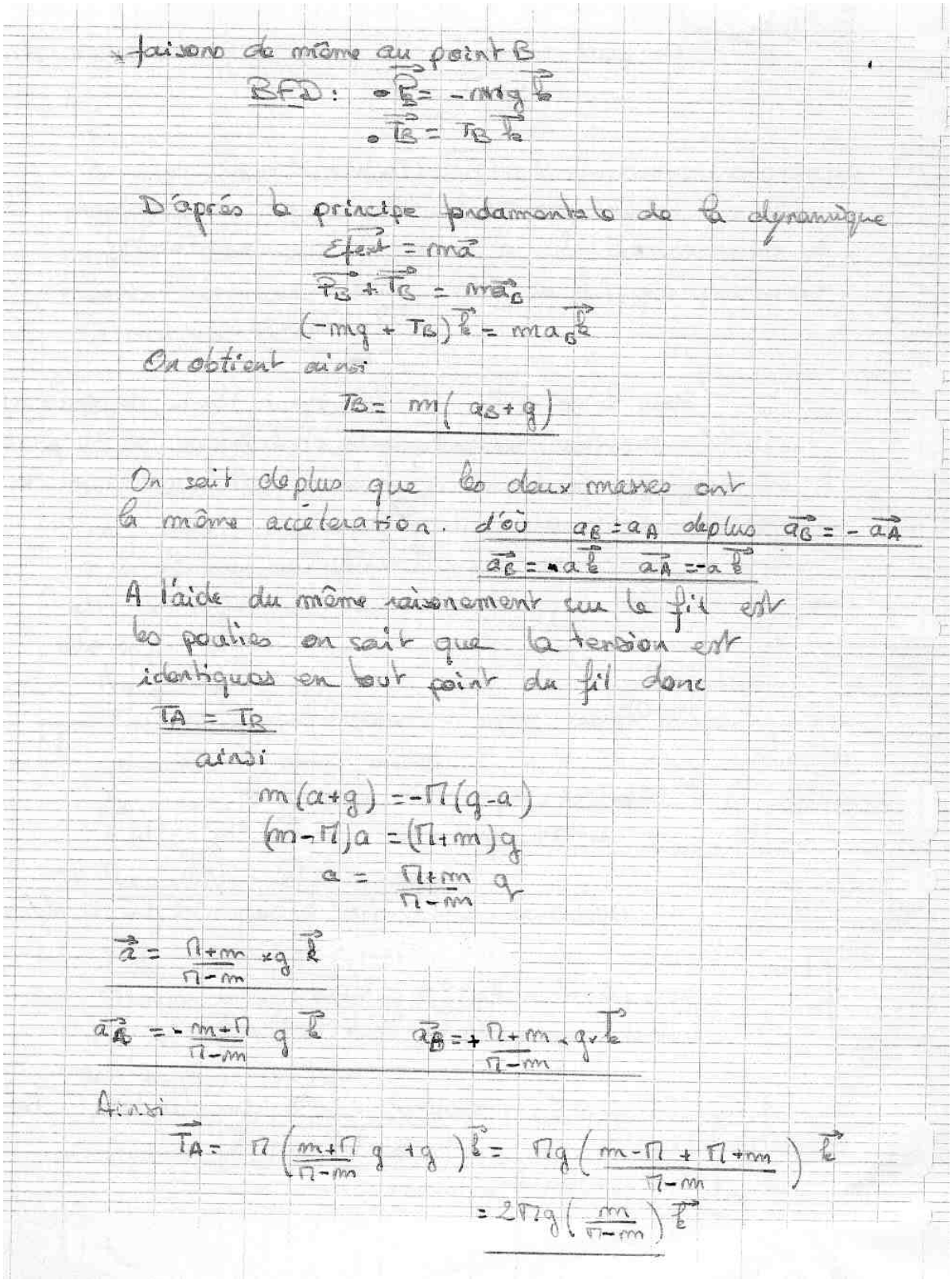
$(\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a})$

ici $\vec{P_A} + \vec{T_A} = m\vec{a_A}$

$-mg\vec{k} + T_A\vec{k} = -m\,a_A\vec{k}$

En projetant sur oz on obtient $T_A = m(g - a_A)$

$$\boxed{T_A = m(-a_A + g)\vec{k}}$$



* faisons de même au point B

BFD : $\cdot \vec{P_B} = -m_1 g \vec{i}$

$\cdot \vec{T_B} = T_B \vec{i}$

D'après le principe fondamental de la dynamique

$\vec{F_{ext}} = m\vec{a}$

$\vec{P_B} + \vec{T_B} = m\vec{a_B}$

$(-mg + T_B)\vec{i} = m a_B \vec{i}$

On obtient ainsi

$$T_B = m(a_B + g)$$

On sait de plus que les deux masses ont la même accélération. d'où $a_B = a_A$ de plus $\vec{a_B} = -\vec{a_A}$

$\vec{a_B} = a\vec{i}$ $\vec{a_A} = -a\vec{i}$

A l'aide du même raisonnement sur le fil est les poulies on sait que la tension est identiques en tout point du fil donc

$T_A = T_B$

ainsi

$$m(a+g) = -\Pi(g-a)$$
$$(m-\Pi)a = (\Pi+m)g$$
$$a = \frac{\Pi+m}{\Pi-m} g$$

$$\vec{a} = \frac{\Pi+m}{\Pi-m} \times g \vec{i}$$

$$\vec{a_A} = -\frac{m+\Pi}{\Pi-m} g \vec{i} \qquad \vec{a_B} = +\frac{\Pi+m}{\Pi-m} \times g \vec{i}$$

Ainsi

$$\vec{T_A} = \Pi\left(\frac{m+\Pi}{\Pi-m} g + g\right)\vec{i} = \Pi g\left(\frac{m-\Pi+\Pi+m}{\Pi-m}\right)\vec{i}$$
$$= 2\Pi g\left(\frac{m}{\Pi-m}\right)\vec{i}$$

$$\vec{T_B} = m(a+g)\vec{k}$$
$$= mg\left(\frac{\Pi+m}{\Pi-m}+1\right)\vec{k}$$
$$\vec{T_B} = mg\left(\frac{\Pi-m+\Pi+m}{\Pi-m}\right)\vec{k}$$
$$\vec{T_B} = 2mg\left(\frac{\Pi}{\Pi-m}\right)\vec{k}$$

Ainsi

$$\vec{T_A} = \frac{2m\Pi g}{\Pi+m}\vec{k} = \vec{T_B}$$
$$\vec{a_A} = -\frac{m+\Pi}{\Pi-m}g\,\vec{k}$$
$$\vec{a_B} = \frac{m+\Pi}{\Pi-m}g\,\vec{k}$$

III Conclusion

- 1- les tensions du 2e dispositif sont inferieur a celles du 1er dispositifs.

Oui, les tensions du 2e dispositif devrait être inferieur à Πg ce qui est la tension du fil dans le 1er dispositif.

Résolution de l'étudiant e13
page 1/4

I -

1) dans le dispositif 1 le mvt est immobile.

dans le dispositif 2 :

si $M = m$:

le mvt est immobile.

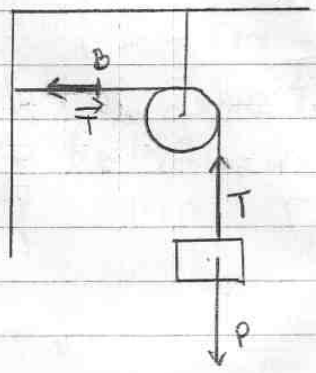
si $M \neq m$:

le mvt est rectiligne vertical.

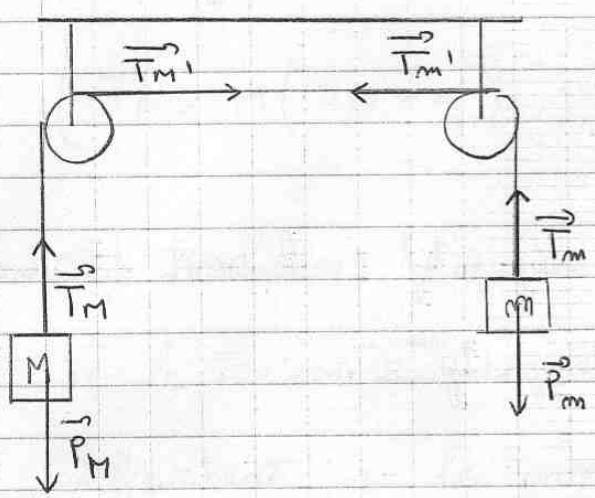
2) -

a) - Dispositif 1 :

a) - C'est faux car la poulie transfert la force de tension au point B.



pour le dispositif 2 :



si $m = M \Rightarrow \vec{T}'_m + \vec{T}_M = \vec{T} = \vec{0}$.

si $m \neq M \Rightarrow \vec{T}'_m + \vec{T}_M = \vec{T} \neq \vec{0}$.

b) - c'est vrai

c) - non ; car si on prend le système {masse m + poulie} et le système {masse M + poulie} la force de Tension n'est pas la même.

d - si le système du dispositif 2 est statique ceci signifie que c'est faux.

II) -

1) $\sum \vec{F}_{ext \to sys} = M \vec{\gamma}$

$\vec{P_M} + \vec{T_A} + \vec{T_B} = 0$

projection sur un axe oy:

$-Mg + T_A = 0 \Rightarrow T_A = Mg.$

projection sur un axe ox:

$T_B = 0$

2) - $\sum \vec{F}_{ext-syst} = m \vec{\gamma}$

$$\begin{cases} \vec{P_m} + \vec{T_B} = m \vec{\gamma_m} \\ \vec{P_M} + \vec{T_A} = M \vec{\gamma_M} \end{cases}$$

projection sur oy:

$$\begin{cases} -P_m + T_B = m \gamma_m \\ -P_M + T_A = M \gamma_M \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} -mg + T_B = m \gamma_m \\ -Mg + T_A = M \gamma_M \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \gamma_m = \frac{T_B}{m} - g. \\ \gamma_M = \frac{T_A}{M} - g \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_B = m(\gamma_m + g) \\ T_A = M(\gamma_M + g) \end{cases}$$

III) conclusion

1): les Tension au dispositif 1 sont différentes pas les même qu'au dispositif 2.

- ~~mon libre ne correspondent pas a ce que j'ai prévu qualitativement aussi~~.

Résolution de l'étudiant e14
page 1/3

I - Approche qualitative

1- Dans le cas du dispositif 1, le mouvement est immobile puisque le fil est accroché au mur. Donc il y a une force qui s'exerce sur le mur.

Dans le cas du dispositif 2, la masse M descend et la masse m monte. Il y a un mouvement rectiligne uniforme.

2- Pour le dispositif 1, et le dispositif 2, les tensions A et B sont identiques.
C'est juste les poids qui font bouger dans le cas 2.

3- VRAI, la tension dépend des deux masses M et m et de la gravité.

4- Faux, puisque dans le cas 1, au bout de la corde il y a un mur alors que dans le cas 2 il y a une masse plus petite et qui fait bouger le dispositif.

Résolution de l'étudiant e14
page 2/3

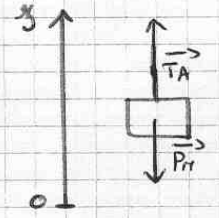
II - Resolution de l'exercice.

1 - Le mouvement est immobile $\Rightarrow \sum \vec{F}_{ext} = \vec{0}$
référentiel : galiléen
système $\{M\}$

bilan des forces : à distance : le poids M $\vec{P_M} = m\vec{g}$
de contact : la tension de corde $\vec{T_A}$ =

on néglige les frottements et la masse de la poulie.

PFD : $\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0} \Rightarrow \vec{P} + \vec{T} = \vec{0}$



projection selon Oz : $\|\vec{T_A}\| - \|\vec{P_M}\| = \vec{0}$
$\|\vec{T_A}\| = \|\vec{P_M}\|$
or $\vec{P} = m\vec{g}$ $\|\vec{T_A}\| = \|\vec{P_M}\| = mg$

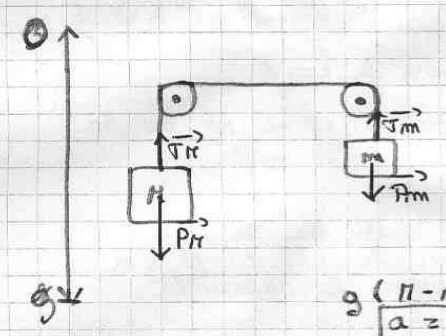
La tension au point B est la même qu'au point A.
$\|\vec{T_B}\| = mg$.

2 - Le mouvement est que M descend et m monte, il y a une accélération des deux masses. L'accélération est identique.

$\vec{a_M} = \vec{a_m} = \vec{a}$ PFD : $\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$

référentiel galiléen. système $\{M+m\}$

bilan des forces : à distance : les poids $\vec{P_M} = M\vec{g}$ et $\vec{P_m} = m\vec{g}$
la tension de corde $\vec{T}$ totale le long de la corde



$\vec{T_M} = \vec{T_m} = \vec{T}$

$\sum \vec{F}_{ext} = \begin{cases} \vec{T} + \vec{P_M} = M\vec{a} \\ \vec{T} + \vec{P_m} = m\vec{a} \end{cases}$

$\Leftrightarrow \begin{cases} -T + Mg = Ma \\ -T + mg = ma \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} -T = M(a-g) \\ -T = m(a+g) \end{cases}$

$g(M-m) = a(M+m)$

$\boxed{a = \frac{g(M-m)}{M+m}}$

L'accélération des deux masses est : $a = \frac{g(M-m)}{M+m}$.

* système $\{M\}$, référentiel galiléen.

bilan des forces : à distance $\vec{P_M}$
de contact $\vec{T_M}$ $= mg$

PFD : $\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{P_M} + \vec{T_M} = M\vec{a}$

or $\vec{a} = \frac{g(M-m)}{M+m}$

donc $-\vec{T_M} + M\vec{g} = M\vec{g}\left(\frac{M-m}{M+m}\right)$

$T_M = Mg\left(1 + \frac{M-m}{M+m}\right) = \frac{2Mmg}{M+m}$

de même pour la tension T_m : $T_m = mg\left(1 + \frac{M-m}{M+m}\right)$

$T_m = \frac{2Mmg}{M+m}$

III - Conclusion.

1 - Les différentes forces calculées ne correspondent pas à celle trouvée en un, surtout pour la tension du cas 2.

La cohérence dimensionnelle des résultats est correcte pour toutes les résultats prévues :

pour $T = \frac{2Mmg}{M+m}$ $\Rightarrow$ $[kg][m][s]^{-2} = \frac{[kg][kg][m][s]^{-2}}{[kg]}$

donc ceci est correcte pour T.

pour $\vec{a} = \frac{g(M-m)}{M+m}$ $\Rightarrow$ $[m][s]^{-2} = \frac{[m][s^{-2}][kg]}{[kg]}$

donc analyse dimensionnelle correcte pour a.

pour T du cas 1 : $[m][kg][s]^{-2} = [m][kg][s^{-2}]$

bonne analyse dimensionnelle.

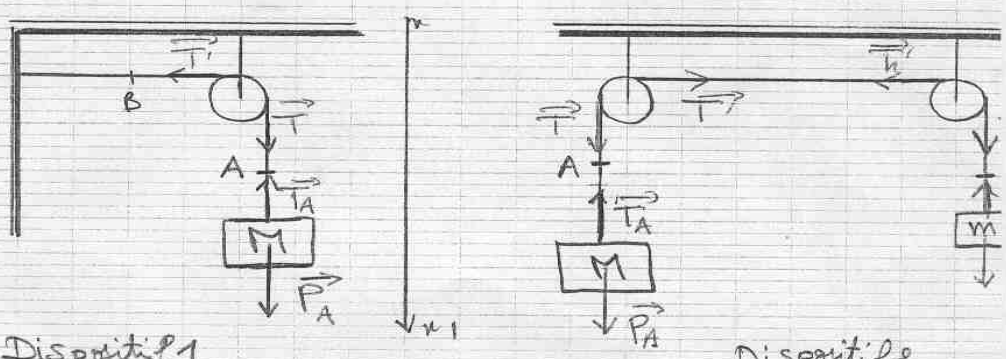
Le cas limite se fait quand on est coincé dans la poulie, son accélération est nulle.

Devoir de Maison de PHY121:

I- Approche qualitative:

1- Pour le dispositif 1 on a la masse M est immobile puisque l est attachée au mur donc le système est en équilibre. Alors que le dispositif 2 est en mouvement car les 2 ma différentes et chacune est attachée à la corde.

2-



Dispositif 1 Dispositif 2

a- A_1 est fausse car dans le dispositif 2 les 2 masses so différentes donc les tensions aux bornes de 2 poulies sont d et la somme de ces 2 tensions est différente de 0.

b- A_2 est vraie car la tension est proportionnelle à la m

c- A_3 est fausse.

d- A_4 est fausse car le dispositif 1 est en équilibre et l dispositif 2 est en mouvent.

II- Résolution de l'exercice:

1- . pour le dispositif 1 en équilibre donc en appliquant le PF

$\vec{T_A} + \vec{P_A} = \vec{0} \Rightarrow -\|\vec{T_A}\| + \|\vec{P_A}\| = 0$ par projection sur (xx')

$\Rightarrow \|\vec{T_A}\| = \|\vec{P_A}\| = M \cdot g$.

. en B: on a: $\vec{T'} + \vec{T} = \vec{0} \Rightarrow \|\vec{T'}\| = \|\vec{T}\|$

or $\vec{T} + \vec{T_A} = \vec{0} \Rightarrow \|\vec{T}\| = \|\vec{T_A}\|$

d'où: $\|\vec{T'}\| = \|\vec{T_A}\| = M \cdot g$

2 - pour le dispositif 1 :

$\vec{T_A} + \vec{P_A} = M.\vec{a}$

projection sur (xx') : $-T_A + P_A = M.a_1 \Rightarrow a_1 = \frac{P_A - T_A}{M}$

- sur le dispositif 1 : en équilibre :

$\vec{T_A} + \vec{P_A} = \vec{0}$

projection sur (xx') : $-T_A + P_A = 0$

$\Rightarrow T_A = P_A = M.g$.

on a pour m : $\vec{P_B} + \vec{T_B} = m.\vec{a_2}$

projection sur (xx') : $P_B - T_B = m.a_2 \Rightarrow a_2 = \frac{P_B - T_B}{m}$

III - Conclusion :

1 - Les différentes forces calculées en II sont partiellement identi à celle en I.

2 - on a utilisé le référentiel : {Nasse} pour le dispositif 1 et {Nasse + masse} pour le dispositif 2. et un repère (xx') pour la projection → il y a un bon usage de PFD.

Résolution de l'étudiant e16
page 1/3

I Approche qualitative

1-1

Dispositif 1 :

Le dispositif reste immobile

Dispositif 2 :

Pour ce dispositif, il faut considérer 2 possibilités :

* $M \neq m \Rightarrow$ le tout entre en mouvement, le poids le plus lourd à une accélération vers le bas, et l'autre, la même accélération dirigée vers le haut

* $M = m \Rightarrow$ le dispositif est alors en équilibre, et il n'y a aucun mouvement.

1-2

a) Faux : si la tension est nulle, avec une force minim, on pourrait soulever des charges importantes, ce qui n'est pas le cas.

b) Faux : la tension est la même en tout point de la corde, sinon, en tout point cette dernière s'étirerait, or le fil est considéré comme inextensible.

c) Faux : si les masses sont identiques, la tension serait nulle.

d) Faux : dans le 1er dispositif, une seule masse entre en compte alors que dans l'autre, il y en a une seconde.

1/2

II Résolution de l'exercice

2-1

Dispositif 1 :

référentiel : terrestre supposé galiléen

système : {masse m}

forces : $\vec{P}$: poids $\vec{P} = m\vec{g}$

$\vec{T_A}$: tension au point A

RFD : système immobile

$\vec{P} + \vec{T_A} = \vec{0}$

$\vec{T_A} = -\vec{P}$

$\vec{T_A} = -m\vec{g}$

la tension d'une corde est identique en tout point donc

$\|\vec{T_A}\| = \|\vec{T_B}\| = \|m\vec{g}\|$ avec T_B : tension au point B

2-2

Dispositif 2 :

référentiel : terrestre supposé galiléen

Considérons 2 systèmes :

Système : {masse M}	Système : {masse m}
forces : $\vec{P_M} = M\vec{g}$ $\vec{T_{M1}}$	forces : $\vec{P_m} = m\vec{g}$ $\vec{T_m}$
RFD :	RFD :
$\vec{P_M} + \vec{T_M} = (m+M)\vec{a}$ (1)	$\vec{P_m} + \vec{T_m} = (m+M)\vec{a}$ (2)

L'accélération des 2 systèmes est identique (mais de sens opposé).

$\frac{\vec{P_M} + \vec{T_M}}{(m+M)} = \vec{a} = \frac{\vec{P_m} + \vec{T_m}}{(m+M)}$ où obtenons donc : $\frac{(\vec{P_M} + \vec{T_M}) - (\vec{P_m} + \vec{T_m})}{(m+M)} = \vec{a}$

or $T_M = T_m$ car la tension dans une corde est la même, on peut donc en déduire l'accélération :

$$\vec{a} = \frac{P_M - P_m}{(m+M)}$$

$$\vec{a} = \frac{M\vec{g} - m\vec{g}}{(m+M)}$$

$$\boxed{\vec{a} = \vec{g}\,\frac{(M-m)}{(m+M)}}$$

En revanche, pour la tension, je trouve après plusieur série de calcul des contractions dans mes résultats, mais il m'est impossible, a priori, de tirer la bonne conclusion (à par que certain calculs sont incohérents). En revanche, intuitivement, l'expression qui pourrait le plus se rapprocher, selon moi, de la tension serait :

$$\boxed{\vec{T} = \frac{(m+M)}{2}\vec{g}}$$

Résolution de l'étudiant e17
page 1/4

I) Approche qualitative

1) Dans le dispositif n°1 la masse M est immobile, celle ci est accrochée à une corde tendue et inélastique reliée à un mur par l'intermédiaire d'une poulie.

Dans le dispositif n°2, 2 masses sont reliées par l'intermédiaire d'une corde tendue passant sur 2 poulies reliées au plafond.
Si les 2 masses ont le même poids, il y aura équilibre après quelques oscillations sinon c'est la masse la plus lourde qui descendra jusqu'à ce que la masse plus légère soit bloquée au niveau de sa poulie.

2) a) L'affirmation A1 est fausse pour les 2 dispositifs. Dans les 2 cas le fil est tendu par l'action des 2 masses (dispositif 2) ou d'une masse et de la liaison au mur (dispositif 1).

b) L'affirmation A2 est fausse, car les cordes sont inélastiques, de masse négligeable tout comme les poulies

De plus on néglige les portés par frottements donc la tension de la corde peut être considérée comme constante tout le long de celle ci.

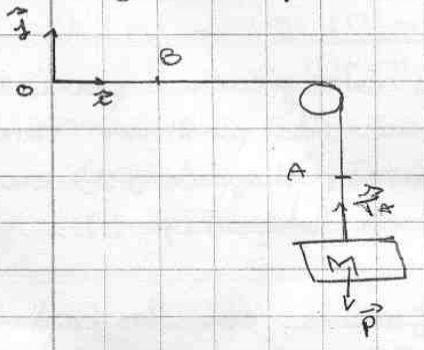
c) L'affirmation A_3 est fausse car si la force de tension vallait $(M-m)g$, on aurait une tension nulle si $M=m$, ce qui est faux.

d) L'affirmation A_4 est vraie dans le cas où $M=m$, la masse M serait immobile et on pourait considerer la masse m comme réaction du mur. le poids de
Dans le cas contraire cette affirmation me paraît fausse puisque dans le dispositif 1 il y aurait équilibre et $|\vec{T}|=|M\vec{g}|$ et dans le dispositif 2, il n'y aurait pas équilibre et $|\vec{T}|<|M\vec{g}|$ car la masse M descend.

II) Résolution de l'exercice.

1) dispositif 1 :

Référentiel terrestre supposé galiléen
Système {masse M}



La masse est immobile.
Forces extérieures appliquées au système :
- le poids $\vec{P}$
- la tension $\vec{T}$ de la corde

$$\begin{cases} \vec{P} = -Mg\,\vec{k} \\ \vec{T} = T\,\vec{k} \end{cases}$$

PFD :

$\vec{P} + \vec{T} = 0$

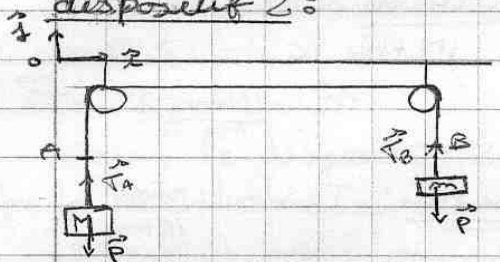
$\Rightarrow \vec{P} = -\vec{T}$

$\Rightarrow$ Sur $(O\vec{y})$: $-Mg = -T$

$\Rightarrow \boxed{T = Mg}$

Les masses des cordes et poulies sont négligeables.
Les cordes sont inélastiques et on néglige les pertes par frottement, on peut donc considérer la tension est la même tout le long de la corde.
Donc $\boxed{T_A = T_B}$.

dispositif 2 :



La masse m monte alors que la masse M descend car $M > m$.

Système $\{M\}$

$\vec{T_A} + \vec{P} = M\vec{a}$

$T_A \vec{j} - Mg\vec{j} = -Ma\vec{j}$

Sur $(O\vec{y})$: $T_A = M(-a + g)$ (1)

Système $\{m\}$

$\vec{T_B} + \vec{p} = m\vec{a}$

Sur $(O\vec{y})$: $T_B - m(a + g)$ (2)

Les accélérations de m et M sont les même mais de sens opposés

Système $\{M + m\}$

$\vec{T_A} + \vec{T_B} + \vec{P_A} + \vec{P_B} = \vec{a}(m - M)$ ~~car M accélère autant que m mais dans le sens inverse~~ dans

$\Rightarrow T_A + T_B = a(m - M) + g(m + M)$ (3)

(1) + (2) = (3)

$\Rightarrow M(g-a) + m(a+g) = (m-M)a + (M+m)g$

$\Rightarrow a(m-M) = a(m-M)$

$\rightarrow$ n'apporte rien

D'après les critères cités en I2b, on peut dire que :

$\vec{T_A} = \vec{T_B}$

$\underset{(1) \text{ et } (2)}{\Rightarrow} M(g-a) = m(a+g)$

$\rightarrow \boxed{a = \frac{g(M-m)}{(M+m)}}$ $\qquad \vec{a}_B = \frac{(M-m)}{(M+m)} g \vec{j}$.

$\vec{a_A} = -\frac{(M-m)}{(M+m)} g \vec{j}$

$\underset{(1)}{\Rightarrow} T_A = M\left(g - \frac{g(M-m)}{(M+m)}\right)$

$\rightarrow \boxed{T_A = \frac{2mMg}{M+m}}$ $\qquad \vec{T_A} = \frac{2Mmg}{M+m}\vec{j} = \vec{T_B}$

Vérification : $T_B = m\left(\frac{(M-m)}{(M+m)} g + g\right) = \frac{m}{(M+m)} 2Mg$

III) Conclusion

1) Dans les 2 dispositifs les forces de tension ont les même normes en tout point de la corde ce qui était prévu.

2) $|a| = \frac{|g|\,|M-m|}{|M+m|} = \frac{m.s^{-2}.\cancel{kg}}{\cancel{kg}}$ correct

mes résultats ne sont pas en contradiction avec mes prévisions.

Résolution de l'étudiant e18
page 1/5

Physique n°1

Masses et Poulies

On s'interesse à deux dispositifs dont les masses des cordes et poulies sont considérées negligeables devant les masses M et m. pas de frottement et les cordes sont inélastique

I - APPROCHE QUALITATIVE

Considerons le dispositif ① : il est immobile car sa masse est accrochée à un mur. le système est en equilibre donc immobile.
. statique

Considerons le dispositif ② : il est mobile et a un mouvement de translation rectiligne accelerée
. dynamique

Si M > m, on aura une chute libre, la masse M va se deplacer vers le bas dans un mouvement accéléré

2- discussion sur les affirmations.

A1 : faux car la tension de corde n'e peut pas être nulle dans le dispositif ② de corde horizontale étant bien tendu.

Si sur une même branche de corde, la masse des cordes est negligeable et la masse des poulies sont

negligeables alors la corde est tendue et inextensible.

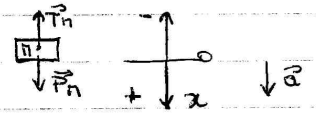
A2 - Faux: car une poulie de masse negligeable fait "tourner" la force exercée par un fil, la tension reste inchangé.

A3 - Si on prend tout le système, on a la même accélération donc $\vec{T}_{m+}\vec{P}_M = \vec{M}a$ et $\vec{T}_m + \vec{P}_m = m\vec{a}$
$\vec{T}_1 = -mg + Ma$ donc la face de tension ne peut pas être $(M-m)g$.
$\vec{T}_R = M\vec{a} - \vec{P}_R = M\vec{a} - Mg =$

A4. Faux. Car on a un mouvement statique dans le dispositif ① donc il n'y a pas d'accélération et somme des forces est egales à zero.
Le dispositif ② est en mouvement donc dynamique et la somme des forces est egale à $m\vec{a}$ donc
$T\vec{M}_A + \vec{P} = 0 \neq T\vec{M}_A + \vec{T}_R = M\vec{a}$.

II Resolution de l'exercice.

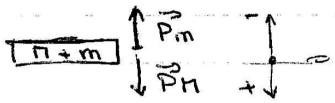
dispositif ② ① on sait dans un referentiel galiléen.
② on isole le système M



système en mouvement rectiligne, qui se déplace vers le bas.
on isole le système m



En négligeant la masse des poulies, on isole le système m+n



③ Bilan des forces.

système M : $\sum \vec{F}_{ext} = M\vec{a} \Rightarrow \vec{T}_M + \vec{P}_M = M\vec{a}$

système m : $\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{T}_m + \vec{P}_m = m\vec{a}$

système(m+M) : $\sum \vec{F}_{ext} = (m+M)\vec{a} \Rightarrow \vec{P}_m + \vec{P}_M = (m+M)\vec{a}$

on projete sur ox : $-mg + Mg = (m+M)a$

$$a = \frac{(M-m)g}{m+M} \Rightarrow \text{accélération}$$

on cherche la Tension T

on pose $\vec{T}_M + \vec{P}_M = M\vec{a}$

$\vec{T}_M = M\vec{a} - \vec{P}_M$

$T_M = M\left(\frac{(M-m)g}{(m+n)}\right) - Mg$

$T_M = Mg.\left[\frac{M-m}{m+M} - 1\right] = \frac{Mg}{m+M}\left[(M-m)-(m+n)\right]$

$= \frac{Mg}{m+M}\left[M-m-m-M\right]$

$$\|\vec{T}_M\| = -\frac{2mMg}{m+n}$$

on cherche tension en m

$\vec{P}_m + \vec{T}_m = m\vec{a}$

$\vec{T}_m = m\vec{a} - \vec{P}_m$

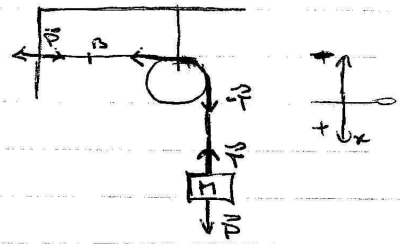
$\vec{T}_m = -m\left(\frac{M-m}{m+n}\right)g - mg$

$= -mg\left[\frac{n-m}{m+n} + 1\right]$

$T_m = \frac{-mg}{m+n}\left[(M-m)+(m+n)\right] = \frac{-mg}{m+n}\left[M-m+m+n\right]$

$$\|\vec{T}_m\| = \frac{-2Mmg}{m+n}$$

dispositif ① ① on est dans un référentiel galiléen.
② système.



accélération nulle.

la force de tension qui s'exerce sur M : $\Sigma F = 0$ $P + T_M = 0$ $T_M = -P$
la force exercée sur B est P $T_M = -mg$

III Conclusion.

On remarque que la tension trouvée dans le dispo(①) est différente de celle trouvée dans le dispo(②A).
Dans le dispo(②) les deux tensions sont égales $\vec{T_M} = \vec{T_m}$

Les tensions trouvées en II ne correspondent pas à ce que j'avais prévu en I.

2. Vérification.
Analyse dimensionnelle.

$$[a] = \frac{[(M-m)g]}{[m+M]} = \frac{[kg]}{[s^2]} = [a]$$
$$\frac{[kg - kg]}{kg} \times \frac{[kg]}{[s^2]} = \frac{[kg]}{[s^2]}$$

} analyse de dimension cohérente.

$$[T_M] = \frac{[-2Mmg]}{[(m+M)]} \qquad [T_M] = [\text{force}]$$
$$= \frac{[-2 \cdot [kg][kg][m][s^{-2}]]}{[kg + kg]} = \frac{[-2[kg^2][m][s^{-2}]]}{2[kg]}$$

$$\frac{[-2.[kg].[m].[s^{-2}]}{2} = \frac{[kg].[m]}{[s^2]} = [kg][m][s^{-2}] \Rightarrow [force]$$

analyse cohérente sur les résultats.

b - Cas limites.

si $M = m$ on a $T_n = \frac{-2m.mg}{m+m} = \frac{-2m^2g}{2m} = -mg$ cohérent.

si $M = 0$ on a $T_n = \frac{-2.0.m.g}{m} = 0$ cohérent.

- Après analyse et réaction du problème ; on remarque que le PFD qui est une connaissance acquise en cours nous permet de résoudre l'exercice II car nous nous trouvons d'un système en mouvement ou non (statique)
- En mettant tout les caractéristiques des dispositifs, nous avons remarquer que les connaissances théoriques sur la dynamique peuvent être utiliser dans ces cas.

- En lisant les énoncés, nous avons tous de suite penser au calcul, sans situé le système et déterminer son mouvement.
La démarche s'est fait après et nous pensons avoir utiliser la démarche correcte avec de petite erreur toi en sûr.

Résolution de l'étudiant e19
page 1/4

I) Approche qualitative.

1) Dispositif 1: la masse M ou son poids est très inférieur à celui du mur auquel elle est attaché. La corde est tendue.

Dispositif 2: Si la masse M est supérieure à m alors M descend.

2) a) FAUX: la tension de la corde dans les parties horizontales est la même que dans les parties verticales car la corde est inextensible et de masse négligeable.

b) FAUX: la tension est la même sur la longueur de la corde.

c) VRAI: la tension exercé de la masse M est en tout le dispositif 2 et elle est la même sur la longueur de la corde.

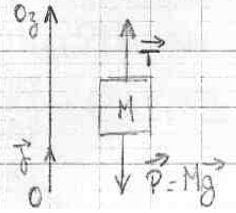
d) FAUX: dans le dispositif 2, la masse m rentre en compte dans l'expression de la tension ce qui n'est pas le cas dans le dispositif 1.

II) Résolution de l'exercice.

1) mouvement: la masse M est immobile.

système étudié: {M}

Référentiel: terrestre considéré comme galiléen.



Bilan de force : • à distance : poids $\vec{P}$
• de contact : tension de la corde $\vec{T_A}$
(on néglige les frottements)

La masse M ne bouge pas on a donc selon le principe fondamental de la dynamique :

$$\vec{P} + \vec{T_A} = \vec{0}$$

projection selon Oz : $\|\vec{T_A}\| - \|\vec{P}\| = 0$

D'où $\|\vec{T_A}\| = \|\vec{P}\| = Mg$.

La force de tension qui s'exerce au point B est la même que celle qui s'exerce sur M car on néglige les frottements et la masse de la corde et on considère la corde comme inextensible.

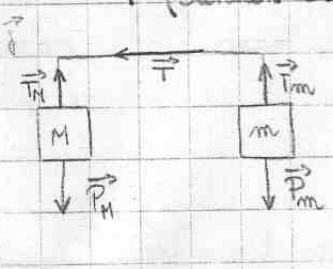
2). mouvement : M descend et m monte car $M > m$

Référentiel : terrestre considéré comme galiléen

Système étudié : $S = \{M+m\}$

$\vec{a_M} = \vec{a_m} = \vec{a}$

Bilan de force : $\vec{P_M}$ (poids de la masse M)
$\vec{P_m}$ (poids de la masse m)
$\vec{T}$ (tension totale le long de la corde)
(on néglige les frottements)



Selon le PFD : $\vec{P_M} + \vec{P_m} + \vec{T} = (M+m)\vec{a}$

Or $\vec{T} = \vec{P_M} - \vec{P_m} = (M-m)\vec{g}$

projection selon Oz : $-\|\vec{T}\| + \|\vec{P_M}\| + \|\vec{P_m}\| = (M+m)\vec{a}$

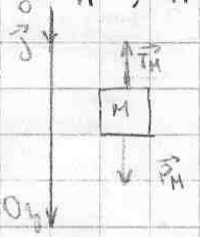
$$\Rightarrow -\|\vec{P_M}\| + \|\vec{P_m}\| + \|\vec{P_M}\| + \|\vec{P_m}\| = (M+m)\|\vec{a}\|$$

$$\Rightarrow 2\|\vec{P_m}\| = (M+m)\|\vec{a}\|$$

$$\Rightarrow \|\vec{a}\| = \frac{2\|\vec{P_m}\|}{(M+m)} = \frac{2mg}{M+m}$$

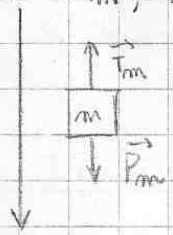
On cherche maintenant à déterminer les forces de tensions en m et M appellons respectivement ces tensions $\vec{T}_m$ et $\vec{T}_M$

- système étudié : $\{M\}$
  Référentiel : terrestre considéré comme galiléen
  Bilan de force : $\vec{T}_M$, $\vec{P}_M$ (frottements négligés)



Selon le principe fondamental de la dynamique
$\vec{T}_M + \vec{P}_M = M\vec{a}$
projection selon O_z : $-\|\vec{T}_M\| + \|\vec{P}_M\| = M\|\vec{a}\|$
$\Rightarrow \|\vec{T}_M\| = \|\vec{P}_M\| - M\|\vec{a}\|$
$\Rightarrow \|\vec{T}_M\| = Mg - M\left(\frac{2mg}{M+m}\right) = M\left(g - \frac{2mg}{M+m}\right)$

- système étudié : $\{m\}$
  Référentiel : terrestre considéré comme galiléen
  Bilan de forces : $\vec{T}_m$, $\vec{P}_m$ (frottements négligés)



Selon le PFD :
$\vec{T}_m + \vec{P}_m = m\vec{a}$
projection selon O_z : $-\|\vec{T}_m\| + \|\vec{P}_m\| = m\|\vec{a}\|$
$\Rightarrow \|\vec{T}_m\| = \|\vec{P}_m\| - m\|\vec{a}\|$
$\Rightarrow \|\vec{T}_m\| = mg - m\left(\frac{2mg}{M+m}\right) = m\left(g - \frac{2mg}{M+m}\right)$

Résolution de l'étudiant e19
page 4/4

III) Conclusion.

Les résultats de I correspondent aux prévisions qualitatives de I.

Le cas limite pour le ressort 2 est atteint lorsque la masse m se coince dans la poulie on a alors une accélérat° de $\vec{0}$.

On retrouve ce résultat avec l'expression trouvée pour $\|\vec{a}\|$ car lorsque m est coincée dans la poulie tout se passe comme si $m=0$ donc $\frac{2mg}{M+m}=0 \Rightarrow \|\vec{a}\|=0$.

Résolution de l'étudiant e20
page 1/5

I. Approche qualitative

1. - Le dispositif 1 est statique ; il n'y a pas de mouvem donc les forces se compensent.

- Dans le dispositif 2, on va pouvoir observer un mouvement rectiligne, vertical. ce mouvement va du haut vers le bas pour la masse M et du bas vers le haut pour la masse m.

2.

a. A_1 : " La tension de la corde est nulle dans les parties horizontales ".

cette affirmation est fausse car, les masses des cordes et des poulies étant considérées comme négligeables devant les masses M et m, et les dissipations par frottement étant négligées également, la tension de la corde est constan

tout le long de celle – ci. Or $T_M = T_m \neq 0$.

b. A_2 : " Au point A la force de tension est plus grande qu'au point B (Dans le dispositif 2 c'est parce que $M > m$)"

Cette affirmation est fausse car comme nous l'avons vue précedement, la tension de la corde est constante et non nul tout le long de celle – ci.

c. A_3 : "Dans le dispositif 2, la force de tension vaut $(M - m)g$ en tout point de la corde"

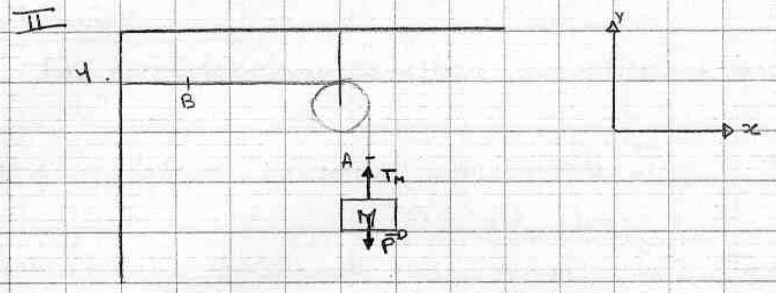
Cette affirmation est fausse car si on suit ce résultat, dans le cas où $m = M$, la force de tension serait nul.
Or pour $m = M$ on a $T \neq 0$ (pour $m \neq 0$)

d. A_4 : " La force de tension qui s'exerce au point A dans le dispositif 1 est égal à celle au point A dans le dispositif 2. (car les masses suspendues à la corde sont identiques)"

Cette affirmation est fausse car dans dispositif 1 (statique), il n'y a pas de mouvement donc les forces se compensent et $P_M = T_M$; en dans le dispositif 2 il y a un mouvement donc $P_M \neq T_M$.

II

4.



Les forces exterieures appliquées au système sont $\vec{P_M}$ et $\vec{T_M}$.

Ce dispositif est à l'équilibre, il n'y a pas de mouvement, donc : $\sum \vec{F} = \vec{0}$

donc $\vec{P_M} + \vec{T_M} = \vec{0}$

donc $-P_M + T_M = 0$

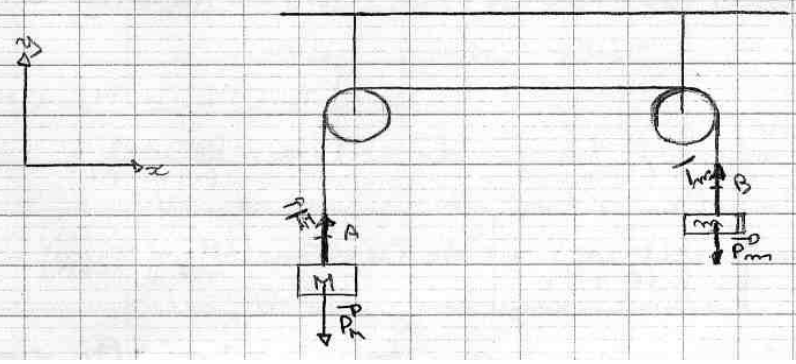
donc $T_M = P_M$

or $P_M = M.g$ donc $\boxed{T_M = M.g}$

De plus les masses des cordes et des poulies sont négligeables devant la masse M et les dissipations pour frottement sont négligeables elles aussi.

Donc $\boxed{T_A = T_B = T_M}$

2.



Les forces exterieurs appliqués aux systèmes sont :

① - $\vec{P}_M = M\vec{g}$; $\vec{T}_M$; dans un premier système isolé.

② - $\vec{P}_m = m\vec{g}$; $\vec{T}_m$; dans un deuxième système isolé.

Nous sommes dans le cas d'un mouvement rectiligne vertical dans les deux cas :

Donc, d'après la relation fondamentale de la dynamique :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$$

* l'accelération est la même pour les 2 systèmes car on néglige les forces de frottement et le poids de la corde et des poulies. (au signe près)

Donc on obtient un système de 2 équations à 3 inconnues :

$$\begin{cases} \vec{P}_M + \vec{T}_M = M\vec{a} \\ \vec{P}_m + \vec{T}_m = m\vec{a} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} -P_M + T_M = -Ma \\ -P_m + T_m = ma \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} T_M = -Ma + Mg \\ T_m = ma + mg \end{cases}$$

on comme prouvé précédemment la tension est constante donc $T_m = T_M$

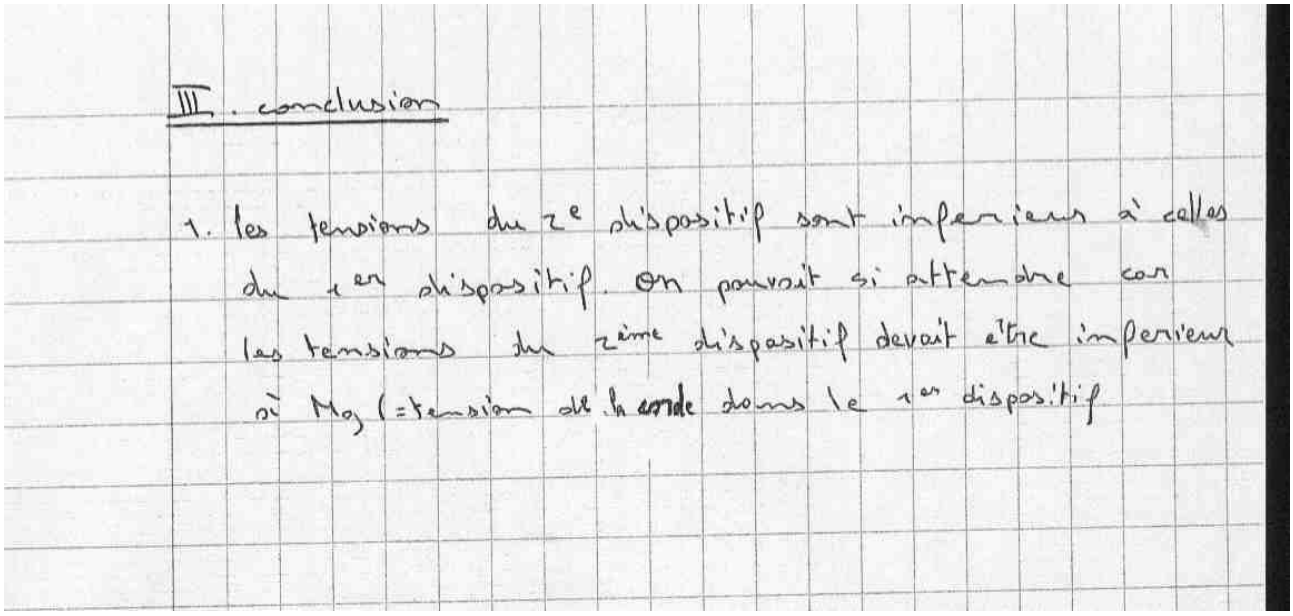
$$\Leftrightarrow \begin{cases} T_M = T_m = -Ma + Mg \\ 0 = -Ma + Mg - ma - mg \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} T_M = T_m = -Ma + Mg \\ a = \dfrac{(M-m)}{(m+M)} g \end{cases}$$

donc $\boxed{a = \pm \dfrac{(M-m)}{(m+M)} g}$ et $\boxed{T_M = T_m = -Mg\left(\left(\dfrac{M-m}{m+M}\right) - 1\right)}$

$\boxed{\text{donc } T_M = T_m = 2Mg \times \dfrac{m}{M+m}}$

Résolution de l'étudiant e20
page 5/5



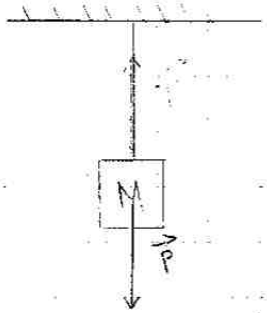
III. conclusion

1. les tensions du 2e dispositif sont inférieurs à celles du 1er dispositif. On pouvait s'attendre car les tensions du 2ème dispositif devait être inférieur à M_{02} (= tension de la corde dans le 1er dispositif

Résolution de l'étudiant e21
page 1/6

2) Approche qualitative:

1/ Dispositif 1: Ce dispositif est en équilibre car 2 forces se compensent, les forces en question sont: - le poid de la masse M et - la réistance exercée par le mur (sur la corde).
Attention: ces forces ne sont pas colinéaires (à cause de la poulies).
Tout ce passe comme si on avait le dispositif suivant:



Dispositif 2:
. si M = m alors le dispositif 2 est immobile.
. si M > m alors M descend et m monte.
. si M < m alors M monte et m descend

* la masse qui descend subit une accélération vers le bas tandis que celle qui monte subit la même accélération mais en sens inverse (ceci jusqu'au moment ou une des 2 masses se bloque a une poulie), à ce moment la disp. 2 sera similaire à disp. 1.

2) a) A_1

NEP: FAUX pour disp. 1 et disp 2.

Le fil de masse négligeable est tendu donc le module de la tension au sein du fil est constant dans toute sa longueur de celui-ci, de plus on exerce des forces sur lui (supposons M et m non négligeables) (car 1 poulie de masse négligeable ne fait que dévier 1 force) ce qui entraîne que la tension ne peut être nulle.

Un potentiel: Sauf si M et m sont de masse nulles alors la tension de la corde est nulle.

b) A_2 FAUX

La tension au sein d'un fil est la même quelque soit les forces appliquées à ses extrémités.

c) A_3 FAUX

Contre exemple : si $M = m \neq 0$ alors $(M-m)g = 0$ or la force de tension n'est pas nulle dans le cas $M = m \neq 0$

d) A_4 Faux si $M \neq m$ mais VRAI si $M = m$ car dans le dispositif 2 la force exercée par le mur sur la corde a le même module que celle exercée par le poid de M.

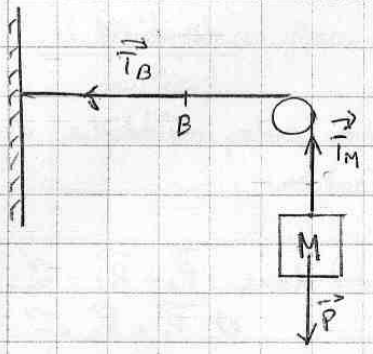
II) Résolution de l'exercice :

1) dispositif 1 :

référentiel : terrestre supposé Galiléen
système : la masse M

Forces : Poid : $\vec{P} = m\vec{g}$ (force à distance)
tension : $\vec{T}$ (force de contact)

mouvement immobile donc $\vec{P} + \vec{T} = \vec{0}$
donc $\vec{P} = -\vec{T}$
donc $\boxed{\|\vec{T}\| = Mg}$

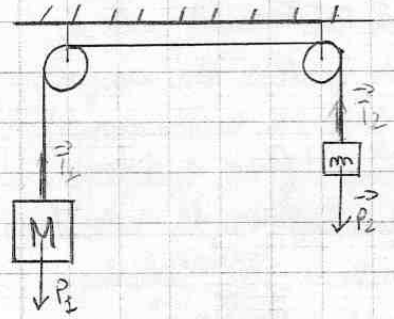


force de tension qui s'exerce sur M : $\|\vec{T}_M\| = Mg$

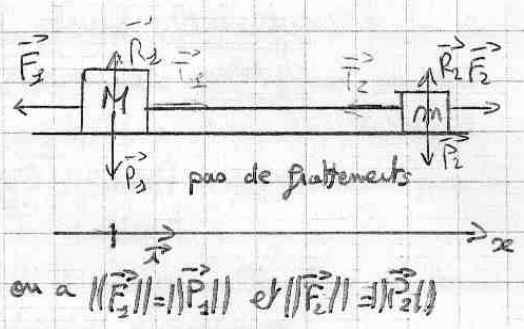
le fil est tendu donc la tension au point B est la même que celle qui s'exerce sur M. donc $\|\vec{T}_B\| = \|\vec{T}_M\|$

2) dispositif 2 :

le dispositif 2 est semblable au dispositif que j'appelle dispositif 2 b).



dispositif 1



on a $\|\vec{F_1}\| = \|\vec{P_1}\|$ et $\|\vec{F_2}\| = \|\vec{P_2}\|$

dispositif 2

M et m sont reliées par une corde inélastique donc M et m subissent la même accélération.

calculons la :

on a mouvement horizontal donc $\vec{P_3} + \vec{R_3} = \vec{0}$

et $\vec{P_2} + \vec{R_2} = \vec{0}$

Référentiel : terrestre supposé Galiléen

système : les 2 masses avec la corde.

Forces : ~~$\vec{T_1}$ et $\vec{T_2}$~~

on a $\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$ (2° loi de Newton, applicable car M et m constants)

donc $\vec{F_1} + \vec{P_3} + \vec{R_3} + \vec{P_2} + \vec{R_2} + \vec{F_2} = (M+m)\vec{a}$

donc $\vec{F_1} + \vec{F_2} = (M+m)\vec{a}$

donc $-Mg\vec{i} + mg\vec{i} = (M+m)\vec{a}$

donc $\boxed{\vec{a} = \dfrac{(m-M)}{(M+m)} g\vec{i}}$

(à noter qu'un déplacement vers la gauche au disp. 2 correspond à une descente de M et une montée de m au disp 1 et inversement s'il y a déplacement vers la droite)

PHY 121 DM (suite)

II) 2) (suite)

donc si M > m M subit une accélération vers le bas et m en subit une vers le haut et celle-ci a comme valeur $\frac{(m-M)}{(M+m)} g$

bien sûr si M = m pas de mouvement.

calcul des forces de tension :

* prenons le système {M}

référentiel : terrestre sup Gal.

on a $\vec{F_3} + \underbrace{\vec{P_1} + \vec{R_1}}_{\vec{0}} + \vec{T_1} = M\vec{a}$

donc $-Mg\vec{i} + T_1\vec{i} = M \cdot \frac{(m-M)}{(M+m)} g\vec{i}$

donc $\|\vec{T_1}\| = M\frac{(m-M)}{(M+m)} g + Mg$

donc $\boxed{\|\vec{T_1}\| = gM\left[\frac{(m-M)}{(M+m)} + 1\right]}$

* prenons le système {m}

réf : terrestre sup. Gal. on a $\underbrace{\vec{T_2} + \vec{R_2}}_{\vec{0}} + \vec{F_2} + \vec{T_2} = m\vec{a}$

donc $mg\vec{i} - T_2\vec{i} = m\frac{(m-M)}{(m+M)} g\vec{i}$ donc $T_1\vec{i} = mg\left[1 - \frac{(m-M)}{(m+M)}\right]\vec{i}$

$\|\vec{T_2}\| = mg\left[1 - \frac{(m-M)}{(m+M)}\right]$

III) Conclusion :

1) dispositif 1 : on a $\|\vec{T}\| = Mg$ tout le long de la corde.

dispositif 2 :

on a $\|\vec{T}_2\| = gM\left[\frac{(m-M)}{(m+M)} + 1\right]$ et $\|\vec{T}_2\| = gm\left[1 - \frac{(m-M)}{(m+M)}\right]$

$$\|\vec{T}_2\| - \|\vec{T}_2\| = gM\left[\frac{(m-M)}{(m+M)} + 1\right] - gm\left[1 - \frac{(m-M)}{(m+M)}\right]$$

$$= g\left\{\frac{M(m-M)}{(m+M)} + M - m + \frac{m(m-M)}{(m+M)}\right\}$$

$$= g\left[\frac{Mm - M^2 + Mm + M^2 - m^2 - mM + m^2 - mM}{m+M}\right]$$

$$= 0$$

donc $\|\vec{T}_2\| = \|\vec{T}_2\|$

pour le dispositif 2 la force de tension qui s'exerce sur le fil a comme valeur $gM\left[\frac{(m-M)}{(m+M)} + 1\right]$ et ceci est bien en accord avec ce que j'avais prévu au I.

2) cas limites : si $m = M$ alors $m - M = 0$

donc $gM\left[\frac{(m-M)}{m+M} + 1\right] = 0$

si $M > m$ on a $m - M < 0$ donc $-(m-M) > 0$ et $-\frac{(m-M)}{m+M} < 1$

donc $gm\left[1 - \frac{(m-M)}{m+M}\right] > 0$ donc cohérent.

si $m > M$ $m - M > 0$ donc $gM\left[\frac{(m-M)}{m+M} + 1\right] > 0$ donc cohérent aussi.

Tout me semble donc très cohérent.

Salah

I - Approche qualitative

1 - Dans le dispositif 1, la masse M va descendre jusqu'à ce que la partie horizontal soit tendue, et le dispositif reste en équilibre.

- Dans le dispositif 2, comme on a $M > m$ la masse M va descendre et m va monter, (système en mvt)

2 - a - La tension dans la portion horizontal n'est pas nulle, car si elle l'était, le dispositif lâche et la masse va tomber

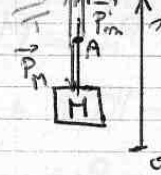
b - comme on a : - Les masses des cordes négligeables et celles des poulies égalent
- Les frottement négligeables
- les cordes sont inélastiques.

=> donc on peut considérer les modules des forces de tensions égaux en tous pt de la corde

c - comme on a constaté, la tension est égale à une cte en tous pt de la corde, donc si on considère le pt A :

en A on a : $\sum \vec{F} = \vec{0}$ (Si on prend la corde comme référentiel)

$\Rightarrow \vec{T} + \vec{P}_m + \vec{P}_M = \vec{0}$



la projection //(ox) $\|\vec{T}\| + \|\vec{P}_m\| - \|\vec{P}_M\| = 0$

$\Leftarrow \|\vec{T}\| = M.g - m.g = (M-m).g$ en tous pts

d - C'est faux car le pt A dans (1) est soumis à une tension et le poid de M, alors que dans (2) il est soumis à une tension et deux poids : celui de M et de m ;

II - Résolution de l'exercice :

1- la masse M est en équilibre

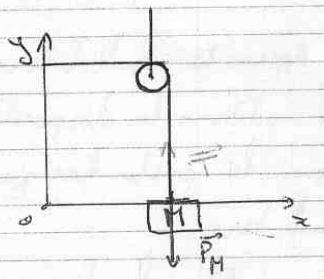
donc d'après le P.F.D :

$\vec{P_M} + \vec{T} = \vec{0}$

$\Leftrightarrow$ proj (O,y) $\|\vec{T}\| = \|\vec{P_M}\|$

$= M.g$

$\Rightarrow$ donc on a $\|\vec{T}\| = M.g$ en tous pts de la corde, donc en B



2- comme on a une corde inélastique donc l'accélération de M et celle de m sont les mêmes en module

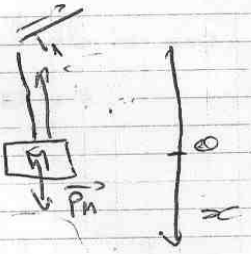
on pose M d'après la P.F.D

$\vec{P_M} + \vec{P_m} = M\vec{a}$ avec $\|\vec{P_m}\| = \|\vec{P_m}\|$

$\Leftrightarrow$ $\|\vec{P_M}\| - \|\vec{P_m}\| = M\,a$

$\Leftrightarrow$ $a = \dfrac{M.g - m.g}{M}$

$a = \left(\dfrac{M-m}{M}\right).g$



2- Si on prend comme système (M + fil)

M est en mvt donc d'après la P.F.D :

$\Sigma \vec{F} = M.\vec{a}$

$\vec{T} + \vec{P_M} = M.\vec{a}$

Mesure $-\|\vec{T}\| + M.g = M.a$

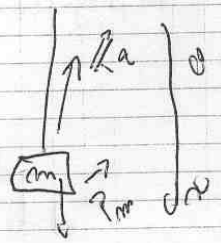
$\Leftrightarrow$ $a_1 = \dfrac{M.g - \|\vec{T_1}\|}{M}$

+ de même pour (m + fil)

$\Sigma \vec{F} = m.\vec{a_2}$

$\Leftrightarrow$ $-\|\vec{T_2}\| + m.g = -m\,a$

donc $a_2 = -\dfrac{m.g - \|\vec{T_2}\|}{m}$



on ($a_1 = -a_2$) car on a un fil inélastique :

donc $\dfrac{M.g - \|\vec{T_1}\|}{M} = \dfrac{m.g - \|\vec{T_2}\|}{m}$

donc $-\|\vec{T}_1\| = \frac{M}{m}\left(m.g - \|\vec{T}_2\|\right) - M.g$

$\|\vec{T}_1\| = \frac{M}{m}\|\vec{T}_2\| - 2M.g$

donc si $\|\vec{T}_1\| = \|\vec{T}_2\| = \|\vec{T}\|$

alors $\|\vec{T}\| = -\frac{2Mg}{1 - \frac{M}{m}}$

$\Leftrightarrow \|\vec{T}\| = \frac{2Mg}{\frac{M-m}{m}} = \frac{2M.m.g}{M-m}$

III Conclusion

1) Pour le dispositif 1, on a un résultat qui confirme ce qu'on a prévu.

Alors que dans le dispositif 2 on a prévu que $\|\vec{T}\| = (M-m)g$

Si c'est le cas :

$M - m = \frac{2Mm}{M-m}$

$\Leftrightarrow M^2 + m^2 - 2Mm = 0$

Résolution de l'étudiant e23
page 1/4

I - Approche qualitative :

1) Dans le cas du dispositif 1, une masse M est reliée par un fil et coulisse par le biais d'une poulie. Le fil étant apparamment fixé au mur et tendu, nous montrons que la masse M est statique et que cette situation n'évoluera pas au cours du temps

Dans le cas du dispositif 2, nous avons deux masses M et m, tel que, à priori M > m, relié à un fil qui coulisse par l'intermédiaire de 2 poulies et chaque poulie étant rattaché à une masse. Le dispositif peut-être considéré comme une balance à bascule, c'est à dire que pour des masses constantes, le système où la masse est la plus grande à tendance a bouger vers le sol - et entraîne dans sa chute la montée de l'autre système correspondant à la masse inférieure.

2) a) A mon avis, dans le dispositif 1) il existe une tension dans les parties horizontales, car le fil étant attaché au mur, il existe une certaine tension à ce niveau pour que le fil reste en place et qu'il n'est pas tendance à être entraîné par M. En revanche, pour le dispositif 2) la tension est nulle dans les parties horizontales car le fil n'est rattaché à aucun point fixe, donc il n'a pas besoin de compenser la force exercé par ce point, sur ce fil (force permettant l'immobilité du fil)

b) Au point A, la force de tension est égale au point B, car une tension est conservé le long d'un fil, si sa masse est négligeable

c)

Résolution de l'étudiant e23

II Résolution de l'exercice

1- Nous pouvons considérer le dispositif 1 comme un referentiel Galiléen.
le système pris en compte est la masse M.
Pour ce système le mouvement reste immobile au cours du temps
Les forces extérieurs s'exerçant sur le système sont le poids de la masse et la tension du fil
D'après le principe fondamental de la dynamique, on a : $\sum \vec{F}_{ext} = \frac{d\vec{p}}{dt}$

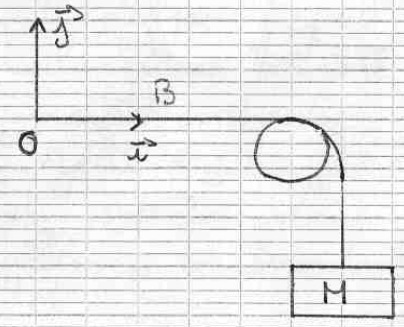
$= M \frac{d\vec{v}}{dt}$ or comme le système est immobile, la vitesse est nulle, d'où

$\vec{P} + \vec{T} = \vec{0}$

$\vec{T} = -\vec{P}$ comme $\vec{T}$ et $\vec{P}$ sont des vecteurs colinéaires mais de sens opposé, on a:

$T = P = Mg$

Pour dispositif 2), on prend le même référentiel, le même système.
le mouvement reste toujours immobile
Coordonnée :



D'après le principe fondamental de la dynamique, on a : $\sum \vec{F}_{ext} = \frac{d\vec{p}}{dt}$

$$\|\vec{P}\| + \|\vec{T}\| = m\frac{d\vec{v}}{dt}$$

$$\|\vec{P}\| - \|\vec{T}\| = 0$$

$$\|\vec{P}\| = \|\vec{T}\|$$

On a que la force du poids est la même de la tension en tout point de la corde

2) Prenons système 1, constitué de la masse M

$$\sum \vec{F}_{ext} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

$$\vec{P}_1 + \vec{T}_1 = M\frac{d\vec{v}}{dt}$$

$$Mg - T = M \times a$$

$$a = g - \frac{T}{M}$$

Prenons système 2, constitué de la masse m

$$\sum \vec{F}_{ext} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

$$\vec{P}_2 + \vec{T}_2 = M \times a$$

$$a = g - \frac{T_2}{M}$$