



FACULTÉ D'ÉDUCATION

Département de pédagogie

La valeur pédagogique du laboratoire-démonstration au secondaire :
Apprentissages relatifs à la théorie de la gravité d'Albert Einstein

par Alain Houle 09 043 135

Essai présenté à la Faculté d'éducation
en vue de l'obtention du grade de
Maîtrise qualifiante
Enseignement au secondaire – Science et Technologie

Janvier 2017

© Alain Houle, 2016



FACULTÉ D'ÉDUCATION

Département de pédagogie

La valeur pédagogique du laboratoire-démonstration au secondaire :

Apprentissages relatifs à la théorie de la gravité d'Albert Einstein

par Alain Houle 09 043 135

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Dr. Isabelle Nizet

Directrice de recherche

(Prénom et nom de la personne)

Pr. Florian Meyer

Autre membre du jury

(Prénom et nom de la personne)

Essai accepté le 28 septembre 2016

SOMMAIRE

Enseigner la science au secondaire s'avère difficile quand vient le temps d'expliquer à l'élève un concept théorique complexe. La Théorie de la Relativité Générale d'Albert Einstein (aussi appelé théorie de la gravité) illustre bien ce défi pédagogique puisqu'elle est habituellement enseignée à l'université. Notre but s'est ainsi fixé à deux niveaux : 1) quantifier la valeur pédagogique du laboratoire-démonstration (de type *modeling*) lors de l'enseignement, à l'aide d'un simulateur de gravité de grand format ($\emptyset = 2$ m), de la théorie d'Einstein, en comparant les savoirs acquis avant versus après la démonstration; et 2) tester qualitativement si la pédagogie de l'intégration, associée à l'environnement numérique, pouvait appuyer le personnel enseignant à mieux enseigner au secondaire une théorie complexe. Nous avons testé notre SAÉ dans un collège privé situé sur la rive-sud de Montréal au sein de trois groupes enrichis de 87 élèves inscrits en 5^e secondaire aux deux cours à option *Techniques et Méthodes en Science* de même que *Physique*. Cet arrangement unique nous a permis de contraster le concept de gravité selon Newton versus Einstein, tout en insistant sur la pertinence du second auteur. Tout en utilisant comme élément déclencheur la découverte spectaculaire des exoplanètes et la probabilité grandissante de découvrir de la vie extraterrestre, nous avons trouvé que le laboratoire-démonstration permettait significativement de réduire de 4 fois la proportion d'élèves incapables d'expliquer la théorie d'Einstein (de 4,7% avant à 1,2% après la démonstration) et de 5 fois la proportion qui ne savait rien de cette théorie (de 61,2 à 12,2%). De plus, la proportion d'élèves qui ont répondu d'une manière partiellement correcte a doublé après la démonstration (de 24,7 à 48,8%) et celle des élèves qui ont offert une réponse entièrement correcte a quadruplé (de 9,4% à 37,8%). Ces différences sont hautement significatives sur le plan statistique (*Test Q de Cochran pour échantillons appariés* = 37,74, *DF* = 1, *N* = 82 élèves, *P* = $8,11 \times 10^{-10}$). De manière qualitative, nous concluons que l'élève a apprécié le fait d'être stimulé par des questions scientifiques complexes (tel que prédit par la pédagogie de l'intégration), alors que l'utilisation de l'environnement numérique lui a permis de maintenir et possiblement d'augmenter sa motivation face à ses apprentissages. Notre projet d'enseigner une théorie aussi complexe que la gravité d'Einstein à des élèves du secondaire nous a poussé à réfléchir sur notre développement en tant que professionnel de l'enseignement. Le plus difficile aura sans nul doute été de développer le projet de telle sorte qu'il favorise à la fois la motivation et l'apprentissage de l'élève.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	1
LISTE DES TABLEAUX	6
LISTE DES FIGURES	7
INTRODUCTION	11
PREMIER CHAPITRE – PROBLÉMATIQUE	15
SECOND CHAPITRE – CADRE THÉORIQUE	21
2.1. RECENSION DES ÉCRITS	21
2.1.1. Apprendre en regardant : Valeur pédagogique du laboratoire- démonstration (de type <i>modeling</i>)	21
2.1.2. Apprendre une tâche complexe : la pédagogie de l'intégration	22
2.1.3. Motivation d'apprendre : Utilisation d'un appareil numérique	23
2.1.4. Le risque d'apprendre : Utilisation des réseaux sociaux dans l'enseignement au secondaire	25
2.2. CHOIX THÉORIQUES ISSUS DE LA RECENSION POUR LA CONCEPTION DU MATÉRIEL PÉDAGOGIQUE	26
2.3. QUESTIONS DE RECHERCHE	28
TROISIÈME CHAPITRE – MÉTHODOLOGIE	29
3.1 TYPE D'ESSAI ET MÉTHODOLOGIE PROPOSÉ	29

3.2	CONTEXTE PÉDAGOGIQUE LORS DE LA CRÉATION ET DE LA MISE EN PLACE D'UNE SITUATION D'APPRENTISSAGE ET D'ÉVALUATION (SAÉ)	30
3.2.1	Signification d'une Situation d'Apprentissage et d'Évaluation	31
3.2.2	Développement des compétences disciplinaires et transversales	31
3.2.3	Concepts prescrits par le Ministère de l'Éducation	33
3.2.4	Exécuter une SAÉ intéressante et motivante pour l'élève et enrichissante sur le plan des compétences et des savoirs	34
3.2.5	L'élément déclencheur	35
3.2.6	Organisation de la classe et de la SAÉ	36
3.2.7	Gestion de classe et consignes de sécurité.....	37
3.2.8	Évaluation des compétences disciplinaires et transversales	38
3.3	MISE À L'ESSAI DU MATÉRIEL PÉDAGOGIQUE.....	40
3.3.1	Milieu scolaire et collecte de données.....	41
3.3.2	Évaluation du matériel pédagogique par les élèves.....	42
3.3.3	Analyse de données et taille de l'échantillon	44
3.3.4	Dimensions éthiques à l'étude.....	45
3.3.5	Calendrier de réalisation de la mise à l'essai.....	46
	QUATRIÈME CHAPITRE – ENSEIGNER LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE D'ALBERT EINSTEIN.....	47
4.1	DÉVELOPPEMENT DU MATÉRIEL.....	47

4.1.1	Activité préparatoire à la SAÉ.....	47
4.1.2	Matériel nécessaire à la fabrication du simulateur de gravité	48
4.1.3	Quête d'information de la part de l'élève.....	49
4.1.4	Activité préparatoire à l'exécution de la SAÉ	50
4.1.5	Matériel nécessaire lors de l'analyse quantitative et graphique	51
4.1.6	Questionner deux bases de données interactives en Astronomie	51
4.1.7	Questionner l'Encyclopédie des Planètes Extrasolaires.....	52
4.1.8	Questionner un simulateur qui estime la température moyenne à la surface d'une exoplanète – déterminer l'habitabilité	54
4.1.9	Évaluation des savoirs et des compétences de l'élève.....	57
4.2	ÉLÉMENT DÉCLENCHEUR : LES PLANÈTES EXTRA-SOLAIRES ET LA PROBABILITÉ DE VIE EXTRATERRESTRE	58
4.3	DOCUMENTS DU PERSONNEL ENSEIGNANT ET DE L'ÉLÈVE	58
4.4	ÉVALUATION DES SAVOIRS ET APPRÉCIATION DU LABORATOIRE.....	58
4.5	ANALYSE STATISTIQUE	59
	DISCUSSION ET CONCLUSION	67
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	72
	ANNEXE A : QUESTIONNAIRE RELATIVEMENT AUX SAVOIRS PRÉSENTÉ AVANT L'EXÉCUTION DE LA SAÉ.....	81
	ANNEXE B : ÉLÉMENT DÉCLENCHEUR – PRÉSENTATION <i>POWER POINT</i>	83

ANNEXE C : DOCUMENT DE L'ENSEIGNANT LORS DE L'UTILISATION DU SIMULATEUR DE GRAVITÉ.....	92
ANNEXE D : LECTURE REMISE À L'ÉLÈVE EN VERSION ÉLECTRONIQUE APRÈS LE LABORATOIRE-DÉMONSTRATION	94
ANNEXE E : DOCUMENT <i>WORD</i> UTILISÉ PAR L'ÉLÈVE (EN VERSION ÉLECTRONIQUE) LORS DES 2^E ET 3^E PÉRIODES DE LA SAÉ	99
ANNEXE F : CORRIGÉ DU DOCUMENT <i>WORD</i> UTILISÉ PAR L'ÉLÈVE LORS DES 2^E ET 3^E PÉRIODES DU LABORATOIRE	110
ANNEXE G : QUESTIONNAIRE RELATIVEMENT AUX SAVOIRS PRÉSENTÉ APRÈS L'EXÉCUTION DE LA SAÉ.....	125
ANNEXE H : QUESTIONNAIRE D'APPRÉCIATION DE LA SAÉ.....	129
ANNEXE I : LISTE, COÛTS ET CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX NÉCESSAIRES À LA FABRICATION DU SIMULATEUR DE GRAVITÉ ILLUSTRANT LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ D'EINSTEIN	130
ANNEXE J : ILLUSTRATIONS DES MATÉRIAUX NÉCESSAIRES À LA FABRICATION ET À L'UTILISATION DU SIMULATEUR DE GRAVITÉ.....	132
ANNEXE K : CALENDRIER DE RÉALISATION DE LA SAÉ	137
ANNEXE L : RÉPONSES DISPONIBLES À LA QUESTION <i>DÉFI</i> #6 DE L'ANNEXE E FAISANT LE LIEN ENTRE L'EXCENTRICITÉ D'UNE EXOPLANÈTE ET LA THÉORIE DE LA GRAVITÉ D'EINSTEIN	138

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Critères utilisés pour évaluer la première compétence disciplinaire en Science et Technologie (Gouvernement du Québec, 2011a).....	39
Tableau 2. Évaluer la compétence transversale <i>Coopérer</i> (adapté de Giordan, 1999).	40
Tableau 3. Évaluer la compétence transversale <i>Exploiter les technologies de l'information et de la communication</i> (adapté de Giordan, 1999; Gouvernement de l'Alberta, 2015).....	41
Tableau 4. Appréciation de la SAÉ par les élèves (valeur maximale de 4).	65

LISTE DES FIGURES

- Figure 1. a) Page d'accueil du simulateur en ligne du Département d'Astronomie de l'Université d'Indiana qui estime la température moyenne à la surface d'une exoplanète. Le simulateur permet de définir b) la masse de l'étoile, c) la distance planète-étoile, d) l'effet Albédo et e) l'effet de serre. f) Il est possible de modifier plusieurs paramètres sur une même page. g) Calcul de la température moyenne de l'exoplanète créée par l'élève. 56
- Figure 2. Valeur pédagogique du laboratoire-démonstration dans les apprentissages de la question #1 : *Einstein était un homme de science. Quel métier pratiquait-il?* N = 77 élèves qui ont répondu à cette question sur les deux questionnaires (avant et après le laboratoire-démonstration). 60
- Figure 3. Valeur pédagogique du laboratoire-démonstration dans les apprentissages de la question #2 : *Einstein a redéfini les travaux d'un grand scientifique. De qui s'agit-il?* N = 76 élèves qui ont répondu à cette question sur les deux questionnaires (avant et après le laboratoire-démonstration). 60
- Figure 4. Valeur pédagogique du laboratoire-démonstration dans les apprentissages de la question #3 : *Selon toi, laquelle des théories d'Einstein est la plus connue du grand public?* N = 77 élèves qui ont répondu à cette question sur les deux questionnaires (avant et après le laboratoire-démonstration). 61
- Figure 5. Valeur pédagogique du laboratoire-démonstration dans les apprentissages de la question #4 : *Selon toi, laquelle de ses théories est considérée comme étant la plus importante par les scientifiques (autant à son époque que ceux contemporains)?* N = 76 élèves qui ont répondu à cette question sur les deux questionnaires (avant et après le laboratoire-démonstration). 62
- Figure 6. Valeur pédagogique du laboratoire-démonstration dans les apprentissages de la question #5 : *La Théorie de la Relativité Générale d'Albert Einstein porte également le nom de théorie de la gravité. Décrire dans tes mots ce que tu connais de cette théorie. Si tu ne la connais pas, l'indiquer.* N = 82 élèves qui ont répondu à cette question sur les deux questionnaires (avant et après le laboratoire-démonstration). 63
- Figure 7. Diapositive 1 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : Le sondage d'enquête sur Albert Einstein (Annexe A, p. 81) est présenté à l'élève à ce stade. 83
- Figure 8. Diapositive 2 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : annonce médiatique de la découverte d'une exoplanète semblable à la planète Terre (TVA Nouvelles, 2015). 83
- Figure 9. Diapositive 3 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : l'enseignante ou l'enseignant rappelle à l'élève que deux conditions strictes sont nécessaires pour que la vie – telle que nous la connaissons – existe, soit la présence de carbone et d'eau liquide, toutes deux essentielles aux réactions biochimiques. 84

- Figure 10. Diapositive 4 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : relation entre la distance étoile-planète et la température de l'eau; la zone verte indique la zone habitable (eau liquide), là où les réactions de nature biochimique et l'évolution de formes de vie sont possibles. 84
- Figure 11. Diapositive 5 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : relation entre la masse d'un Soleil et la dispersion de la zone habitable; la zone verte indique la zone habitable (eau liquide). 85
- Figure 12. Diapositive 6 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : variabilité des systèmes solaires identifiés à ce jour. L'enseignante ou l'enseignant décrit les différents systèmes planétaires. 85
- Figure 13. Diapositive 7 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : variabilité des systèmes solaires identifiés à ce jour. 86
- Figure 14. Diapositive 8 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : variabilité additionnelle des systèmes extrasolaires identifiés à ce jour. 86
- Figure 15. Diapositive 9 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : la très grande variabilité des systèmes extrasolaires n'a été découverte que dans une toute petite fraction de notre galaxie –la Voie Lactée. 87
- Figure 16. Diapositive 10 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : variabilité des exoplanètes qui montrent une zone habitable où l'eau –s'il y en a– peut circuler sous forme liquide. 87
- Figure 17. Diapositive 11 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : comparaison entre trois systèmes planétaires. 88
- Figure 18. Diapositive 12 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : film créé avec la collaboration de Stephen Hawking illustrant la formation d'un système solaire. Comment est-il possible que des objets célestes puissent se former de cette façon? 88
- Figure 19. Diapositive 13 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : Confrontation scientifique entre deux physiciens sur le sens que l'on doit donner au concept de gravitation universelle. 89
- Figure 20. Diapositive 14 de la présentation Power Point : Animation réaliste utilisée lors de l'évaluation de l'élève d'un système solaire à trois étoiles. Ce système s'appelle KID 5653126. 89
- Figure 21. Diapositive 15 de la présentation Power Point : Animation de l'exoplanète HD 33636b qui orbite à la fois au sein de la zone habitable et à l'extérieur de celle-ci. Question DÉFI à la fin de la 2^e période. 90

Figure 22. Diapositive 16 de la présentation Power Point : Question <i>Défi</i> . L'animation réaliste montre une exoplanète passant (en transit) devant son Soleil. L'élève doit déduire que les lignes qui tournent sans arrêt autour de la planète représentent la lumière située derrière la planète et qui est déviée par celle-ci. Cette question est présentée à la toute fin de la 3 ^e période, et la discussion est ouverte à toute la classe.	90
Figure 23. Diapositive 17 de la présentation Power Point : Remerciements à l'élève pour sa participation.	91
Figure 24. Période orbitale en fonction de la distance moyenne étoile-planète.	111
Figure 25. Température à la surface d'une exoplanète en fonction de la masse de son Soleil. ...	112
Figure 26. Rayon d'une étoile en fonction de sa masse.	113
Figure 27. Probabilité de trouver une exoplanète en fonction de sa masse.	114
Figure 28. Année de découverte d'une exoplanète en fonction de son rayon.	115
Figure 29. Excentricité des planètes (<i>Orbital Eccentricity</i>) en fonction de la distance moyenne avec son étoile (<i>Semi-Major Axis</i>).	117
Figure 30. Variations de la période orbitale par la distance moyenne étoile-planète en fonction de la masse solaire.	118
Figure 31. Matériel nécessaire à la construction du simulateur de gravité einsteinienne.	132
Figure 32. Coupleur de plomberie en forme de T, pvc, ½" (12,7 mm).	132
Figure 33. Collets ajustables en métal, à vis, 4" (10,2 cm) de long.	132
Figure 34. Ajustement entre le coupleur, les tuyaux de part et d'autre, de même que les collets. Ces derniers sont essentiels pour des raisons de sécurité (voir texte).	132
Figure 35. Tissu extensible (élastique) de type « Spandex » pour maillot de bain, sur lequel nous avons dessiné une grille à tous les 4" (10,2 cm).	133
Figure 36. L'utilisation de l'équerre sur le tissu extensible augmente la qualité du tracé des premières lignes de la grille.	133
Figure 37. Des billes de métal, de verre et de bois, de même que des boules de billard et de snooker, de grosseur, de couleurs et de densité variées, ont été utilisées pour représenter les planètes et les satellites.	133
Figure 38. Montage de la structure en pvc du simulateur de gravité, avant l'installation du tissu extensible.	134

- Figure 39. Montage final du simulateur de gravité, après l'installation du tissu extensible. La flèche rouge pointe une des quatre pinces qui retiennent le tissu extensible aux poteaux de la structure; cela contribue à stabiliser le tissu mais aussi toute la structure en pvc. 134
- Figure 40. Une petite bille de verre (masse de quelques grammes) ne produit pas d'effet gravitationnel visible sur le tissu extensible. 135
- Figure 41. Une petite bille de plomb (masse d'environ 75 g) produit un petit effet gravitationnel sur le tissu extensible. 135
- Figure 42. Une petite boule de quille (masse de 1,6 kg) produit un effet gravitationnel modéré sur le tissu extensible. 135
- Figure 43. Une grosse boule de quille (masse de 4,6 kg) produit un effet gravitationnel élevé sur le tissu extensible. 135
- Figure 44. Une très grosse boule de quille (masse de 5,6 kg) produit un effet gravitationnel extrême sur le tissu extensible. La boule de quille la plus lourde sur le marché atteint 6,8 kg..... 136
- Figure 45. Les billes de petite masse sont lancées autour de la boule de quille, simulant un système planétaire dont l'espace a été déformé par le Soleil. 136

INTRODUCTION

Enseigner la Science et la Technologie implique à l'occasion la présentation d'un concept théorique complexe, augmentant par le fait même le défi pédagogique de l'enseignante ou l'enseignant. Par exemple, comment serait-il possible d'enseigner à des élèves de l'école secondaire un concept théorique aussi complexe que la Théorie de la Relativité Générale d'Albert Einstein?¹

Le problème avec la théorie de la gravité d'Einstein réside justement dans le fait qu'elle est particulièrement compliquée (Speziali, 1972; Fölsing, 1997; Einstein, 2002; Greene, 2004; Isaacson, 2007; Scientific American, 2015). Un collègue, avec qui nous avons travaillé pendant cinq ans, a déjà suivi un cours sur la relativité d'Einstein lors de ses études en Physique à l'Université de Montréal il y a de cela une dizaine d'années. Ce collègue m'a raconté que la note moyenne des évaluations dans son cours ne dépassait que rarement les 30% (Mathieu Boutin, comm. pers., mai 2016). Cette théorie avait même amené l'acteur et réalisateur Charles Chaplin en 1931 à expliquer à Albert Einstein que la raison première pour laquelle le physicien était si célèbre était due au fait que personne ne comprenait quoi que ce soit de sa théorie (Chaplin, 1964; Robinson, 1985; Fölsing, 1997; Isaacson, 2007). Einstein lui-même avait écrit en 1916 à son meilleur ami, Michele Besso, que sa Théorie de la Relativité Générale avait été pour lui la plus difficile à développer de toute sa vie; il s'était dit exténué et extrêmement fatigué, en plus d'en être tombé malade (Speziali, 1972; Hentschel and Hentschel, 1998). Face à cette complexité hors du commun, quelle stratégie optimiserait l'enseignement d'une telle théorie à des élèves du secondaire?

¹ Noter que l'expression « Théorie de la Relativité Générale » est utilisée dans le présent document comme synonyme à la « théorie de la gravité » ou la « gravité einsteinienne », c'est-à-dire la gravitation universelle comme déformation du temps et de l'espace.

Au Québec, le concept de gravité est enseigné au secondaire dans cinq différents contextes : 1) le concept de gravitation universelle comme étant une force d'attraction mutuelle qui s'exerce entre les corps, particulièrement en ce qui concerne le système Terre-Lune (1^{re} secondaire : Gouvernement du Québec, 2010a, 2011b), 2) la gravitation universelle relativement à l'orbite des planètes au sein de notre système solaire (2^e secondaire : Gouvernement du Québec, 2010a, 2011b), 3) la place de la Terre dans l'Univers, particulièrement l'évolution des systèmes solaires au sein de la Voie Lactée de même que l'agglomération des galaxies en amas et superamas de galaxies (3^e secondaire : Gouvernement du Québec, 2010b, 2011b), 4) le concept de gravité newtonien enseigné au sein du cours de *Physique* (5^e secondaire : Gouvernement du Québec, 2010c) et enfin, 5) le concept de gravité einsteinien enseigné dans le cours à option *Techniques et Méthodes en Science* (5^e secondaire : Collège Jean de la Mennais, La Prairie, Canada).

Notre essai vise la production d'une SAÉ en Astronomie destinée à trois groupes enrichis d'élèves inscrits en 5^e secondaire au cours à option *Techniques et Méthodes en Science* et qui se sont également inscrits au cours de *Physique*. Cet arrangement unique permet de présenter notre SAÉ en contrastant le concept de gravité selon Newton versus Einstein, tout en insistant sur la pertinence du second auteur. Nous avons testé la SAÉ au Collège Jean de la Mennais; il s'agit d'un collège privé d'environ 1 500 élèves situé sur la rive-sud de Montréal. Notre échantillon comprend 87 élèves âgés en moyenne de 17 ans.

Trois stratégies pédagogiques s'offrent à nous : le laboratoire-démonstration, la pédagogie de l'intégration et l'environnement numérique. Nous émettons l'hypothèse que ces trois stratégies, mises ensemble, augmente la qualité de l'enseignement et améliore la compréhension par l'élève de théories scientifiques, surtout si ces théories sont complexes. La première stratégie pédagogique consiste –pour l'enseignant– à faire la démonstration scientifique du problème ou du concept en exécutant un laboratoire devant la classe (Legendre, 2005; Gagnon, 2013; Allaire, 2016), ce qui implique que les élèves soient au départ des observatrices et des observateurs de l'expérience. Toutefois, nous croyons approprié d'interagir avec l'élève et de lui permettre de poser des questions tout au long du laboratoire; tout en faisant cette démonstration, l'enseignante ou l'enseignant se pose, à haute voix, les questions qui orientent ses actions (démonstration de type *modeling*). La seconde stratégie tient compte des bénéfices de la pédagogie de l'intégration. Cette

pédagogie repose sur l'idée suivante (Roegiers, 2004, 2005, 2010c) : ce qui est important avant tout, c'est qu'un élève en sortant de l'école, peu importe son niveau académique qu'il soit primaire, secondaire, collégial ou universitaire, doit pouvoir faire face dans son quotidien à un nombre de situations de plus en plus complexes (Roegiers, 2004, 2005, 2010c). L'élève doit donc pouvoir résoudre des problèmes complexes et réussir des tâches complexes qui font partie de la vie quotidienne, familiale, sociale, scolaire et professionnelle (Roegiers, 2010c). En somme, l'enseignante ou l'enseignant requiert de l'élève que ce dernier apprenne mieux en réussissant une tâche qui l'intéresse mais qui demeure néanmoins complexe à résoudre. La troisième stratégie consiste à associer l'environnement numérique aux deux stratégies précédentes, de telle sorte que cela rend le laboratoire dans son ensemble motivant, intéressant, dynamique et interactif. Nous supposons ici que l'environnement numérique contribuera à ce que l'élève maintienne (ou même augmente) sa motivation face à ses apprentissages (Keengwe, Schnellert, and Mills, 2012).

Quoique notre essai ne l'adresse pas directement, il effleure un sujet pour lequel nous sommes particulièrement sensibles dans les écoles où nous avons enseigné : le décrochage scolaire. En effet, un élève qui n'est pas motivé ou qui ne réussit pas à l'école pourrait être tenté de décrocher du milieu scolaire d'avantage qu'un autre élève qui présente les caractéristiques inverses (cf. Fortin, Bradley, Plante, and Thibodeau, 2012). D'ailleurs, plusieurs chercheurs ont remarqué une croissance inquiétante du décrochage scolaire de nos jeunes, en particulier chez les garçons (Janosz, 2000). Le décrochage scolaire constitue une problématique inquiétante dont les conséquences se font ressentir tant chez l'élève que dans le reste de la société dans son ensemble. Notre objectif professionnel ici réside donc dans le défi de créer une situation d'apprentissage et d'évaluation qui est à la fois motivante et enrichissante pour l'élève, même si l'exercice implique des concepts théoriques d'une grande complexité.

Ces constats nous amènent ainsi à poser la question générale suivante : « *Quelle stratégie pédagogique à l'école secondaire optimise l'enseignement d'un concept scientifique particulièrement complexe, comme la théorie de la gravité d'Albert Einstein, de telle sorte que le laboratoire de science demeure pour l'élève motivant, apprenant, et enrichissant sur le plan des compétences et des savoirs?* » Afin de répondre à cette question, notre objectif dans le cadre de cet essai s'est orienté, d'une part, à quantifier la valeur pédagogique du laboratoire-démonstration

(les élèves apprennent-ils?) et, d'autre part, à optimiser l'exécution d'un laboratoire complexe mais semi-dirigé en associant la pédagogie de l'intégration à l'environnement numérique. Nous proposons ici une situation d'apprentissage et d'évaluation en deux temps pendant lesquels l'élève assiste activement à un laboratoire-démonstration (de type *modeling*) illustrant, à l'aide d'un simulateur de gravité en trois dimensions et en grand format ($\varnothing = 2$ m), le concept de la gravité selon Einstein, après quoi l'élève est appelé à questionner deux bases de données interactives en Astronomie sur internet dans le but de mettre en application cette nouvelle connaissance.

Dans le premier chapitre, nous présentons la problématique des apprentissages de concepts scientifiques. Dans le second chapitre, nous examinons le cadre théorique sous-jacent à l'enseignement de concepts scientifiques complexes, en privilégiant le laboratoire-démonstration, l'approche pédagogique de l'intégration et l'environnement numérique. Au troisième chapitre, nous présentons les aspects méthodologiques utilisés, notamment le type d'essai que nous avons poursuivi, la collecte de données en classe, notre calendrier de réalisation de même que l'analyse statistique des données. Le quatrième chapitre présente les résultats de cette activité d'apprentissage, dans laquelle nous mesurons quantitativement la valeur pédagogique du laboratoire-démonstration et qualitativement la valeur pédagogique de l'association entre la pédagogie de l'intégration et l'environnement numérique.

Nous avons trouvé que le laboratoire-démonstration permettait significativement de réduire de 4 fois la proportion d'élèves incapables d'expliquer la théorie d'Einstein (de 4,7 à 1,2%) et de réduire de 5 fois la proportion d'élèves qui ne savaient rien de cette théorie (de 61,2 à 12,2%). De plus, la proportion d'élèves qui avaient répondu d'une manière partiellement correcte a doublé après l'exécution du laboratoire-démonstration (de 24,7 à 48,8%) et celle des élèves qui avaient offert une réponse entièrement correcte (l'élève avait identifié la déformation de l'espace comme explication einsteinienne de la gravité) a quadruplé (de 9,4% à 37,8%). De manière qualitative, nous concluons que la pédagogie de l'intégration fonctionne (l'élève apprécie le fait d'être stimulé par des questions scientifiques complexes), alors que l'utilisation de l'environnement numérique lui a permis de maintenir et possiblement d'augmenter sa motivation face à ses apprentissages.

PREMIER CHAPITRE – PROBLÉMATIQUE

Notre expérience en enseignement du cours Science et Technologie s'étend de la 1^{re} à la 4^e année du secondaire (12 à 16 ans) jusqu'au niveau doctoral relativement à l'Anthropologie, la Primatologie, l'Évolution humaine, la Biologie des forêts tropicales et l'Écologie animale. Le même problème s'est posé pour nous tant chez les jeunes que les adultes : quelle est la stratégie pédagogique qui optimise l'enseignement d'un concept scientifique complexe? Dans le cas des élèves du secondaire, le cours de science s'accompagne, en règle générale, d'un laboratoire expérimental à tous les 10 jours de classe, ne dépassant pas normalement une quinzaine de jours. Si la plupart de ces laboratoires pendant l'année scolaire exige qu'ils soient exécutés par l'élève lui-même, le plus souvent en équipe de deux, quelques-uns sont présentés en démonstration devant la classe, soit parce le temps manque ou soit parce que les moyens techniques et/ou financiers ne permettent simplement pas à l'élève d'exécuter lui-même cette expérience. Si le concept s'avère complexe, cela a pour effet d'augmenter la difficulté de l'enseignante ou l'enseignant à l'expliquer et devient un défi pour l'élève qui désire mémoriser, intégrer et prédire les tenants et aboutissants de ce concept. Cette réflexion sur l'enseignement de concepts théoriques complexes nous a amené à poser une question toute simple : Quelle stratégie pédagogique serait optimale dans l'enseignement d'un concept scientifique particulièrement complexe? Le laboratoire-démonstration par exemple est-il efficace? En particulier, les élèves apprennent-ils lors d'une démonstration de type *modeling*, c'est-à-dire lors d'un laboratoire pendant lequel l'enseignante ou l'enseignant se pose, à haute voix, les questions qui orientent ses actions? Ici, il est supposé que l'élève apprend en observant les autres (Gouvernement de la Saskatchewan, 1993). Les recherches suggèrent que les démonstrations sont particulièrement efficaces quand elles sont précises, que les élèves sont capables de voir clairement et de comprendre ce qui se passe et que des explications sont données durant la démonstration (Gouvernement de la Saskatchewan, 1993; Arends, 2014). Est-ce suffisant au point que la démonstration augmente significativement les apprentissages en science au secondaire? Les études tendent à démontrer que cela pourrait être le cas à la condition que le personnel enseignant ait pratiqué la démonstration à plusieurs reprises afin de s'assurer qu'elle fonctionne (Senkbeil and Crisp, 2004).

Quoique rarement, certains de nos élèves vivent un échec dans notre cours de Science et Technologie, ou sont à la limite d'en vivre un. Cela pourrait contribuer, du moins en théorie, à accroître leur démotivation générale face à l'école et encourager ainsi l'élève à décrocher du réseau scolaire. Nous ne pouvons prouver cet énoncé de manière quantitative et tel n'est pas le but de cet essai. De manière qualitative toutefois, nous avons perçu des liens très forts dans notre enseignement des sciences au secondaire, notamment :

- 1) Les élèves aiment la science car elle permet l'exploration libre des idées, des mécanismes, et des lois de la nature. La science a prouvé que sa méthode fonctionne, car elle ne porte pas de jugement de valeurs lorsqu'elle cherche à répondre à une question falsifiable (cf. Popper, 1973). La science cherche essentiellement à déterminer, à expliquer et à prédire les phénomènes mesurables. Nous avons observé que les élèves manifestent régulièrement leur intérêt personnel face à ces aspects de la science, en particulier le fait que la science cherche à comprendre des phénomènes sans porter un jugement de valeurs. Ce dernier point est particulièrement « sensible » chez les adolescents. L'éducation à la sexualité est un exemple frappant où les jeunes aiment apprendre sur leur propre développement corporel et sexuel sans que quelqu'un en classe ne puisse porter un jugement de valeurs sur eux ou contre leurs amis;
- 2) Les élèves manquent de motivation pour l'apprentissage de la science lorsque nous abordons la dimension purement théorique d'un problème scientifique spécifique. Il est peut-être plus difficile pour les jeunes de visualiser, de se représenter, de comprendre, d'expliquer et de prédire un concept théorique si ce concept semble trop complexe pour eux, surtout s'il est enseigné de façon « traditionnelle », c'est-à-dire en l'exposant de manière magistrale sur un écran de type tableau blanc interactif, sur un tableau vert ou sur papier. Bien que cela s'appliquait à un milieu universitaire et que les comparaisons avec l'école secondaire soient difficiles, une étude a démontré que les élèves apprennent mieux si l'enseignement de la théorie suit (et non précède) la démonstration ou l'expérimentation (Veselinovska, Gudevab, and Djokicb, 2011);
- 3) Parallèlement au point précédent, les élèves préfèrent la science quand ils peuvent l'expérimenter par eux-mêmes, tout en étant *partiellement* dirigés. Nous avons remarqué en

effet que le laboratoire où on leur dit quoi faire est trop strict et il ne laisse pas assez de place à leur créativité, à leur débrouillardise, à leur sens des responsabilités et à la confiance qu'on leur accorde. Les élèves manquent de motivation et s'ennuient dans ce type de laboratoire, car les exigences sont de nature répétitive (« faites ceci avec précision, faites cela sans déroger à la dite-règle, etc. »). Inversement, un laboratoire où les élèves peuvent faire tout ce qu'ils veulent est trop libre et trop désorganisé. Les élèves n'apprennent pas autant; beaucoup d'entre eux répondent aux questions sans aucune rigueur intellectuelle. À cela s'ajoute que les élèves ne sont pas aussi intéressés au sujet étudié (ils préfèrent jouer que travailler), en plus de ne pas être sûrs de ce qu'ils font, ce qui crée une insécurité affective pendant l'exécution du laboratoire. Cette observation a été mentionnée dans une étude en Afrique du Sud où l'élève faible apprenait mieux lorsqu'il était dirigé au moins partiellement (Cronjé and Fouche, 2008) et une autre où l'élève apprenait mieux grâce à une application permettant l'apprentissage actif lié au constructivisme (Sesen and Tarhan, 2010);

- 4) Les élèves semblent mieux se représenter, comprendre, expliquer, mémoriser, intégrer et prédire les savoirs lorsqu'ils peuvent *modéliser* les concepts théoriques. Cela est d'autant plus vrai si ce concept est relativement complexe. Ce constat est encore lié au deuxième point ci-haut. En effet, se représenter un concept théorique complexe pourrait être facilité en examinant une situation réelle (comme visiter un site archéologique), ou en construisant un modèle réduit du problème (construire à l'échelle la maquette d'un pont), exploitant un logiciel ou application d'une tablette numérique de type iPad (pour obtenir une analyse graphique du phénomène par exemple). Dans le dernier cas des applications numériques, on pourrait penser à visualiser en 3D le système musculosquelettique d'un être humain (BioDigital, 2014) ou encore un système planétaire extrasolaire (Rein, 2014). Cela serait justifié puisque le visionnement vidéo a été identifié comme étant une stratégie d'enseignement tout aussi efficace qu'une démonstration (Sever, Yuromezoglu, and Oguz-Unver, 2010). En termes de difficulté d'apprentissage toutefois, nous considérons que la Théorie de la Relativité Générale d'Albert Einstein (la gravitation en tant que déformation spatio-temporelle) est l'exemple parfait d'une théorie complexe qui est difficile à visualiser. Il s'agit en effet d'une des théories les plus complexes qui aient été développées (et prouvées) à ce jour; comment une enseignante ou un enseignant

peut-il approcher la didactique d'une telle théorie aussi complexe à un élève du secondaire? Après tout, le concept de gravité peut être enseigné autant au 1^{er} cycle (Gouvernement du Québec, 2010a, 2011b) qu'au 2^e cycle (Gouvernement du Québec, 2010b, c, 2011b).

- 5) Les élèves font souvent la remarque que leurs apprentissages sont morcelés dans le cours de Science et Technologie. Une hypothèse serait peut-être que cela est dû au fait que les concepts prescrits par le MELS ne sont pas toujours liés les uns aux autres. En 3^e secondaire au Québec par exemple, il n'est pas rare que les apprentissages passent de l'Astronomie au mois de septembre, au système digestif en octobre, pour continuer avec la technologie en novembre. Nous croyons que cette disparité des savoirs nuit à leur motivation et à leurs apprentissages, ce qui a déjà été démontré dans les cours de *Physique* au secondaire et au collège (Stoica, Paragina, Paragina, Miron, and Jipa, 2011). Personnellement, nous pensons que c'est comme si l'école moderne était (re)devenue un lieu où l'on apprend par cœur une suite interminable de concepts insignifiants que l'on doit régurgiter correctement le jour de l'examen.

Devant tous ces constats, nous proposons la mise en place d'un laboratoire semi-dirigé sous la forme, dans un premier temps, d'une démonstration de type *modeling* illustrant le concept de la Relativité Générale d'Einstein (la gravité comme déformation de l'espace) et, dans un second temps, d'un laboratoire qui intègre à la fois la pédagogie de l'intégration et l'environnement numérique.

Le second point, où les élèves manquent de motivation lorsque l'enseignante ou l'enseignant aborde la dimension purement théorique d'un problème scientifique complexe, pourrait être approché de la manière suivante : *demander à l'élève qu'il apprenne en réussissant une tâche spécifique qui illustre la complexité de la théorie en question (pédagogie de l'intégration), tout en maintenant la motivation de l'élève face à ses apprentissages (apport de l'environnement numérique)*. Nous proposons d'augmenter la motivation des élèves en mettant à leur disposition deux bases de données *interactives* desquelles l'élève contrôle plusieurs variables de nature astronomique. Nous croyons que c'est en contrôlant de manière interactive à l'ordinateur les variables du problème scientifique que l'élève augmente sa motivation à mieux apprendre ce qui se passe, à réussir une tâche complexe et ultimement à maîtriser une théorie complexe.

Plusieurs études ont démontré les bienfaits de l'environnement numérique dans l'enseignement de la physique, surtout lorsque les applications sont souples et permettent une manipulation sophistiquée des données quantitatives (Bacon, 1992).

Parallèlement au troisième point, si les élèves préfèrent apprendre la science quand ils peuvent l'expérimenter par eux-mêmes, tout en étant partiellement dirigés, notre proposition de développer un laboratoire *semi-dirigé* est ainsi largement justifiée.

Le quatrième point touche la difficulté pour un élève de se représenter visuellement une théorie scientifique complexe comme, dans notre cas, la Théorie de la Relativité Générale. Pour cela, nous proposons, d'une part, de fabriquer une structure de grande dimension qui permettra à l'élève de visualiser (en réel) les tenants et aboutissants de cette théorie et, d'autre part, d'utiliser des bases de données interactives en Astronomie qui lui permettra de transférer ses apprentissages quant à la théorie de la gravitation d'Einstein. C'est ici que se joignent la pédagogie de l'intégration, soit d'apprendre en réussissant une tâche complexe (Roegiers, 2000, 2004, 2005, 2010c) et la contribution de l'environnement numérique (Bacon, 1992); ces stratégies permettront à l'élève de réinvestir ses savoirs et d'augmenter, ou du moins de maintenir, la motivation de cet élève face à ses apprentissages, et indirectement de contribuer à sa réussite scolaire.

Si les élèves au cinquième point se plaignent que leurs apprentissages soient souvent morcelés, il serait préférable que la situation d'apprentissage et d'évaluation *regroupe plusieurs apprentissages en une seule situation complexe mais cohérente* (sensu Stoica et al., 2011). Ici, nous proposons de regrouper les apprentissages sous l'élément déclencheur de la possibilité théorique que la vie extraterrestre existe dans l'Univers. Cette idée de vie extraterrestre a toujours passionné l'humanité (pensons par exemple au grand classique de Wells, 1898). Notre approche pédagogique implique ainsi l'enseignement de notions théoriques complexes (le concept de gravité d'Einstein et la formation des systèmes solaires), la modélisation en trois dimensions de la Relativité par le biais d'un simulateur de gravité de 2 m de diamètre, l'exploration des plus récentes découvertes sur les exoplanètes (planètes orbitant autour de systèmes extrasolaires), l'analyse quantitative sous forme graphique (régression linéaire entre les facteurs caractérisant une étoile aux caractéristiques des planètes qui orbitent autour), et enfin l'analyse des conditions favorables

à l'origine et à l'évolution de la vie (présence d'eau liquide, cycles biochimiques du carbone, etc.). Les bénéfices pédagogiques des simulations numériques ont depuis longtemps été reconnues (Bender, 1989) et l'environnement virtuel prend de plus en plus de place dans l'enseignement (Tatli and Ayas, 2010; Potkonjak, Gardner, Callaghan, Mattila, Guetl et al., 2016).

En somme, la problématique que nous soulevons nous amène à poser les questions d'ordre professionnel suivantes :

1) comment structure-t-on un laboratoire de science de telle sorte que les élèves, même ceux en difficulté, apprennent mieux et augmentent leur motivation face à leurs apprentissages? Dans le meilleur des mondes, est-il possible de développer un laboratoire de science qui apprend à un élève à aimer apprendre? En particulier, les élèves apprennent-ils lors d'un laboratoire-démonstration de type *modeling*?

2) l'environnement numérique peut-il maintenir ou améliorer la motivation de l'élève face à ses apprentissages, en particulier lors de l'exécution d'un laboratoire semi-dirigé?

SECOND CHAPITRE – CADRE THÉORIQUE

Dans ce chapitre, nous recensons dans un premier temps les écrits qui explorent la valeur pédagogique du laboratoire-démonstration, les forces et les limites de la pédagogie de l'intégration, les avantages et les inconvénients de l'environnement numérique en classe et les risques associés à l'utilisation des réseaux sociaux dans l'enseignement au secondaire. Dans un second temps, nous présentons nos choix conceptuels, issus de cette recension des écrits, dans la conception de notre matériel pédagogique. Finalement, nous énonçons deux questions de recherche qui serviront de tremplin dans l'exécution de notre laboratoire-démonstration et de la SAÉ dans son ensemble.

2.1. RECENSION DES ÉCRITS

2.1.1. APPRENDRE EN REGARDANT : VALEUR PÉDAGOGIQUE DU LABORATOIRE-DÉMONSTRATION (DE TYPE *MODELING*)

Le *modeling* est une variante de la démonstration (Gouvernement de la Saskatchewan, 1993; Chamberland, Lavoie, and Marquis, 1995; Lasnier, 2000; Legendre, 2005; Gagnon, 2013; Arends, 2014; Allaire, 2016) pendant laquelle le personnel enseignant illustre expérimentalement un phénomène ou une procédure en l'exécutant devant le groupe classe. Tout en faisant cette démonstration, comme l'a mentionné Allaire (2016), l'enseignante ou l'enseignant précise comment s'y prendre pour trouver les réponses à ses propres questions, se faisant une « métacognition à haute voix », c'est-à-dire de poser, à haute voix, les questions qui orientent sa démonstration. Il s'agit dans notre cas de faire les liens entre les actions lors du laboratoire-démonstration et la théorie de la gravité d'Einstein.

Cette stratégie pédagogique ne fait cependant pas l'unanimité. Des étudiantes en soins infirmiers n'ont pas mieux appris la ponction intraveineuse lorsqu'on leur en a fait une démonstration comparativement à un second groupe qui a simplement analysé la séquence d'application et l'exécution de la méthode de soins (Bitsika, Karlis, Iacovidou, Georgiou,

Kontodima et al., 2014). La conclusion de cette étude a suscité un questionnement quant à la nécessité de la démonstration comme stratégie pédagogique pour l'apprentissage des soins infirmiers (Guilbault, 2015). Toutefois, si le stress de faire une erreur médicale grave a semblé expliquer la faible valeur pédagogique de la démonstration en santé (Bitsika et al., 2014), ce stress ne s'applique pas aux sciences théoriques et encore moins au secondaire.

2.1.2. APPRENDRE UNE TÂCHE COMPLEXE : LA PÉDAGOGIE DE L'INTÉGRATION

Notre 2^e objectif a été de tester (qualitativement) si la pédagogie de l'intégration associée à l'environnement numérique pouvait appuyer le personnel enseignant à mieux enseigner au secondaire une théorie particulièrement complexe comme celle de la relativité d'Einstein.

Dans une présentation télévisuelle, Roegiers (2010c, b, a, d, e) discute des différents types d'approche par compétences, notamment les approches *Nations Unies*, *anglo-saxonne*, *interdisciplinarité*, *compétences transversales*, et la *pédagogie de l'intégration*. Trois dénominateurs communs se chevauchent au sein de ces approches par compétences : 1) les contenus d'enseignement profitent aux élèves et sont préférables aux simples savoirs et aux savoir-faire; 2) l'élève est acteur de ses apprentissages; et 3) le savoir-agir en situation est valorisé (Roegiers, 2010a). L'auteur reconnaît cependant que la pédagogie de l'intégration revêt plusieurs bénéfices, tout en minimisant les inconvénients, contrairement aux autres approches (2010c, b, a, d, e).

L'intérêt de la pédagogie de l'intégration réside dans plusieurs facteurs (Roegiers, 2010c) : 1) dans sa réponse réaliste en termes d'efficacité, favorisant une meilleure intégration des savoirs de l'ordre de 13-15% pour tous les élèves comparativement aux autres méthodes d'enseignement, 2) dans un gain encore plus prononcé chez les élèves en difficulté, soit 7% d'augmentation en moyenne pour les élèves forts et 20% pour les élèves faibles, 3) dans sa reconnaissance de tous les types d'enseignement-apprentissage et de tous les types de compétences, et 4) dans le fait que cette pédagogie prend en compte les valeurs locales, c'est-à-dire qu'elle permet à la fois la

différenciation et l'équité entre les élèves (telle que pratiquée dans les pays scandinaves notamment : Roegiers, 2010c).

La pédagogie de l'intégration combine à la fois les caractères concrets et complexes d'une SAÉ (Roegiers, 2010c). Selon cet auteur, deux nécessités sont associées à l'intégration des acquis : 1) il faut permettre à chaque élève de mobiliser ses acquis pour résoudre des situations complexes; en effet, c'est d'apprendre à l'élève à résoudre des problèmes qui lui permettra de devenir compétent dans quelque chose; 2) il faut évaluer les acquis des élèves en termes de situations complexes.

Pour que l'élève puisse accomplir des tâches complexes, il lui faut avoir accès à un minimum de matériel pédagogique comme un manuel scolaire et/ou un cahier de situation, du matériel de laboratoire, duquel pourrait s'ajouter un accès à un environnement numérique. Le cahier de situation (aussi appelé document de l'élève) est un recueil de situations complexes que se sert l'élève individuellement pour apprendre à se représenter un concept scientifique complexe, et à résoudre un problème théorique complexe. Pour ainsi dire, l'élève apprend bien en réussissant une tâche spécifique, mais il apprend mieux si la tâche exigée est relativement complexe relativement à ses compétences actuelles.

2.1.3. MOTIVATION D'APPRENDRE : UTILISATION D'UN APPAREIL NUMÉRIQUE

Parallèlement à notre 2^e objectif, nous désirions tester qualitativement si l'environnement numérique contribue à maintenir (ou idéalement à augmenter) la motivation de l'élève face à ses apprentissages. Nous émettons l'hypothèse que l'utilisation d'un ordinateur portable ou d'une tablette numérique maintient ou augmente la motivation de l'élève dans sa quête à répondre au problème scientifique qui lui est posé. Si la pédagogie de l'intégration accepte l'idée que chaque élève est responsable de –et doit s'engager activement dans– ses apprentissages (Gouvernement du Québec, 2010b; Roegiers, 2010a), l'environnement numérique appuie l'élève dans sa tâche. Pour répondre à cette dimension, nous avons rassemblé ici les écrits qui, d'une part, évaluent

l'impact (positif ou négatif) de l'utilisation des outils numériques et, d'autre part, évaluent les stratégies qui sont préférables lorsque de tels outils sont utilisés en classe.

Notre recension des écrits démontre que l'utilisation pédagogique de l'environnement numérique offre les bénéfices suivants : 1) l'environnement des ordinateurs portables contribue à garder les élèves plus motivés et plus engagés face à leurs travaux scolaires (Keengwe et al., 2012). Ce regain de motivation trouve toute son importance quand on pense aux variations de motivation des jeunes face à l'école en fonction des nouvelles technologies (Rommès, Overbeek, Scholte, Engels, and De Kemp, 2007). Ces technologies ont un impact positif sur le plan pédagogique à la condition qu'elles soient développées et implantées dans un contexte d'apprentissage pertinent (Keengwe and Bhargava, 2014); 2) les élèves obtiennent des résultats significativement supérieurs tout en démontrant une attitude plus positive face à leurs apprentissages (Liu, Scordino, Geurtz, Navarrete, Ko et al., 2014); 3) l'utilisation d'ordinateurs portables ou de tablettes électroniques de type iPad permet de contrôler l'accès à des sites ou à des applications indésirables, en plus d'offrir un écran relativement grand et une riche diversité de sites internet et d'applications spécifiques (Thomas, O'Bannon, and Britt, 2014); 4) l'environnement numérique permet à l'élève d'utiliser des bases de données interactives (e.g. Rein, 2014; Exoplanet Database, 2016; Indiana University, 2016) qui lui permet de construire des analyses quantitatives et graphiques, en quelque sorte, de construire son savoir avec sa coéquipière ou son coéquipier (socioconstructivisme); 5) les jeunes ont mieux intégré les connaissances qui leur étaient proposées (Liu et al., 2014); 6) si l'environnement numérique a démontré son utilité chez l'élève, il en est de même chez l'enseignante ou l'enseignant : les professeurs dont les écoles secondaires ont implanté un environnement numérique affichent une attitude plus positive face à l'enseignement et aux apprentissages à l'aide de ces outils que les professeurs qui n'ont pas ou peu accès à ces outils technologiques (Stanhope and Corn, 2014); et finalement 7) les élèves en difficulté qui ont obtenu un résultat en-dessous du 50^e rang centile dans la lecture ($N = 1153$) ont bénéficié des outils numériques (Marino, 2009).

Le seul outil technologique qui semble causer problème en classe concerne le téléphone cellulaire. En effet, 1) le téléphone cellulaire est associé à une longue liste de dérives possibles en classe: communications vers l'extérieur de l'école, vente de drogue par texto, taxage, plagiat,

tricherie, sexting, cyberintimidation, manque de respect, appel à la haine, radicalisation, accès à des sites web inappropriés, pour n'en nommer que quelques-uns (Keengwe, Schnellert, and Jonas, 2014b). Il n'est donc pas surprenant que seulement un quart des enseignantes et enseignants est d'accord à utiliser le téléphone cellulaire en classe, que la moitié hésitent à l'utiliser, et qu'un quart s'est dit carrément contre cette utilisation dans un contexte pédagogique (Thomas et al., 2014); et 2) le téléphone cellulaire offre un écran beaucoup trop petit pour être utilisé dans un contexte pédagogique en classe (Liu et al., 2014). En conclusion, le téléphone cellulaire, « intelligent » ou pas, n'a pas la cote, à l'avantage de la tablette mobile ou de l'ordinateur portable. Tout environnement numérique bien sûr n'est pas sans risque. En effet, un appareil numérique offre le potentiel néfaste de déconcentrer l'élève; pensons à un *chat en ligne* non autorisé (Facebook, Twitter, Instagram, etc.), à de l'information non pertinente en classe de science (nouvelles du sport, célébrités, etc.) ou à des contextes éthiquement et juridiquement inappropriés sur le plan pédagogique (jeux de hasard, jeux de rôles, nudité, cybercriminalité juvénile, etc.).

2.1.4. LE RISQUE D'APPRENDRE : UTILISATION DES RÉSEAUX SOCIAUX DANS L'ENSEIGNEMENT AU SECONDAIRE

« *What happens in cyberspace does not stay in cyberspace.* »

(Keengwe et al., 2014b, p. 445)

Nous posons ici la question à savoir si l'utilisation des réseaux sociaux comme *Twitter* ou *Facebook* (ce dernier étant le plus populaire auprès des jeunes) pourrait s'avérer utile dans notre enseignement des sciences au secondaire en général, et dans l'exécution de la présente SAÉ en particulier. Notre survol des études à ce sujet révèle quelques surprises.

Le réseau *Twitter* est inutile en enseignement des sciences à des jeunes du secondaire; cet outil est particulièrement limité et n'est simplement pas approprié dans la plupart des cas (Carpenter and Krutka, 2014). Ce réseau s'applique mieux à des adultes (Visser, Evering, and Barrett, 2014) et s'avèrent notamment utiles dans la communication avec les élèves timides (Tiernan, 2014). Si les enseignantes ou les enseignants ont traditionnellement gardé une distance

entre leur vie privée et celle professionnelle, la venue de Facebook a potentiellement changé la donne. En effet, le simple fait de posséder un compte Facebook peut avoir un impact négatif sur la crédibilité du personnel enseignant aux yeux des élèves (Hutchens and Hayes, 2014). Que l'on pense seulement à Ashley Payne, une enseignante de 24 ans en Géorgie que la direction de l'école a forcée à démissionner parce qu'elle avait publié sur sa page Facebook une photo d'elle-même en train de boire une bière, un comportement pourtant légal sur le plan strictement juridique (CBS News, 2011). Parmi les autres risques les plus évidents, pensons à une photo d'une enseignante ou d'un enseignant intoxiqué-e lors d'un party ou à un élève qui fait des commentaires négatifs contre le corps enseignant ou qui tente de répandre sa perception aux autres élèves. Près de 17% des élèves admettent avoir posté des commentaires négatifs sur Facebook à l'endroit d'une enseignante ou d'un enseignant, soit environ cinq élèves par classe de 30 (Hutchens and Hayes, 2014). Si un lien d'amitié entre le personnel enseignant et l'élève n'est pas approprié en classe, il ne l'est pas plus sur un réseau social numérique.

Ces études et ces cas spécifiques prouvent hors de tout doute que permettre aux élèves d'interagir personnellement avec le corps enseignant sur les réseaux sociaux représente un risque professionnel trop élevé. En conclusion, nous excluons définitivement les réseaux sociaux de notre stratégie pédagogique.

2.2. CHOIX THÉORIQUES ISSUS DE LA RECENSION POUR LA CONCEPTION DU MATÉRIEL PÉDAGOGIQUE

Notre recension des écrits suggère que le laboratoire-démonstration de type *modeling* permet à l'enseignante ou l'enseignant de préciser comment elle ou il s'y prend pour trouver les réponses à ses propres questions, en posant les questions qui orientent sa démonstration (Gouvernement de la Saskatchewan, 1993; Chamberland et al., 1995; Lasnier, 2000; Legendre, 2005; Gagnon, 2013; Arends, 2014; Allaire, 2016). Notre objectif de déterminer quantitativement la valeur pédagogique du laboratoire-démonstration est possible dans notre cas en comparant les savoirs de l'élève avant l'exécution du laboratoire-démonstration versus après. Les élèves

apprennent-ils quelque chose lors d'un laboratoire-démonstration de type *modeling*? Si oui, apprennent-ils de façon significative ou marginale?

Toutefois, comme la théorie que nous proposons d'enseigner est relativement complexe (la gravité d'Einstein comme une déformation de l'espace), nous croyons approprié d'associer la pédagogie de l'intégration (dans le but d'augmenter la qualité des apprentissages de l'élève par le biais de l'exécution d'une tâche complexe) à l'environnement numérique (dans le but de maintenir ou idéalement d'augmenter la motivation de l'élève face à ses apprentissages).

Pour le Ministère de l'Éducation (Gouvernement du Québec, 2006b), les tâches complexes, essentielles au développement et à l'évaluation des compétences, doivent revêtir les caractéristiques suivantes :

- 1) Solliciter la compétence disciplinaire dans sa globalité;
- 2) Donner lieu à des démarches ou à des productions différentes d'un élève à l'autre;
- 3) Présenter un problème qui n'a pas été résolu auparavant et qui pousse l'élève à mobiliser davantage de ressources dans la situation;
- 4) Entraîner une production généralement élaborée : texte, simulation, analyse graphique, analyse statistique, dessin technique, etc.;
- 5) Évaluer la compétence à partir des critères d'évaluation du Programme de formation du MELS. Ces critères d'évaluation sont traduits en éléments observables;
- 6) Par souci de transparence, les critères d'évaluation et les exigences qui les accompagnent sont connus des élèves, ce qui incite l'élève à l'autorégulation.

C'est dans ce contexte pédagogique que nous souhaitons développer un laboratoire semi-dirigé affilié au cours de *Techniques et Méthodes en Science* de 5^e secondaire (17 ans). Nous croyons qu'il est possible d'enseigner la théorie de la gravité d'Einstein en l'associant à un élément déclencheur qui fascine l'humanité depuis des siècles : la vie extraterrestre (voir section 3.2.5 L'ÉLÉMENT DÉCLENCHEUR, p. 35).

2.3. QUESTIONS DE RECHERCHE

Cette réflexion nous amène à poser les deux questions de recherche suivantes qui serviront de tremplin dans l'exécution de notre laboratoire-démonstration et de la SAÉ dans son ensemble :

- 1) « *Quelle est la valeur pédagogique du laboratoire-démonstration sur la motivation et les apprentissages de l'élève?* » Ainsi, nous nous posons la question de savoir si l'élève maintient sa motivation et si celui-ci apprend vraiment quelque chose lorsque l'enseignante ou l'enseignant fait une démonstration expérimentale devant la classe. Nous émettons le postulat général que l'élève apprend des autres (socioconstructivisme) et qu'il est capable de réinvestir ses apprentissages, même si le concept à comprendre ou la tâche à exécuter est complexe (pédagogie de l'intégration). Dans notre cas, le laboratoire-démonstration permet à l'élève d'apprendre la théorie de la gravité selon Einstein, même si elle est très complexe, car la démonstration –à l'aide du simulateur de gravité– illustre de manière concrète les tenants et aboutissants de cette théorie.

- 2) « *Est-ce que la pédagogie de l'intégration, associée à l'environnement numérique, peut appuyer le personnel enseignant au secondaire à mieux enseigner une théorie scientifique particulièrement complexe, telle la théorie de la gravité d'Einstein, de telle sorte que la situation d'apprentissage demeure intéressante et motivante pour l'élève et enrichissante sur le plan des compétences et des savoirs?* » À cet effet, nous émettons l'hypothèse que les apprentissages sont possibles lors de l'exécution d'un laboratoire semi-dirigé parce que la tâche exige de l'élève qu'il exécute et réussisse une tâche complexe (pédagogie de l'intégration), l'élève préfère se situer au centre de ses apprentissages (c'est lui qui contrôle la tablette numérique ou l'ordinateur portable) et aussi parce qu'il est stimulé positivement par la nature même de la question scientifique (la qualité de l'application de la tablette ou de la base de données interactive disponible sur internet).

TROISIÈME CHAPITRE – MÉTHODOLOGIE

Dans ce chapitre, nous présentons le type d'essai que nous visons et la méthodologie générale que nous proposons. Ensuite, nous révisons le contexte pédagogique idéal lors de la création et de l'exécution d'une situation d'apprentissage et d'évaluation, après quoi nous exposons notre méthodologie relativement à l'exécution en classe de notre projet, incluant le milieu scolaire, notre échantillon, les analyses statistiques, l'évaluation du matériel pédagogique par les élèves, les dimensions éthiques et enfin le calendrier de réalisation.

3.1 TYPE D'ESSAI ET MÉTHODOLOGIE PROPOSÉ

Notre expérience comme enseignant et les constats précédents nous ont amené à développer une Situation d'Apprentissage et d'Évaluation (SAÉ) en Astronomie, et de produire le matériel pédagogique s'y rattachant (cf. Paillé, 2007) dans le but, dans un premier temps, d'évaluer quantitativement la valeur pédagogique du laboratoire-démonstration et, d'autre part, de tester qualitativement si la pédagogie de l'intégration (Roegiers, 2004, 2005, 2010c, b, a, d, e) associée à l'environnement numérique (Keengwe et al., 2012; Keengwe and Bhargava, 2014; Keengwe, Onchwari, and Agamba, 2014a; Keengwe et al., 2014b; Liu et al., 2014; Stanhope and Corn, 2014) permettent à l'élève de mieux apprendre.

Les élèves sont appelés, dans un premier temps, à assister à une démonstration (de type *modeling*) illustrant à l'aide d'un simulateur de gravité la déformation de l'espace selon Einstein et, dans un second temps, d'intégrer les savoirs vus lors de cette démonstration dans le contexte d'une recherche scientifique qui explore la variabilité des systèmes extrasolaires dans notre galaxie et la probabilité de vie extraterrestre. L'utilisation de l'environnement numérique (ordinateurs ou tablettes numériques, mais pas les téléphones) est largement justifiée (section 2.1.3, p. 23).

Notre essai vise ainsi la production d'une SAÉ en Astronomie destinée à trois groupes enrichis d'élèves inscrits en 5^e secondaire au cours à option *Techniques et Méthodes en Science*. Le Collège privé est situé sur la rive-sud de Montréal (Canada).

Il est à noter que pour le bon fonctionnement de la SAÉ, l'élève doit pouvoir accéder au réseau internet de la 2^e à la 3^e période en plus de permettre une communication électronique entre l'élève et le corps enseignant à la 3^e période. L'élève reçoit après le laboratoire-démonstration son travail sous forme de fichier numérique (Annexe E, p. 99), remet par courriel son travail à partir du même fichier (Annexe F : p. 110), et reçoit son évaluation électroniquement et les parents en sont informés simultanément en CC.

3.2 CONTEXTE PÉDAGOGIQUE LORS DE LA CRÉATION ET DE LA MISE EN PLACE D'UNE SITUATION D'APPRENTISSAGE ET D'ÉVALUATION (SAÉ)

S'il existe plusieurs modèles et stratégies d'enseignement (Joyce and Weil, 1986), les modèles inspirés d'interaction sociale et ceux inspirés du développement de la personne sont priorisés ici. La SAÉ que nous proposons s'appuie sur le modèle constructiviste et socioconstructiviste (Joyce and Weil, 1986; Brown, Collins, and Duguid, 1989) et plus particulièrement sur la pédagogie de l'intégration (Roegiers, 2004, 2005). Ces deux modèles sont centrés sur l'apprenante et l'apprenant. Ici, c'est l'élève qui apprend par l'intermédiaire de ses représentations et de la réussite de ses tâches. Dans le premier modèle, les conceptions initiales ne sont pas seulement le point de départ et le résultat de l'activité, elles sont au cœur du processus d'apprentissage (Joyce and Weil, 1986; Brown et al., 1989). La construction d'un savoir, bien que personnelle, s'effectue de manière efficace dans un cadre social : les informations proviennent à la fois de ce que l'on pense et de ce que les autres apportent comme interactions et savoirs. La pédagogie de l'intégration quant à elle insiste sur le fait que l'élève apprend mieux en réussissant une tâche complexe (Roegiers, 2004, 2005, 2010c). L'élève doit donc pouvoir résoudre des problèmes complexes qui font partie de sa vie quotidienne, incluant ses dimensions familiale, sociale, scolaire et professionnelle.

Dans notre cas, l'élève questionne deux bases de données interactives professionnelles en Astronomie (Exoplanet Database, 2016; Indiana University, 2016) par l'intermédiaire d'un ordinateur portable. De ce point, nous tenons compte que la tâche pédagogique doit 1) être

spécifique et de dimension raisonnable; 2) être réalisable compte tenu des capacités et des intérêts de l'élève; 3) faire participer l'élève activement; et 4) poser un défi à l'élève qui lui semble pertinente (Gouvernement de la Saskatchewan, 1993).

3.2.1 SIGNIFICATION D'UNE SITUATION D'APPRENTISSAGE ET D'ÉVALUATION

Une SAÉ est dite significative si : a) elle rejoint les orientations du Programme de formation de l'école québécoise (Gouvernement du Québec, 2010b, c, a, 2011b, 2014); b) elle touche les centres d'intérêt des élèves et pose des défis à leur portée; et c) elle permet de mettre en évidence l'utilité des savoirs (Bibeau, 2009). Ce qui compte le plus pour Roegiers (2004), c'est que la SAÉ mobilise l'élève et qu'elle lui donne envie de travailler et de donner un sens à ce qu'il apprend. La motivation de l'élève est liée à l'investissement que celui-ci est prêt à consentir dans ses apprentissages. De manière plus détaillée, une SAÉ peut être significative, selon Roegiers (2004), dans la mesure où :

- elle amène l'élève à mobiliser ses savoirs en interpellant ce qu'il vit et ce qui l'intéresse et elle est présentée de façon telle que l'élève y perçoit un défi à réaliser;
- elle est directement utile à l'élève et elle lui permet de contextualiser les savoirs, d'explorer les applications de ces savoirs et de mettre en évidence les écarts entre la théorie et la réalité;
- elle permet à l'élève de mettre en évidence le rôle de différentes disciplines dans la résolution d'un problème complexe et de mesurer l'écart entre ce qu'il sait et ce qu'il devra apprendre.

3.2.2 DÉVELOPPEMENT DES COMPÉTENCES DISCIPLINAIRES ET TRANSVERSALES

Une compétence est définie par le MELS comme étant un *savoir-agir fondé sur la mobilisation et sur l'utilisation efficaces d'un ensemble de ressources* (Gouvernement du Québec, 2006b). Cette conception de la compétence suggère donc qu'on propose à l'élève des situations qui constituent à la fois le contexte où se développent et se manifestent les compétences et celui

où elles peuvent être évaluées (Gouvernement du Québec, 2006b). Dans cette perspective, l'évaluation est envisagée comme un moyen qui aide l'élève à apprendre et qui aide le corps enseignant à le guider dans sa démarche.

Notre objectif relativement à la présente SAÉ est de développer la compétence disciplinaire qui consiste à *Chercher des réponses ou des solutions à des problèmes d'ordre scientifique ou technologique* (Gouvernement du Québec, 2010b). Nous reviendrons plus en détail sur l'évaluation de cette compétence disciplinaire à la section 3.2.8. ÉVALUATION (p. 38).

Le MELS exige que l'enseignante ou l'enseignant évalue formellement au moins deux compétences transversales par année scolaire (Gouvernement du Québec, 2014). La SAÉ que nous proposons offre la possibilité d'évaluer de manière formative six de ces compétences transversales, au choix et au besoin du corps enseignant :

- *Exploiter l'information* : l'élève questionne deux bases de données interactives en Astronomie (sections 4.1.6, p. 51 et 4.1.8, p. 54). Cela permet à l'élève de *Répondre à ses questions à partir des données recueillies* (analyse quantitative et graphique des systèmes extrasolaires) et de *Réinvestir les données dans de nouveaux contextes* (prédire la probabilité de vie extraterrestre sur certaines exoplanètes);
- *Résoudre des problèmes* : il est demandé à l'élève d'*Analyser les éléments de la situation*, c'est-à-dire de *Cerner le contexte et d'en percevoir les éléments déterminants et les liens qui les unissent* (ce qui équivaut dans la tâche à repérer quelles sont les conditions pour qu'un système solaire offre une planète habitable pour la vie), *Reconnaître les ressemblances avec des situations analogues résolues antérieurement* (comparaison des systèmes planétaires extrasolaires), et *Saisir la structure du problème à résoudre* (prédire la probabilité de vie extraterrestre);
- *Exercer son jugement critique* : ici l'élève doit *Cerner la question et l'objet de réflexion* (représentation de la théorie de la gravité d'Albert Einstein), d'*En apprécier les enjeux sur le plan logique* (lien entre système planétaire et probabilité de vie extraterrestre), de *Remonter aux faits* (accéder aux bases de données interactives en Astronomie), d'*Explorer différentes options et des points de vue possibles ou existants* (comparaison de ses idées sur la Théorie d'Einstein avec les pairs), et enfin de *S'appuyer sur des repères logiques* qui permettent d'*Adopter une position* (la vie extraterrestre existe-elle ou pas?);

- *Exploiter les technologies de l'information et de la communication* : cette compétence se traduit par l'utilisation d'un appareil numérique, le questionnement de deux bases de données interactives en Astronomie (Exoplanet Database, 2016; Indiana University, 2016), et la production d'analyses quantitatives et graphiques;
- *Coopérer* : qualité de la communication et du travail de l'équipe, et;
- *Communiquer de façon appropriée* : synthétiser la question centrale (représentation de la Théorie de la Relativité Générale d'Einstein et une évaluation des conditions favorables au développement de la vie).

Quant aux domaines généraux de formation, la SAÉ que nous proposons touche essentiellement l'axe de développement relativement à la *Connaissance de l'environnement*, en particulier la *Compréhension de certaines caractéristiques et de phénomènes du milieu* (Gouvernement du Québec, 2006a, 2007b).

3.2.3 CONCEPTS PRESCRITS PAR LE MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION

La théorie de la gravité d'Einstein peut être enseignée de la 1^{re} à la 5^e secondaire (Gouvernement du Québec, 2010b, c, a, 2011b). Pour en citer un exemple, nous pouvons justifier notre SAÉ pour des élèves de 3^e secondaire en nous référant aux concepts ministériels prescrits qui touchent l'*Échelle de l'Univers*, notamment lorsqu'il est question de déterminer les *Conditions favorables au développement de la vie* (Gouvernement du Québec, 2010b, 2011b), c'est-à-dire les conditions qui favorisent la présence d'une *Atmosphère* (selon la chimie de la planète), d'*Eau Liquide* (un Soleil relativement chaud, mais pas trop) et d'une *Source d'Énergie* (un Soleil relativement proche, mais pas trop). La découverte spectaculaire de milliers de planètes extrasolaires (Rein, 2014; Exoplanet Database, 2016), et la probabilité qu'au moins 160 milliards de ces exoplanètes existent au sein de la Voie Lactée (Cassan, Kubas, Beaulieu, Dominik, Horne et al., 2012) renforcent l'idée de rattacher ces découvertes aux concepts prescrits par le MELS. À cela s'ajoute que plusieurs de ces exoplanètes ressemblent énormément à la Terre (Bhattacharjee, 2014; Quintana, Barclay, Raymond, Rowe, Bolmont et al., 2014; Rein, Fujii, and Spiegel, 2014);

en fait, il a été estimé qu'environ 50 milliards de ces planètes de type terrestre existeraient dans notre seule galaxie, sur un total de 160 milliards de planètes dans la Voie Lactée (Cassan et al., 2012). Rattacher ces découvertes des exoplanètes de type terrestre à la probabilité grandissante de découvrir une vie extraterrestre (Seager, 2009) nous apparaît comme un élément déclencheur particulièrement stimulant pour l'élève, sujet que nous traiterons à la section 3) (p. 35).

3.2.4 EXÉCUTER UNE SAÉ INTÉRESSANTE ET MOTIVANTE POUR L'ÉLÈVE ET ENRICHISANTE SUR LE PLAN DES COMPÉTENCES ET DES SAVOIRS

La réalisation et l'exécution d'une SAÉ se structure en plusieurs moments, fréquence qui change selon les auteurs, mais qui convergent vers les mêmes éléments. Ici, nous suivons le modèle de Touchette (2007) et Bibeau (2009) qui conviennent très bien au milieu scolaire québécois. Chacune des étapes permet de définir les tâches destinées aux élèves. La SAÉ s'inscrit dans le contexte d'un modèle particulier de processus d'enseignement-apprentissage segmenté globalement de la manière suivante (Touchette, 2007; Bibeau, 2009) :

- 1) *la phase de préparation ou d'amorce de la tâche* implique dans un premier temps que la curiosité de l'élève soit suscitée par un élément unique (cf. l'élément déclencheur, section 3.2.5, p. 35). Cette phase représente aussi un moment où l'on s'assure que l'élève ne soit pas intimidé par l'idée d'explorer une théorie scientifique particulièrement complexe comme celle d'Einstein, surtout parmi les élèves faibles;
- 2) *la phase de réalisation en classe*. La SAÉ se déroule sur quatre périodes d'une heure chacune. L'élément déclencheur est présenté à l'élève dès le début de la 1^{re} période (30 minutes; la présentation *Power Point* de l'élément déclencheur est présentée à l'Annexe B, p. 83), après quoi l'enseignante ou l'enseignant exécute le laboratoire-démonstration qui illustre la relativité Einstein à l'aide du simulateur de gravité (30 minutes; section 4.1.2, p. 48; Figure 45, p. 136). Le document qu'utilise l'enseignante ou l'enseignant pendant la démonstration du concept de la gravité est présenté à l'Annexe C (p. 92). Aux 2^e et 3^e périodes (2 x 60 minutes), l'élève, en équipe de deux, transfère ses savoirs quant à la Théorie de la Relativité Générale qu'il s'est représentée lors du laboratoire-démonstration à la période précédente, et les applique à deux nouveaux problèmes : 1) la diversité extrême des systèmes planétaires extrasolaires que les astronomes ont trouvés et, 2) la probabilité que des formes de vie existent dans notre galaxie. L'élève analyse quantitativement

certains systèmes extrasolaires, particulièrement comment la masse des étoiles affecte les systèmes planétaires. La base de données interactive que nous utilisons permet d'analyser graphiquement (par nuage de points) la totalité des exoplanètes découvertes à ce jour. L'élève répond quantitativement à des questions liées au concept de « zone habitable », c'est-à-dire la zone de tout système solaire où l'eau –si elle est disponible sur la planète– peut théoriquement circuler sous forme liquide. Cette question est essentielle pour qui s'intéresse aux conditions favorables à la vie. En effet, l'eau liquide est une condition nécessaire aux réactions biochimiques en lien avec la vie, du moins telle qu'on la connaît. À la 4^e période, l'élève est évalué;

- 3) *la phase de l'intégration, du réinvestissement et de la structuration des apprentissages*. La SAÉ que nous proposons exige l'élève qu'il développe un savoir-agir fondé sur la mobilisation et l'utilisation d'un ensemble de ressources (sa propre créativité et son imagination, la représentation intellectuelle d'un concept théorique complexe, la maîtrise de deux bases de données scientifiques réelles, des gestes coopératifs pendant les apprentissages) et les savoir-faire (comme analyser des données de nature scientifique à même l'ordinateur ou la tablette électronique, ou transférer des résultats dans un rapport de recherche) et enfin les savoir-être (montrer des comportements d'entraide et une attitude positive face à la tâche et à ses propres apprentissages, valider ses croyances versus ses savoirs).

3.2.5 L'ÉLÉMENT DÉCLENCHEUR

L'élément déclencheur fait appel aux conceptions initiales de l'élève pour qu'il trouve un intérêt en la tâche. Il nous apparaît favorable que l'élément déclencheur soit associé à la découverte absolument fascinante des astronomes qui prouve hors de tout doute que notre galaxie est peuplée de centaines de milliards de systèmes solaires, desquels orbitent des milliers de milliards de planètes (Cassan et al., 2012). Il nous apparaît également approprié d'associer ces découvertes à la probabilité de plus en plus grande de découvrir que la vie extraterrestre existe. Les astronomes ont confirmé, en date du 1^{er} juin 2016, l'existence de plus de 3,300 exoplanètes relativement proches de la Terre. Elles et ils estiment que l'humanité pourrait découvrir jusqu'à 160 milliards de planètes dans notre galaxie seulement, soit une moyenne de 1,6 planètes par étoile (Cassan et al., 2012). Environ 8% des exoplanètes confirmées sont habitables (température moyenne à la surface entre 0 °C et 100 °C).

L'élément déclencheur pose ici une question essentielle relativement à l'Astronomie contemporaine : « *Quelles conditions peuvent affecter le développement de la vie?* » Rappelons-nous que le temps et l'espace sont des phénomènes fixes pour Isaac Newton, mais flexibles pour Einstein, ou encore que la gravitation agit comme un aimant pour Newton, mais comme une déformation de l'espace pour Einstein (Speziali, 1972; Fölsing, 1997; Hentschel and Hentschel, 1998; Einstein, 2002; Isaacson, 2007). Nous posons ensuite la question si la gravité peut affecter les conditions favorables au développement de la vie. Cette question touche par ricochet les conditions relatives à la possibilité de vie extraterrestre. Cette dernière interrogation exige une évaluation des zones dites « habitables » au sein des systèmes extrasolaires, c'est-à-dire là où l'eau peut théoriquement circuler à l'état liquide et donc être impliquée dans les processus biochimiques en lien avec la vie telle que nous la connaissons.

Un bon point de départ dans notre cas a été de présenter, au tout début de la 1^{re} période, une vidéo de nature journalistique concernant la découverte spectaculaire de l'exoplanète Kepler 452b en juillet 2015, planète habitable et particulièrement semblable à la Terre (TVA Nouvelles, 2015).

3.2.6 ORGANISATION DE LA CLASSE ET DE LA SAÉ

Une fois l'élément déclencheur présenté à la 1^{re} période (~30 minutes; section 3); p. 35), le laboratoire-démonstration peut commencer. Il convient à cet effet de réorganiser la classe en fonction de cette démonstration. Il est nécessaire de libérer un espace d'au moins 5 m de diamètre. La structure principale du laboratoire-démonstration mesure à elle seule 2 m de diamètre (Figure 38, p. 134), autour duquel les élèves sont appelés à se disperser. Aux 2^e et 3^e périodes de la SAÉ toutefois, la classe doit être réorganisée de nouveau, cette fois-ci sous forme d'îlots (équipe de 2). L'élève travaille ainsi en grand groupe (toute la classe) à la 1^{re} période lors du laboratoire-démonstration (élément déclencheur et simulateur de la gravité), en équipe de deux aux 2^e et 3^e périodes (bases de données interactives en Astronomie, analyse graphique des systèmes extrasolaires), et seul et en silence à la 4^e période (évaluation). Chaque élève a accès à un appareil numérique de la 2^e à la 4^e période.

3.2.7 GESTION DE CLASSE ET CONSIGNES DE SÉCURITÉ

Si la gestion de classe tient compte des règles disciplinaires et tout ce qui touche à l'organisation de la classe, le plus important ici concerne les règles de sécurité entourant l'exécution du laboratoire-démonstration lors de la 1^{re} période de la SAÉ. En effet, celui-ci implique l'utilisation de plusieurs boules de quille de masses différentes, dont la plus lourde dans notre cas atteignait 5,5 kg (plus de 12 livres). Cela représente un risque de blessure grave si jamais un tel objet était échappé sur le pied ou les orteils de quelqu'un (incluant soi-même). Une prudence particulière doit y être apportée! Il appartient au personnel enseignant de gérer le rangement, le déplacement et la gestion en général des boules de quille, à moins qu'une consigne de sécurité très claire ne soit transmise à un élève de confiance qui pourrait agir comme assistant. De plus, la structure démonstratrice (le simulateur de gravité : Figure 44, p. 136) a été construite à partir de bois et de plastique en pvc, en plus d'être relativement grande. Il est donc nécessaire d'insister auprès des élèves sur le fait que personne ne peut s'appuyer ou s'asseoir dessus, ni avant, pendant ou après son utilisation. Enfin, l'utilisation de petites billes de verre ou métalliques implique que certaines d'entre elles s'échappent du simulateur et roulent par terre (cela est inévitable, malgré la bande de jardinage que l'on a ajoutée tout autour du simulateur : Figure 45, p. 136) et occasionner une chute grave si un élève de retrouvait à glisser dessus (entorse de la cheville, blessure à la tête lors d'une chute incontrôlée, etc.). Il est impératif de ramasser ces petites billes de verre, de plastique et de métal au fur et à mesure qu'elles s'échappent du démonstrateur. La collaboration des élèves à cet effet est essentielle. Finalement, puisque chaque élève a accès à une tablette numérique ou à un ordinateur portable de la 2^e à la 4^e période, il est important de rappeler au groupe la fragilité et le coût élevé de ces appareils. Le respect du matériel est de mise en tout temps et aucun écart de conduite à cet effet ne peut être toléré.

3.2.8 ÉVALUATION DES COMPÉTENCES DISCIPLINAIRES ET TRANSVERSALES

« *L'élève n'apprend pas pour être évalué; il est évalué pour mieux apprendre.* »

(Gouvernement du Québec, 2007a, p. 15)

Évaluation de la compétence disciplinaire

Nous proposons d'évaluer la première compétence disciplinaire de l'élève, soit de *Chercher des réponses ou des solutions à des problèmes d'ordre scientifique ou technologique*, à laquelle se rattache la compétence secondaire de *Communiquer à l'aide des langages utilisés en science et en technologie* (Gouvernement du Québec, 2011a). Dans le Programme de la Formation de l'École Québécoise du MELS, chaque compétence comporte ses critères d'évaluation. Ceux que nous avons utilisés sont résumés au Tableau 1 (p. 39). C'est par l'entremise d'une analyse quantitative (de type graphique) que nous proposons d'évaluer ces critères. Le soutien à aux élèves en difficulté est facilité par le travail en équipe, quoiqu'une aide personnalisée est habituellement essentielle pour certains d'entre eux.

Le système de notation à la base du Programme de Formation du Ministère de l'Éducation (Gouvernement du Québec, 2006b) repose sur les principes suivants :

- Il traduit de manière fiable les apprentissages réalisés par l'élève et tient compte des caractéristiques des deux cycles du secondaire;
- Il contribue à une exploitation efficace de l'information sur les apprentissages de l'élève en vue de la régulation et des décisions relatives au cheminement scolaire;
- Il est facile à comprendre et connu des parents et des élèves;

Tableau 1. Critères utilisés pour évaluer la première compétence disciplinaire en Science et Technologie (Gouvernement du Québec, 2011a).

Représentation de la situation	<ul style="list-style-type: none"> • Reformulation du problème • Formulation d'hypothèses ou de pistes de solution
Élaboration d'un plan d'action	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle des variables
Mise en œuvre du plan d'action	<ul style="list-style-type: none"> • Respect des règles de sécurité • Utilisation des modes de représentation appropriés (tableaux, graphiques)
Élaboration d'explications, de solutions ou de conclusions	<ul style="list-style-type: none"> • Production d'explications ou de conclusions • Vérification de la concordance entre l'hypothèse et l'analyse des résultats • Proposition d'améliorations ou de solutions nouvelles • Respect de la terminologie, des règles et des conventions

Évaluation d'une compétence transversale

Tel que mentionné plus haut (section 3.2.2., p. 31), le Ministère de l'Éducation exige que le corps enseignant évalue au moins deux compétences transversales par année scolaire (Gouvernement du Québec, 2014). Dans les trois collèges privés pour lesquels nous avons travaillé au cours des huit dernières années, tous s'entendaient qu'une première compétence transversale soit évaluée dès la première étape (premier bulletin) et qu'une seconde compétence transversale, différente de la première, soit évaluée à la dernière étape (dernier bulletin). La présente SAÉ permet d'évaluer au moins six compétences transversales (section 3.2.2), et nous proposons ici les grilles permettant d'évaluer deux de celles-ci. L'évaluation des compétences transversales se fait en classe, spécifiquement aux 2^e et 3^e périodes lorsque l'élève collecte ses données astronomiques et les analyse quantitativement (graphique).

1) *Coopérer*

L'élève doit répondre aux questions de la SAÉ pendant les 2^e et 3^e périodes en équipe de deux. Nous proposons que l'enseignante ou l'enseignant utilise la grille d'évaluation présentée au Tableau 2 (p. 40) pour évaluer cette compétence transversale.

Tableau 2. Évaluer la compétence transversale *Coopérer* (adapté de Giordan, 1999).

Niveau 1	Pour tenter de répondre aux questions, l'élève travaille plutôt seul à essayer de trouver une réponse. Il ne pense pas à travailler avec les autres élèves. Il ne communique avec eux que lors des échanges imposés.
Niveau 2	L'élève coopère et tente d'identifier les éléments de réponse, mais il ne discute avec les autres que de façon très ponctuelle. Ainsi, il ne semble pas toujours donner ses idées sur les manières de répondre aux questions spécifiques.
Niveau 3	L'élève coopère avec les autres afin de trouver une solution au problème. Il écoute les autres élèves et il émet son opinion, mais ne semble pas impliqué à tout moment dans les discussions.
Niveau 4	L'élève coopère très bien en participant activement aux différentes étapes de l'activité. Il argumente son point de vue de manière intéressante et il organise la présentation de la solution trouvée avec les autres élèves.

2) *Exploiter les technologies de l'information et de la communication*

Cette compétence se traduit par le questionnement de deux bases de données interactives en Astronomie (Exoplanet Database, 2016; Indiana University, 2016). Nous proposons la grille d'évaluation au Tableau 3 (p. 40) pour évaluer cette compétence.

3.3 MISE À L'ESSAI DU MATÉRIEL PÉDAGOGIQUE

Nous avons recueilli des observations qui permettent d'évaluer la qualité de notre SAÉ au niveau de ses effets sur les apprentissages de nouveaux savoirs (Annexe A : p. 81; Annexe G : p. 125) et sur la motivation des élèves à l'aide d'un questionnaire d'appréciation (Annexe H, p. 129). De telles données nous offrent la possibilité d'améliorer notre travail.

Tableau 3. Évaluer la compétence transversale *Exploiter les technologies de l'information et de la communication* (adapté de Giordan, 1999; Gouvernement de l'Alberta, 2015).

Niveau 1	L'élève n'apprend pas le fonctionnement de la base de données, ni ne fait de choix judicieux pour répondre à la tâche (choix des variables, utiliser des raccourcis, sauvegarder et récupérer ses résultats, copier/coller ou copier/déplacer au lieu de réécrire, etc.). Il ne discerne pas les éléments isolés qui lui servent à construire son savoir. Il ne réutilise pas les procédures et les processus liés à l'environnement numérique dans de nouvelles situations.
Niveau 2	L'élève apprend le fonctionnement de la base de données, mais il n'apprend pas à faire des choix judicieux pour répondre à la tâche et nécessite souvent l'aide du corps enseignant ou d'autres élèves. Il s'initie progressivement à une intégration fructueuse des différents outils technologiques, mais éprouve de la difficulté à mettre en place ses stratégies d'apprentissage. Il discerne difficilement les éléments isolés qui lui servent à construire son savoir. Il réutilise rarement les procédures et les processus liés à l'environnement numérique dans de nouvelles situations.
Niveau 3	L'élève apprend le fonctionnement de la base de données, choisit souvent l'outil le mieux adapté à la tâche, mais nécessite occasionnellement l'aide du corps enseignant ou d'autres élèves. Il utilise les stratégies appropriées pour interagir et se dépanner. Il s'exerce à trouver des solutions aux problèmes techniques qui surviennent et à exploiter le potentiel d'un réseau d'échange. Il discerne difficilement les éléments isolés qui lui servent à construire son savoir. Il réutilise occasionnellement les procédures et les processus liés à l'environnement numérique dans de nouvelles situations.
Niveau 4	L'élève apprend le fonctionnement de la base de données, enseigne le fonctionnement à une coéquipière ou un coéquipier et choisit toujours l'outil le mieux adapté à la tâche. Il discerne adéquatement les éléments isolés qui lui servent à construire son savoir. Il expérimente, résout, crée et communique son savoir avec aisance. Il réutilise sans aide les procédures et les processus liés à l'environnement numérique dans de nouvelles situations.

3.3.1 MILIEU SCOLAIRE ET COLLECTE DE DONNÉES

Le laboratoire-démonstration a été testé à deux reprises. Nous avons dans un premier temps mis en place un projet pilote qui s'est déroulé en septembre 2014 et qui a impliqué 57 de nos élèves de deux groupes réguliers en *Science et Technologie* de 3^e secondaire (14 ans). Par la suite, en mai

2016, nous avons testé de manière systématique la situation d'apprentissage dans sa totalité dans un second collège privé également sur la rive-sud de Montréal. La mise en place du laboratoire a nécessité cette fois-ci la participation de 87 élèves –que nous ne connaissions pas– répartis en trois groupes enrichis de 5^e secondaire (17 ans) qui s'étaient inscrits au cours optionnel de *Techniques et Méthodes en Science*.

La collecte systématique de données a été effectuée dans le deuxième cas seulement (Chapitre 4, p. 47). Ainsi, nous avons demandé aux élèves, au tout début de la SAÉ, ce qu'ils connaissaient d'Albert Einstein en général (sous forme de questions à choix multiples) et de la Théorie de la Relativité Générale en particulier (sous forme de question ouverte). À la toute fin de la SAÉ, nous avons posé les mêmes questions aux élèves dans le but de comparer leurs savoirs avant et après l'exécution de la SAÉ. De plus, nous avons soumis aux élèves un questionnaire d'appréciation de la SAÉ. Le questionnaire sur les savoirs qui a été présenté aux élèves avant le laboratoire-démonstration est disponible à l'Annexe A (p. 81), celui présenté après le laboratoire-démonstration à l'Annexe G (p. 125) et le questionnaire d'appréciation de la SAÉ à l'Annexe H (p. 129). Ce dernier est basé sur l'échelle de Likert, telle que discutée à la section suivante.

3.3.2 ÉVALUATION DU MATÉRIEL PÉDAGOGIQUE PAR LES ÉLÈVES

L'échelle de Likert est une méthode relativement fiable qui sert à mesurer les attitudes et les comportements d'une personne (Carricano and Pujol, 2009; Malhotra, 2011; Yergeau and Poirier, 2013). À l'inverse d'une simple question à laquelle l'élève répond par Oui ou par Non, l'échelle de Likert permet de dégager différents degrés d'opinion. Disposer d'un éventail de réponses permet de mieux identifier les secteurs de l'enseignement à améliorer.

Nous croyons qu'un questionnaire de type Likert peut aider à évaluer la qualité d'une SAÉ. L'échelle de Likert permet en effet d'estimer l'attitude d'un individu en mesurant l'intensité de son approbation. Cette échelle est symétrique et permet une position centrale ou neutre (par exemple : Ni en accord ni en désaccord, ou Sans opinion). Elle comprend le plus souvent cinq à sept éléments. Lors de l'exploitation des réponses, on peut transformer l'échelle en termes

numériques lorsque l'échantillon est assez important, ce qui est notre cas ($N = 87$ élèves). En additionnant le nombre de points obtenus, l'enseignante ou l'enseignant peut calculer un score basé sur la moyenne des réponses de ses élèves. Les échelles de Likert sont additives; ainsi, en posant une question fondée sur ce type d'échelle, on peut calculer des scores synthétiques présentant un grand pouvoir explicatif.

Cette méthode est très populaire aussi parce qu'elle est facile à administrer et relativement simple à analyser (Carricano and Poujol, 2009; Malhotra, 2011; Yergeau and Poirier, 2013). À cela s'ajoute que son coût de développement est faible et que la méthode permette de mesurer un gradient de réponse. Cette échelle suppose un poids identique (sur le plan statistique : cf. Yergeau and Poirier, 2013) accordé à chaque item demandé.

L'industrie du sondage recommande que l'échelle de Likert soit utilisée de manière judicieuse (SurveyMonkey, 2015). En effet, il est recommandé : 1) d'être précis en utilisant des échelles numérotées d'au moins cinq unités, sans jamais dépassé sept, 2) d'être unipolaire permettant ainsi qu'une extrémité de l'échelle soit l'exact opposé de l'autre, ce qui la rend plus fiable du point de vue méthodologique, 3) d'utiliser une numérotation impaire (5 ou 7) car elle permet la neutralité à la répondante ou au répondant, 4) d'être cohérent en créant les options de réponses de l'une échelle de telle sorte qu'elles sont toujours espacées de la même manière, 5) d'être complet en s'assurant que les échelles englobent toutes les réponses possibles, 6) d'être logique en y ajoutant une question de branchement conditionnel pour que seules les personnes mécontentes passent à la question demandant des suggestions d'amélioration, et finalement 7) de demeurer interrogatif en évitant de demander aux gens s'ils sont d'*Accord* ou *Pas d'Accord* avec des énoncés, car cette méthode a tendance à biaiser les réponses parce que les gens ont tendance à approuver l'énoncé plutôt que de lire attentivement la question (SurveyMonkey, 2015).

Dans le cadre du présent essai, nous désirons évaluer la qualité de notre matériel pédagogique à deux niveaux :

- 1) La qualité des apprentissages des élèves : Ont-ils appris quelque chose? Ont-ils été en mesure d'intégrer les savoirs dans un nouveau contexte? Quelle est la valeur pédagogique du laboratoire-démonstration?

- 2) Leur motivation face à la tâche : Ont-ils apprécié d'être appuyés par un environnement numérique? Est-ce que l'utilisation d'une base de données *interactive* a contribué à augmenter leur curiosité et leur motivation face au travail?

3.3.3 ANALYSE DE DONNÉES ET TAILLE DE L'ÉCHANTILLON

Nous avons adopté l'approche exploratoire (cf. Yergeau and Poirier, 2013), car nous n'avions pas d'idées préalables sur la structure des données. Tel que recommandé par Hair, Anderson, Tatham *et al.* (1998), notre objectif a été de dépasser le seuil minimum de 100 élèves au total, et idéalement d'obtenir 10 élèves par variable qui répondent au questionnaire. Nous avons testé 11 variables, ce qui exige de nous de tester notre SAÉ au sein de 11 variables \times 10 élèves par variable = 110 élèves au total. Dans notre situation, nous avons pu rassembler 87 élèves, ce qui est près du seuil optimal recommandé par Hair *et al.* (1998).

Nous avons utilisé le *Test Q de Cochran pour échantillons appariés* (Sokal and Rohlf, 2011) pour quantifier les savoirs acquis avant versus après le laboratoire-démonstration.

Il convient lors d'une analyse statistique des échelles de Likert de respecter un certain nombre de postulats (Hair et al., 1998; Carricano and Poujol, 2009; Malhotra, 2011; SPSS Inc., 2013; Yergeau and Poirier, 2013). Sans entrer dans les détails, il s'agit ici 1) de s'assurer que les items soient minimalement corrélés entre eux et que les corrélations ne soient pas toutes statistiquement égales à zéro, 2) d'expliquer la plus grande partie de la variance avec un minimum de facteurs, 3) de choisir le nombre de facteurs à extraire grâce à la méthode de la rupture du coude de Cattell (le coude de Cattell constitue un critère très sévère pour déterminer le nombre de facteurs à retenir dans une analyse en composantes principales), 4) de déterminer la combinaison de variables qui est la plus associée à chacun des facteurs significatifs, et enfin, 5) de vérifier si cette échelle est stable dans le temps et si elle permet de bien mesurer le construit que nous aurons identifié grâce à l'indice alpha de Cronbach (Hair et al., 1998; Carricano and Poujol, 2009; Malhotra, 2011; SPSS Inc., 2013; Yergeau and Poirier, 2013). L'indice de Cronbach résulte en

une expression décimale qui varie entre 0 et 1; plus la valeur alpha s'approche de 1, plus l'ensemble des éléments est homogène (SPSS Inc., 2013; Yergeau and Poirier, 2013).

Nous avons posé à l'élève cinq questions qui ont mesuré son apprentissage des savoirs et 11 questions d'appréciation qui ont mesuré la motivation de l'élève et son évaluation de la SAÉ dans son ensemble. Dans le premier cas, les données étaient de nature nominale (Mauvaise réponse, Ne sait pas, Réponse partiellement correcte et Réponse entièrement correcte). Puisque les réponses dans le second cas étaient basées sur une échelle numérique de type Likert, les données étaient de nature ordinale. Nous avons performé tous les tests avec SPSS 22 (SPSS Inc., 2013) et nous avons fixé la probabilité α à 0,05.

3.3.4 DIMENSIONS ÉTHIQUES À L'ÉTUDE

Plusieurs dimensions éthiques ont été considérées lors de la conception, de la mise en place et de l'exécution de la présente SAÉ (Harrison, 2000; Fortin, 2010; Gouvernement du Canada, 2014). En particulier : 1) nous avons obtenu la permission écrite de tester notre SAÉ en classe de la direction du Collège Jean de la Mennais et de quatre membres du personnel enseignant le 24 février 2016²; 2) le consentement verbal des élèves a été obtenu au tout début du premier cours, en insistant sur le fait qu'il s'agissait d'un « projet pilote qui cherche à développer une situation d'apprentissage et d'évaluation sur la théorie de la gravité d'Albert Einstein ». Cette présentation a particulièrement éveillé chez les élèves la curiosité et un grand désir d'en apprendre plus sur le sujet; 3) nous avons insisté sur le fait que ce projet ne serait pas évalué et qu'il ne

² Nous remercions très sincèrement le directeur général –M. Richard Myre, la directrice des services pédagogiques –Mme Nathalie Provost, les enseignantes et enseignants des cours de Chimie, de Physique, de Techniques et Méthodes en Science et de Mathématiques –Nancy Ayotte, Patricia Bégin, Mathieu Boutin et Michel Ménard, de même que 87 élèves intelligents, curieux et désireux d'apprendre de nous avoir permis d'exécuter notre projet dans leur milieu.

s'appliqueraient pas à leurs résultats académiques. Malgré cela, tous les élèves sans exception ont accepté de se mettre en équipe de deux et de participer à l'exercice (en opposition à faire du travail personnel). Il semble que le nom d'Einstein soit bien connu de (et positivement reconnu par) la clientèle étudiante, mais en même temps l'annonce de notre projet a révélé que les élèves connaissaient très peu les accomplissements scientifiques du physicien. C'est comme si l'élève était conscient du degré d'accomplissement d'Einstein, mais sans savoir pourquoi exactement. Cela a eu pour effet d'amplifier leur motivation d'apprendre, au-delà du meilleur scénario que nous avons imaginé.

Nous avons respecté tous les grands principes éthiques associés à un projet de recherche impliquant des êtres humains (Harrison, 2000; Fortin, 2010; Gouvernement du Canada, 2014), notamment le consentement libre et éclairé (nos élèves étant âgés en moyenne de 17 ans, l'accord des parents n'a pas été demandé), le respect de la vie privée et des renseignements personnels, la réduction des inconvénients et l'optimisation des avantages. De plus, l'élève a reçu l'assurance qu'il pouvait se retirer de la recherche à tout moment.

3.3.5 CALENDRIER DE RÉALISATION DE LA MISE À L'ESSAI

L'Annexe K (p. 137) présente les principales étapes de réalisation, leur durée ainsi que les moyens utilisés pour y parvenir.



QUATRIÈME CHAPITRE – ENSEIGNER LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE D’ALBERT EINSTEIN

Nous présentons dans la première partie de ce chapitre le matériel que nous avons développé, l’élément déclencheur que nous avons choisi, et les documents de l’élève et du personnel enseignant. Dans la seconde partie, nous exposons les résultats de nos analyses.

4.1 DÉVELOPPEMENT DU MATÉRIEL

4.1.1 ACTIVITÉ PRÉPARATOIRE À LA SAÉ (AVANT LA DÉMONSTRATION DU SIMULATEUR DE GRAVITÉ)

Sur le plan des savoirs, il est important que l’élève réfléchisse par lui-même, et il pourrait être tentant d’exiger de sa part de se préparer à la SAÉ en lisant un ou quelques textes sur Albert Einstein et la gravité. Cependant, nous croyons que cela aurait été une erreur, car notre première intention de recherche était de mesurer quantitativement la valeur pédagogique du laboratoire-démonstration. Nous avons préféré avant l’exécution de la démonstration demander aux élèves de répondre à un questionnaire sur leurs savoirs concernant Einstein en général et la Théorie de la Relativité Générale en particulier, et nous avons reposé les mêmes questions deux périodes plus tard. Ainsi, nous avons volontairement omis tout travail préparatoire au laboratoire-démonstration, afin de ne pas influencer les réponses de l’élève au premier questionnaire des savoirs (Annexe A, p. 81), nous permettant de comparer ces savoirs avec le deuxième questionnaire (Annexe G, p. 125)³.

³ Prendre note que les Annexes A à H sont présentées dans l’ordre chronologique à laquelle elles ont été utilisées en classe.

4.1.2 MATÉRIEL NÉCESSAIRE À LA FABRICATION DU SIMULATEUR DE GRAVITÉ (1^{RE} PÉRIODE)

Le simulateur de gravité a été initialement développé par la NASA et le Dr. Shannon Range de l'Université Stanford (Range, 2004). Il a par la suite été adapté pour l'enseignement de la *Physique* par M. Dan Burns de l'école Los Gatos en Californie (Burns, 2012, 2014).

Le simulateur de gravité montre un diamètre relativement grand de 2 m (Figure 39, p. 134). Il est fabriqué à l'aide de matériaux de plomberie et de construction, à partir duquel l'on ajoute un tissu extensible de type *Spandex™* (pour maillot de bain), des boules de quilles, des boules de billard, de snooker et de petites billes de verre à densités et à couleurs variées (Annexe I; p. 130). La structure partiellement et complètement assemblée est illustrée à la Figure 38 et la Figure 39 respectivement (p. 134). Il est possible de fabriquer une telle structure pour moins de CDN \$200 (Annexe I). La solution proposée par M. Burns est probablement plus solide puisqu'elle comporte sept poteaux (Burns, 2014) plutôt que quatre (Figure 38, p. 134); si une institution scolaire peut se permettre de payer un peu plus, nous croyons que la version de M. Burns est préférable. Toutefois, dans un contexte budgétaire serré, la version que nous proposons ici fait très bien l'affaire (Annexe I).

Il est important que le grillage dessiné sur le tissu extensible soit le plus perpendiculaire possible. L'utilisation d'une équerre facilite le tracé avec précision des premières lignes de la grille (Figure 36, p. 133). Parallèlement, le tissu extensible doit être ajusté sur la structure de telle sorte que le grillage soit aussi carré que possible. Attacher les quatre coins du tissu extensible aux pattes de la structure à l'aide de pinces en métal contribue à stabiliser le tissu extensible de manière uniforme, en plus de stabiliser toute la structure en pvc (flèche rouge à la Figure 39, p. 134).

L'effet gravitationnel des petites billes et des boules de quille est illustré de la Figure 40 (p. 135) à la Figure 44 (p. 136). Les trois boules de quille –en représentation d'étoiles de différente masse– que nous avons utilisées montraient les masses suivantes :

- Boule de quille très lourde: 12,21 livres (5,552 kg)
- Boule de quille lourde: 10,19 livres (4,630 kg)
- Boule de quille légère: 3,48 livres (1,582 kg)

Nous avons utilisé des petites billes pour simuler les planètes, les satellites naturels, satellites artificiels, comètes, astéroïdes, et autres objets célestes (Figure 37, p. 133). La masse de ces petites sphères variait de quelques grammes (styromousse, plastique, verre, bois) et pouvait atteindre 50-100 g (plomb, acier, fer, bronze, aluminium). Nous avons également utilisé des sphères de masse intermédiaire entre les boules de quille et les petites billes de verre, notamment des boules de billard (175 g) et de snooker (125 g); de telles masses intermédiaires permettaient de simuler de très grosses planètes, comme Jupiter et sa soixantaine de satellites.

4.1.3 QUÊTE D'INFORMATION DE LA PART DE L'ÉLÈVE

La recherche d'information s'est faite, du point de vue de l'élève, de deux façons : 1) par déduction et par prédiction lors du laboratoire-démonstration, et 2) par le biais d'un questionnement de deux bases de données interactive professionnelle en Astronomie (Exoplanet Database, 2016; Indiana University, 2016).

Lors du laboratoire-démonstration à la 1^{re} période, l'élève a été appelé à déduire (en observant le comportement des billes, des boules de billard et des boules de quille) le comportement de l'espace et des planètes extrasolaires. Ces observations comprennent la déformation spatiale de l'espace en fonction de la masse du Soleil (Théorie de la Relativité Générale), l'origine des systèmes planétaires, la diversité des systèmes extrasolaires dont les masses solaires et le nombre d'exoplanètes par système solaire, la vitesse orbitale des exoplanètes en fonction de la distance étoile-planète, le système Terre-Lune et les autres systèmes planète-satellites, ou encore les effets de la gravitation sur l'accélération gravitationnelle (Annexe C, p. 92).

Lors de la recherche d'information sur la diversité des exoplanètes aux 2^e et 3^e périodes, l'élève a été appelé à questionner deux bases de données interactives afin de répondre à une série de questions (Document de l'élève à l'Annexe E, p. 99; Corrigé à l'Annexe F, p. 110), notamment la relation positive entre la période orbitale et la distance séparant celle-ci de son étoile, la distance Soleil-Exoplanète et ses effets sur la localisation de la zone dite « habitable », ou encore la relation négative entre la température estimée à la surface de l'exoplanète et la distance séparant celle-ci

de son étoile (une exoplanète éloignée de son Soleil sera plus froide que celle plus proche). Nous avons également pensé à la relation positive entre la distance séparant l'étoile de l'exoplanète et la masse de cette dernière (les grosses planètes ont tendances à se retrouver loin de leur Soleil respectif). Ces questions seront définies plus précisément au Chapitre 4 (p. 47).

4.1.4 ACTIVITÉ PRÉPARATOIRE À L'EXÉCUTION DE LA SAÉ (2^E ET 3^E PÉRIODES)

Une lecture après le laboratoire-démonstration est donnée en devoir. Le sujet porte sur les méthodes scientifiques et les techniques permettant de détecter les exoplanètes. Ce texte est présenté à l'Annexe D (p. 94) et il s'adresse à des élèves de 5^e secondaire.

Si la SAÉ était présentée à des élèves de 3^e secondaire, les thèmes nécessaires à une meilleure préparation à la SAÉ et qui sont prescrits par le MELS incluraient la définition de l'*unité astronomique*, la *taille relative des corps célestes*, la *masse* versus le *poids* (déjà vus au 1^{er} cycle: Gouvernement du Québec, 2010a, 2011b), une *étoile comme source d'énergie* (déjà vus au 1^{er} cycle: Gouvernement du Québec, 2010a, 2011b), les *exoplanètes*, de même que les *Conditions nécessaires au développement de la vie*, soit : une *orbite de forme plutôt circulaire*, une *distance étoile-planète optimale (zone habitable)*, la *présence d'eau liquide*, la *présence d'une atmosphère*, une *masse idéale pour l'exoplanète*, et la *présence d'une lithosphère*. Il existe au Québec une grande variété de manuels scolaires et de cahiers d'apprentissages qui explorent ces concepts. Citons notamment Chartré et Levert (2008 : p. 7-11, 14-15, 20-25), Escrivá, Gagnon et Richer (2012 : p. 3-11) et Meyer et Kinnard (2015 : p. 4-5, 13-17). Nous recommandons également la lecture d'autres textes de vulgarisation (Corniou, 2012; Huet, 2015; Santini, 2015), au choix de l'enseignante ou l'enseignant.

Nous croyons dans tous les cas que le travail devrait demander à l'élève tout au plus 30 minutes de lecture. Il reçoit son devoir à la fin de la 1^{re} période (et pas avant), c'est-à-dire après la démonstration par l'enseignante ou l'enseignant du concept de gravité selon Einstein.

4.1.5 MATÉRIEL NÉCESSAIRE LORS DE L'ANALYSE QUANTITATIVE ET GRAPHIQUE (2^E PÉRIODE)

Le matériel numérique nécessaire à l'élève lors de la passation de la SAÉ inclut l'accès à deux bases de données interactives en Astronomie disponibles sur internet (Exoplanet Database, 2016; Indiana University, 2016) et la possibilité de lire et de compléter un fichier de traitement de texte de type *Word*TM (Annexe E, p. 99). Il est important que l'élève ait accès à ces deux ressources *en même temps*.

Si l'élève a accès à internet, alors cela peut se faire sur un ordinateur de bureau (laboratoire informatique), un ordinateur portable ou une tablette numérique (en classe), en autant que l'accès à internet soit disponible en même temps que le logiciel de traitement de texte de type *Word*.

Dans le cas spécifique où le corps enseignant préfère utiliser l'application iPad *Exoplanet* (Rein, 2014) comme base de données astronomique, plutôt que celle disponible en ligne, il va de soi que la dite-application soit installée par les services techniques de l'école avant le début de la 2^e période de la SAÉ, de même que l'application *Word* pour iPad (ou *Word* sur un autre appareil). Ce qui compte encore une fois, c'est que l'accès à la base de données interactive soit disponible à l'élève *en même temps* que le traitement de texte.

4.1.6 QUESTIONNER DEUX BASES DE DONNÉES INTERACTIVES EN ASTRONOMIE (2^E ET 3^E PÉRIODES)

Les 2^e et 3^e périodes joignent deux activités : une première activité au cours de laquelle l'élève questionne deux bases de données interactives afin de répondre à des questions de nature astronomique (cette section 4.1.6; durée d'environ 90 minutes), et une seconde pendant laquelle l'élève tente de prédire l'habitabilité d'exoplanètes récemment découvertes (section suivante 4.1.8, p. 54; durée d'environ 30 minutes).

La base de données interactive des planètes extrasolaires est disponible gratuitement en ligne (Exoplanet Database, 2016) et sur l'iPad (Rein, 2014), de même que le simulateur qui estime

la température moyenne à la surface d'une exoplanète (Indiana University, 2016). Cet unique fichier électronique simplifie la vie à tous et à toutes : l'élève s'en sert pour recevoir sa SAÉ, exécuter sa SAÉ, être évalué, et informer ses parents sur la qualité de son travail. Ce document électronique est transmis par courriel ou par le réseau interne de l'école, sur Moodle ou toute autre plateforme, selon les choix informatiques du milieu. Si l'élève est guidé pas à pas dans ce processus au début de la SAÉ, il est laissé à lui-même au fur et à mesure que la SAÉ progresse. L'élève doit maîtriser les outils d'analyse de la base de données interactive pour répondre à des questions de nature astronomique, dont certaines sont présentées sous forme de défis (stimulation additionnelle pour les élèves doués). Le document de l'élève est disponible à l'Annexe E (p. 99) et le corrigé à l'Annexe F (p. 110).

4.1.7 QUESTIONNER L'ENCYCLOPÉDIE DES PLANÈTES EXTRASOLAIRES (1^{RE} ACTIVITÉ DES 2^E ET 3^E PÉRIODES)

Dans un premier temps, il est demandé à l'élève de questionner l'*Encyclopédie des Planètes Extrasolaires* (Exoplanet Database, 2016) dans le but de prédire le temps que prend une planète à faire le tour de son étoile (« *Orbital Period* ») en fonction de la distance moyenne de cette planète avec l'étoile (« *Semi-Major Axis* »; Figure 24, p. 111). La relation est positive et d'un grand pouvoir prédictif : plus une exoplanète en effet est située loin de son étoile, plus elle a besoin de temps pour y effectuer une révolution complète. Les exceptions (les points les plus éloignés de la régression linéaire) sont intéressantes à expliquer. La réponse à cette question est donnée à l'élève afin qu'il puisse confirmer dès le début de la SAÉ qu'il est capable de questionner correctement la base de données interactive. Toutefois, les réponses aux autres questions ne lui sont pas fournies, et ces questions contribuent à l'évaluation globale de l'élève (une évaluation par équipe).

À la Figure 25 (p. 112), l'élève tente de prédire la température d'une étoile en fonction de sa masse : plus l'étoile est massive, et plus sa température de surface est élevée.

Similairement, il est demandé comment la masse d'une étoile varie en fonction de son rayon (Figure 26, p. 113). L'élève peut constater que si une étoile est massive, elle est généralement grande, mais que ce n'est pas toujours le cas : en effet, il semble y avoir une masse maximale pour les étoiles, au-delà de laquelle elles grossissent plus vite que leurs masses (en haut à droite de la Figure 26).

À la Figure 27 (p. 114), il faut prédire à l'aide d'un diagramme à bandes la probabilité de trouver une exoplanète d'une certaine masse : l'élève y trouve que la grande majorité des exoplanètes découvertes à ce jour sont grosses comme Neptune (les « super-Terres ») ou comme Jupiter (les planètes gazeuses). Les exoplanètes de taille similaire à la Terre sont plutôt rares. Est-il possible que les petites exoplanètes soient plus difficiles à détecter?

La Figure 28 (p. 115) répond à cette question. Il est demandé à l'élève de présenter le rayon d'une planète en fonction de son année de découverte : on y voit que, si les premières exoplanètes découvertes avant l'an 2008 étaient grosses comme Jupiter, celles découvertes par la suite sont en moyenne beaucoup plus petites.

La question à la Figure 29 (p. 117) est complexe : l'élève tente de prédire à l'aide d'un diagramme à points l'excentricité des planètes (« *Orbital Eccentricity* ») en fonction de la distance moyenne avec son étoile (« *Semi-Major Axis* »). De cette analyse, on trouve trois éléments de réponse : 1) la très grande majorité des exoplanètes ont une excentricité très près de 0, c'est-à-dire qu'elles tournent autour de leurs étoiles avec une orbite formant un cercle presque parfait; 2) en revanche, certaines exoplanètes ont une excentricité très élevée, c'est-à-dire que leur orbite forme une ellipse et un côté de cette orbite elliptique est située très proche de son étoile; 3) les astronomes n'ont pas trouvé d'exoplanètes présentant à la fois une excentricité élevée ($> 0,5$) et une petite distance de son étoile ($< 0,3$ unité astronomique; en haut à gauche de la Figure 29). L'élève sera ainsi dirigé à répondre à la question complexe suivante : Pourquoi les exoplanètes excentriques proches de leur étoile n'existent pas? Le lien avec la théorie de la gravitation universelle d'Einstein est évident : la déformation de l'espace causée par la masse énorme de l'étoile favorise l'exoplanète excentrique à s'écraser sur cette étoile! Les réponses des élèves à cette question sont disponibles en Annexe L (p. 138).

Finalement, l'élève fort pourra répondre à une question optionnelle qui relève toutefois du défi (Figure 30, p. 118) : prédire à l'aide d'un diagramme à points comment la masse d'une étoile (« *Mass of a host star* ») affecte la distance moyenne entre celle-ci et son exoplanète (« *Semi-Major Axis* »). Il lui est demandé par la suite de relier ce résultat à la théorie de la gravité d'Einstein. Les points rougeâtres en haut à droite de la Figure 30 suggèrent que les Soleils relativement très lourds ont tendance à interagir avec des orbites éloignées; inversement, les exoplanètes très proches de leur étoile ont tendance à orbiter autour d'étoiles est très légères. La théorie d'Einstein prédit que les exoplanètes trop proches d'étoiles géantes finissent par s'écraser sur leur Soleil; ces exoplanètes ne survivraient pas longtemps à l'échelle cosmique. C'est exactement ce que nous voyons à la Figure 30.

4.1.8 QUESTIONNER UN SIMULATEUR QUI ESTIME LA TEMPÉRATURE MOYENNE À LA SURFACE D'UNE EXOPLANÈTE – DÉTERMINER L'HABITABILITÉ (2^E ACTIVITÉ DE LA 3^E PÉRIODE)

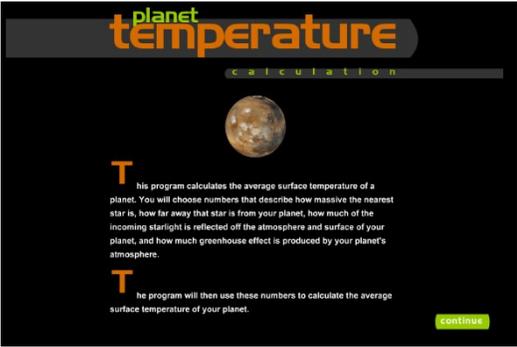
La deuxième activité de la 3^e période exige de l'élève qu'il fabrique virtuellement une exoplanète habitable (Figure 1a, p. 56) et cette activité dure environ 30 minutes. À cet effet, l'élève utilise le site internet du Département d'Astronomie de l'Université d'Indiana (Indiana University, 2016). Il est à noter que ce site requiert le logiciel *Adobe Flash Player™* de *Macromedia*, qui ne fonctionne habituellement pas dans l'environnement *IOS™* ou *Android™* des tablettes numériques. Il faut donc pour cette partie de la SAÉ utiliser un ordinateur de bureau ou portable. Nous sommes toujours à la recherche d'une alternative en faveur des tablettes numériques pour cette partie de la SAÉ.

L'élève doit mesurer l'effet de la masse de l'étoile et l'effet de la distance étoile-planète sur la température d'une exoplanète réelle (Indiana University, 2016). Pour cela, l'élève contrôle dans ce simulateur professionnel quatre variables : la masse de l'étoile en unité solaire (Figure 1b), la distance entre l'exoplanète et l'étoile en unité astronomique (Figure 1c), l'effet Albédo qui indique la quantité d'énergie solaire qui est reflétée dans l'espace en valeurs variant de 0 (toute l'énergie solaire est absorbée par l'exoplanète) à 100 (toute l'énergie solaire est reflétée dans l'espace; Figure 1d), et enfin l'effet de serre qui varie quantitativement entre 0 et 500, pour une

planète Terre de 1 (Figure 1e). Par la suite, l'élève peut réviser ses valeurs pour les quatre variables avant de demander à l'application de calculer la température moyenne de l'exoplanète qu'il vient de créer (Figure 1f). L'application affiche la température moyenne de l'exoplanète en degrés Kelvin, Celsius et Fahrenheit, en plus d'offrir quelques observations de base sur l'habitabilité de l'exoplanète qui a été conçue et la durée de vie de cette étoile (Figure 1g).

Le site de l'Université d'Indiana indique en ordre d'importance les facteurs qui déterminent la température moyenne d'une exoplanète. Par exemple, la masse du Soleil est de loin le facteur qui prédit le mieux la température moyenne, suivie de la distance étoile-planète, de l'effet Albédo pour terminer, comme variable beaucoup moins importante, l'effet de serre. Une stratégie serait de comparer la température moyenne de la planète Terre (masse solaire de 1, distance de 1 UA, effet Albédo de 29 et effet de serre de 1), avec celle d'une même Terre, mais dont une seule variable est doublée à la fois. Par exemple, il peut s'agir d'un Soleil deux fois plus massif (masse solaire de 2, distance de 1 UA, effet Albédo de 29 et effet de serre de 1). Dans le premier système solaire, la température moyenne de la Terre est de 15 °C (notre planète telle que nous la connaissons), alors que dans le second système, la même Terre est chauffée à... 211 °C! Un second scénario est de diviser la distance en deux (masse solaire de 1, distance de 0,5 UA, effet Albédo de 29 et effet de serre de 1); la température pour cette Terre augmente à 134 °C! Si l'on double la quantité de rayons solaires qui pénètrent l'atmosphère (masse solaire de 1, distance de 1 UA, Albédo de 14.5 et effet de serre de 1), la température de cette Terre augmente à 28 °C! Finalement, si l'on double l'effet de serre (masse solaire de 1, distance de 1 UA, effet Albédo de 29 et effet de serre de 2), la température atteint seulement 34 °C! Il est donc clair que le facteur le plus important qui prédit la température d'une planète est de loin la masse de son Soleil, le deuxième facteur étant la distance étoile-planète, et enfin les deux derniers facteurs qui sont à peu près équivalents (effet Albédo et effet de serre).

Nous croyons qu'il est préférable de ne pas révéler cette information aux élèves, et de les laisser découvrir par eux-mêmes l'importance relative des facteurs qui déterminent l'habitabilité d'une planète. Cette dimension de la valeur relative des facteurs qui affectent l'habitabilité d'une planète pourrait être associée à une question d'évaluation. Ces facteurs qui ont un effet sur la zone habitable d'un système solaire font parties des concepts prescrits par le Ministère de l'Éducation pour les élèves du secondaire (Gouvernement du Québec, 2010*b*, 2011*b*).

a) 

b) 

c) 

d) 

e) 

f) 

g) 

Figure 1. a) Page d'accueil du simulateur en ligne du Département d'Astronomie de l'Université d'Indiana qui estime la température moyenne à la surface d'une exoplanète. Le simulateur permet de définir b) la masse de l'étoile, c) la distance planète-étoile, d) l'effet Albédo et e) l'effet de serre. f) Il est possible de modifier plusieurs paramètres sur une même page. g) Calcul de la température moyenne de l'exoplanète créée par l'élève.

4.1.9 ÉVALUATION DES SAVOIRS ET DES COMPÉTENCES DE L'ÉLÈVE (4^E PÉRIODE)

La quatrième période est utilisée pour évaluer les savoirs et les compétences de l'élève. Cette évaluation est présentée à l'Annexe G (p. 125; questions #5 à 10); les questions #1 à 4 ont peu d'intérêt, car elles servaient seulement à comparer les savoirs des élèves avant versus après l'exécution de notre SAÉ. Ici, nous cherchons à évaluer :

- Les savoirs en lien avec les concepts prescrits par le Ministère de l'Éducation, notamment les *Conditions favorables au développement de la vie* (Gouvernement du Québec, 2010b, 2011b). L'élève doit pouvoir déterminer quelles sont ces conditions favorables en général et expliquer quel facteur en particulier (parmi tous ceux identifiés) est le plus important pour prédire l'habitabilité d'une exoplanète;
- Capacité de l'élève à questionner une base de données interactive en Astronomie. Il sera possible d'évaluer l'élève à ce niveau en mesurant la justesse de ses analyses;
- Capacité de l'élève à interpréter une relation quantitative et graphique entre deux variables scientifiques permettant de tirer des conclusions;
- Expliquer ce qu'est la Théorie de la Relativité Générale d'Albert Einstein;
- Déterminer comment la gravité affecte l'habitabilité des planètes extrasolaires. Pour répondre à cette question, l'enseignante ou l'enseignant affiche à la 4^e période une courte simulation-vidéo en mode continue qui illustre un système solaire à trois étoiles. Même s'il s'agit d'une simulation-vidéo, ce système multi-solaire est réel et existe bel et bien dans notre galaxie; il s'appelle KID5653126 (choisir KID5653126 – CASE 2 sur le site web exceptionnel de Müller et Haghhighipour (2014, 2015). La vie extraterrestre est-elle possible dans un tel système à trois Soleils?

Les grilles d'évaluation des compétences disciplinaires et des compétences transversales sont discutées à la section 3.2.8 (p. 38).

4.2 ÉLÉMENT DÉCLENCHEUR : LES PLANÈTES EXTRA-SOLAIRES ET LA PROBABILITÉ DE VIE EXTRATERRESTRE

Nous avons préparé une présentation Power Point™ d'une dizaine de diapositives afin de susciter chez l'élève un intérêt sur l'importance des questions posées au sein de ce laboratoire (Annexe B, p. 83). À cela s'est ajoutée une vidéo de nature journalistique concernant la découverte spectaculaire de l'exoplanète Kepler 452b en juillet 2015 (TVA Nouvelles, 2015). Cette nouvelle a été incorporée à même la présentation Power Point.

4.3 DOCUMENTS DU PERSONNEL ENSEIGNANT ET DE L'ÉLÈVE

Nous proposons à l'enseignante ou l'enseignant d'utiliser le document à l'Annexe C (p. 92) lors du laboratoire-démonstration qui présente le simulateur de gravité à la 1^{re} période. L'élève obtient un devoir de lecture après cette démonstration (Annexe D, p. 94). Lors de la 2^e période, l'élève utilise le document à l'Annexe E (p. 99); le corrigé de ce travail en équipe est disponible à l'Annexe F (p. 110). Les fichiers électroniques de la présente SAÉ sont disponibles au corps enseignant sur *Google Drive* à l'adresse internet suivante :

https://drive.google.com/open?id=0B_ZPD9bwVYiIWk81cm90aHVlcG8.

Il est possible également de contacter l'auteur (alain.houle@gmail.com).

4.4 ÉVALUATION DES SAVOIRS ET APPRÉCIATION DU LABORATOIRE

Le questionnaire concernant les savoirs avant le début de la SAÉ est disponible à l'Annexe A (p. 81), celui à la toute fin de la SAÉ à l'Annexe G (p. 125), et enfin le questionnaire d'appréciation par l'élève du laboratoire-démonstration et de la SAÉ en général à l'Annexe H (p. 129). Si nous avons à réécrire le questionnaire d'appréciation, il serait préférable d'éviter de débiter nos questions par « Crois-tu que... » jumelées avec une échelle de satisfaction. À la place, nous pourrions plutôt y inscrire une échelle d'accord ou d'intensité (pas du tout, peut-être, ne sais pas, tout à fait, etc.). Bien que la nature de l'échelle ait pu provoquer un biais, nous croyons néanmoins que ce biais est négligeable.

4.5 ANALYSE STATISTIQUE

Nous avons passé deux questionnaires des savoirs aux trois groupes d'élèves, soit un questionnaire au tout début de la 1^{re} période avant même de parler du laboratoire comme tel et de ses objectifs, et un second questionnaire des savoirs à la toute fin de la 3^e période dans le but de mesurer les progrès faits par l'élève après le laboratoire-démonstration. Il est à noter que le premier comprenait cinq questions : deux sur la vie d'Einstein, deux sur ses théories scientifiques, et une dernière qui demandait à l'élève d'expliquer ce qu'elle ou il comprend de la théorie de la gravité d'Einstein. Le second questionnaire comprenait les mêmes cinq questions, réparties au sein de 10 questions au total. Notre but était de déterminer si notre laboratoire, en particulier la démonstration à l'aide du simulateur de gravité, permettait à l'élève –sans explication théorique préalable telle une enseignante ou un enseignant le ferait lors d'un cours de type magistral– de mieux connaître Albert Einstein, et surtout d'évaluer si l'élève était en mesure de mieux expliquer ce qu'est la Théorie de la Relativité Générale après versus avant le laboratoire-démonstration. Puisque nous avons privilégié une analyse statistique pour échantillons appariés, cinq questionnaires des savoirs ont dû être retirés de l'analyse parce que l'un des deux questionnaires manquait (l'élève était absent lors de la passation du premier ou du second questionnaire). Nous avons pu ainsi comparer les savoirs acquis lors de notre laboratoire auprès de 82 élèves répartis en trois groupes enrichis de 5^e secondaire (17 ans).

Les quatre premières des cinq questions des savoirs que nous avons soumises aux élèves tant au début qu'à la fin du laboratoire étaient à choix multiples, alors que la cinquième était une question à développement (questions #1 à #5 à l'Annexe A, p. 81; questions #1 à #4 et #9 à l'Annexe G, p. 125). La question #1 demandait de nommer la discipline scientifique dans laquelle Albert Einstein a fait ses recherches. Si l'on recode les réponses en fonction, d'une part, que l'élève ne savait pas ou qu'il a inscrit une mauvaise réponse, et d'autre part, que l'élève a donné une bonne réponse, il apparaît qu'un apprentissage ait été atteint pour cette question (Figure 2). Un tiers des élèves en effet ne savait pas ou a inscrit une mauvaise réponse à cette question avant l'exécution du laboratoire; cette proportion a diminué de manière significative à 4% après le laboratoire (*Test Q de Cochran pour échantillons appariés* = 20,57, *DF* = 1, *P* = 0,000006; Figure 2).

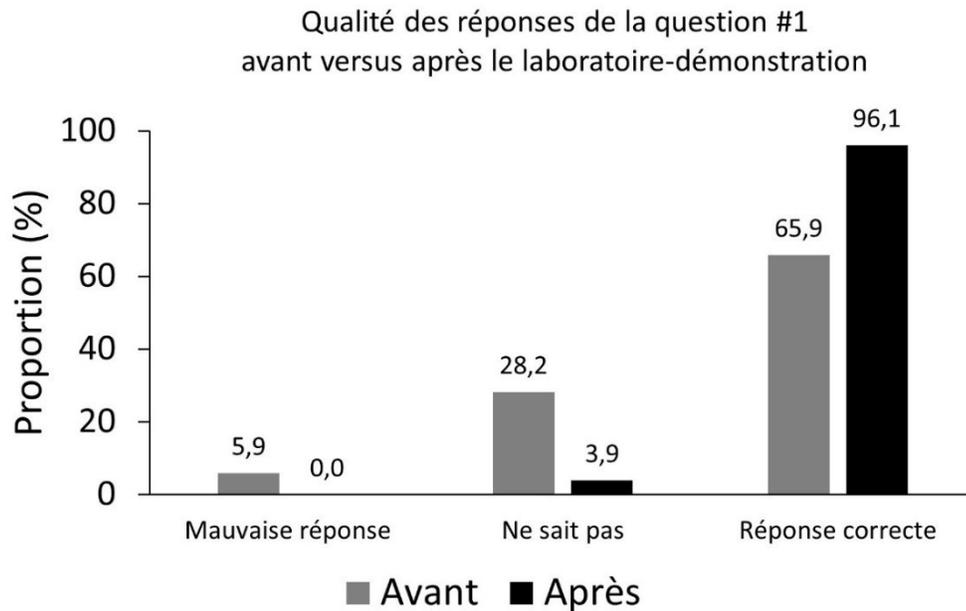


Figure 2. Valeur pédagogique du laboratoire-démonstration dans les apprentissages de la question #1 : *Einstein était un homme de science. Quel métier pratiquait-il?* $N = 77$ élèves qui ont répondu à cette question sur les deux questionnaires (avant et après le laboratoire-démonstration).

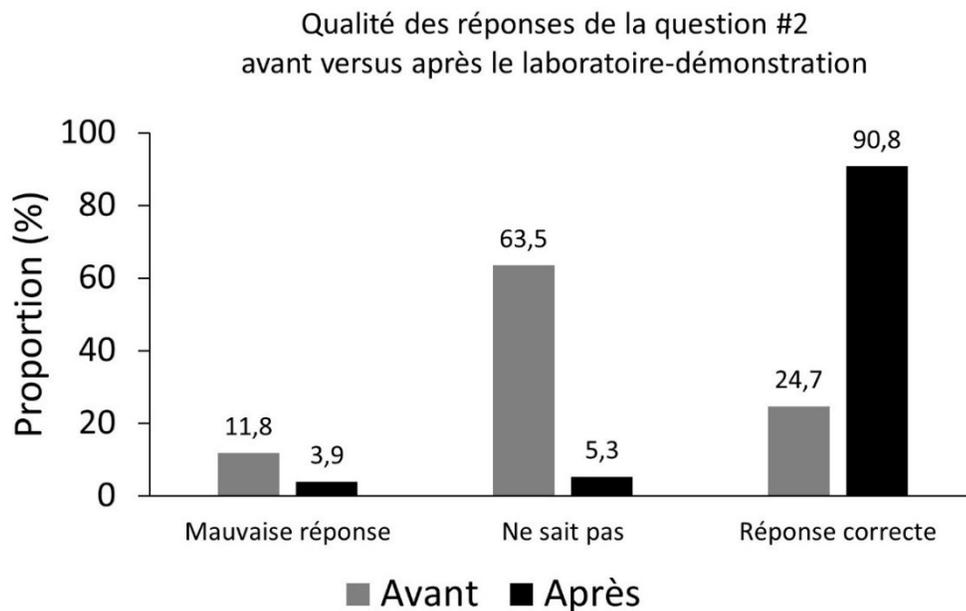


Figure 3. Valeur pédagogique du laboratoire-démonstration dans les apprentissages de la question #2 : *Einstein a redéfini les travaux d'un grand scientifique. De qui s'agit-il?* $N = 76$ élèves qui ont répondu à cette question sur les deux questionnaires (avant et après le laboratoire-démonstration).

La question #2 demandait à l'élève d'indiquer le grand scientifique dont Albert Einstein a redéfini les travaux. Nous constatons qu'un apprentissage a été atteint entre la passation des deux questionnaires (Figure 3). En effet, plus de 75% des élèves ne savaient pas ou ont inscrit une mauvaise réponse avant l'exécution du laboratoire; cette proportion a diminué de manière significative à moins de 9% après le laboratoire (*Test Q de Cochran pour échantillons appariés* = 50,07, *DF* = 1, *P* = $1,48 \times 10^{-12}$; Figure 3).

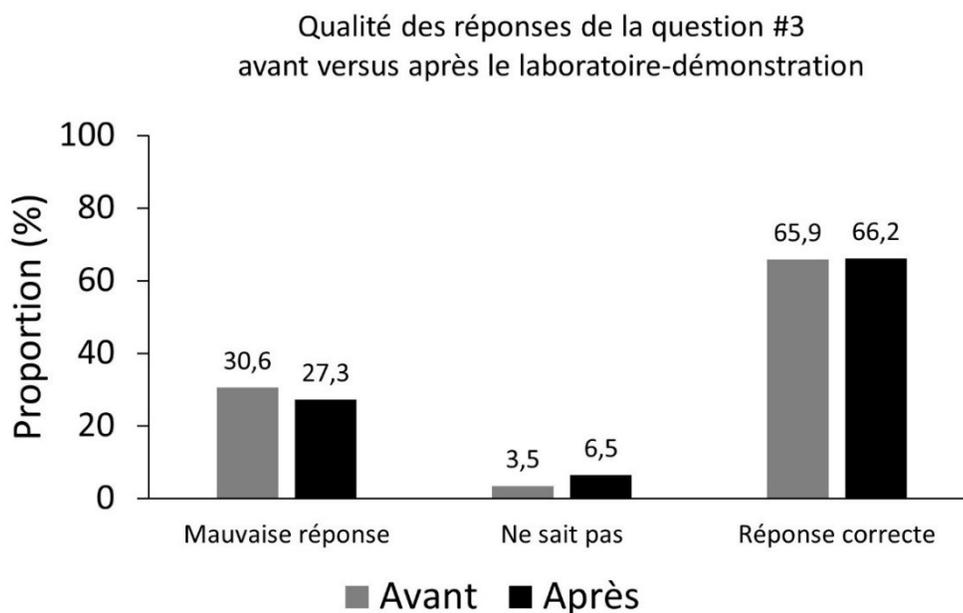


Figure 4. Valeur pédagogique du laboratoire-démonstration dans les apprentissages de la question #3 : *Selon toi, laquelle des théories d'Einstein est la plus connue du grand public?* *N* = 77 élèves qui ont répondu à cette question sur les deux questionnaires (avant et après le laboratoire-démonstration).

La question #3 demandait à l'élève laquelle des théories d'Einstein, dans la liste fournie, était la plus connue du grand public (Figure 4). Puisqu'il s'agit sans nul doute de sa théorie sur l'équivalence entre l'énergie et la masse de la matière (sa fameuse équation $e = mc^2$), le fait que notre laboratoire portait sur la Théorie de la Relativité Générale (sa théorie de la gravité) a contribué d'une certaine façon à confondre les élèves. En effet, si les deux tiers des élèves avaient obtenu une bonne réponse avant l'exécution du laboratoire, cette proportion n'a pas bougé une fois

le laboratoire terminé (*Test Q de Cochran pour échantillons appariés* = 0,00, *DF* = 1, *P* = 1,00; Figure 4). Cela était attendu puisque nous n'avons pas discuté de la théorie d'Einstein sur l'énergie et la matière ($e = mc^2$) pendant toute la durée de la SAÉ.

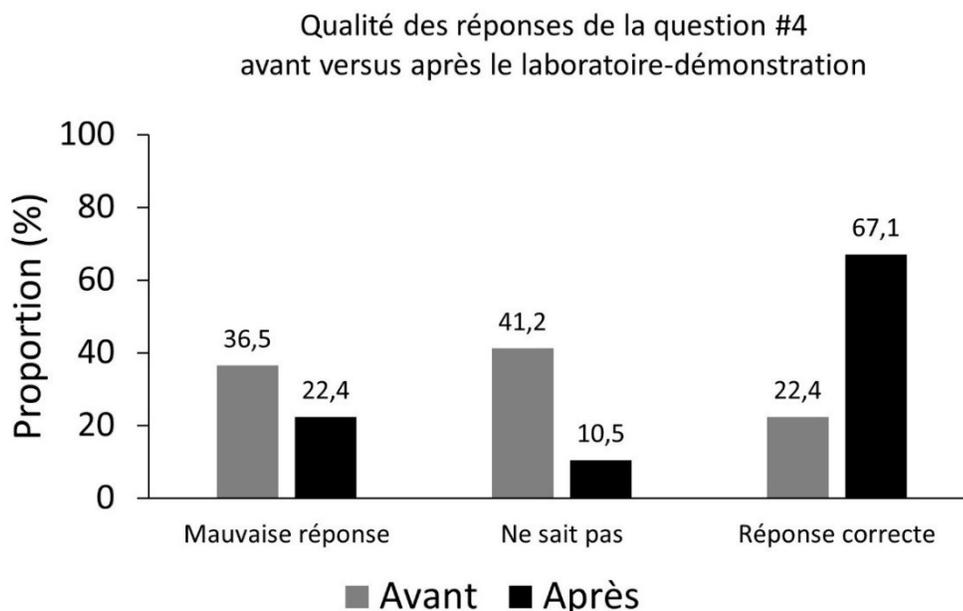


Figure 5. Valeur pédagogique du laboratoire-démonstration dans les apprentissages de la question #4 : *Selon toi, laquelle de ses théories est considérée comme étant la plus importante par les scientifiques (autant à son époque que ceux contemporains)?* *N* = 76 élèves qui ont répondu à cette question sur les deux questionnaires (avant et après le laboratoire-démonstration).

Ce ne fut pas le cas de la question #4 qui demandait cette fois-ci laquelle des théories d'Einstein est considérée comme étant la plus importante par les scientifiques, autant à son époque que ceux contemporains (Figure 5). Le fait que le laboratoire portait spécifiquement sur une démonstration de la Théorie de la Relativité Générale –à l'aide du simulateur de gravité– a probablement contribué à diminuer de moitié la proportion d'élèves qui ne savait pas ou qui avait inscrit une mauvaise réponse, et de tripler la proportion d'élèves qui a répondu correctement à cette question après l'exécution du laboratoire-démonstration (*Test Q de Cochran pour échantillons appariés* = 25,33, *DF* = 1, *P* = $4,84 \times 10^{-7}$; Figure 5).

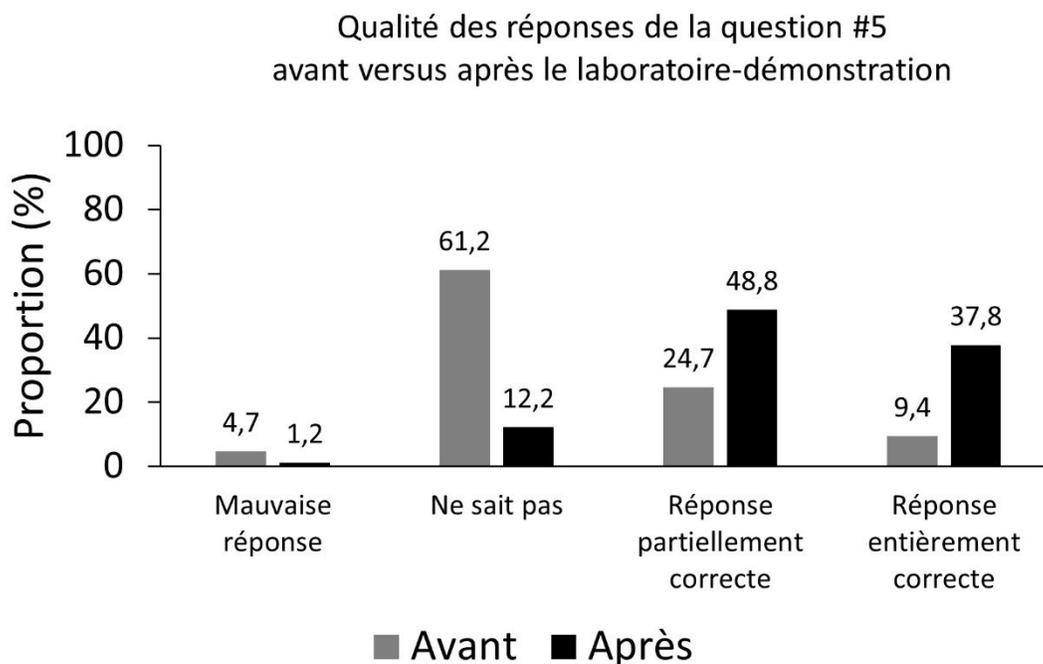


Figure 6. Valeur pédagogique du laboratoire-démonstration dans les apprentissages de la question #5 : *La Théorie de la Relativité Générale d'Albert Einstein porte également le nom de théorie de la gravité. Décrire dans tes mots ce que tu connais de cette théorie. Si tu ne la connais pas, l'indiquer.* $N = 82$ élèves qui ont répondu à cette question sur les deux questionnaires (avant et après le laboratoire-démonstration).

La question des savoirs #5 était de loin la plus importante. Nous avons demandé à l'élève d'expliquer dans ses mots la théorie de la gravité d'Einstein, en leur donnant l'indice que cette théorie porte également le nom de théorie de la gravité (Figure 6). Les deux tiers des élèves ont indiqué avant l'utilisation du simulateur de gravité qu'ils et elles n'en avaient aucune idée et près de 5% ont indiqué une mauvaise réponse; de plus, environ 25% des élèves ont inscrit une réponse que nous avons qualifiée de « partiellement correcte », en ce sens que l'élève référait sa réponse à la théorie de Newton (la gravité en tant que force) et non la théorie d'Einstein (la gravité en tant que déformation de l'espace). Après le laboratoire-démonstration, la proportion qui a mal répondu a diminué d'un facteur 4 (de 4,7 à 1,2%), la proportion qui ne savait rien de cette théorie a diminué d'un facteur 5 (de 61,2 à 12,2%), celle qui a répondu d'une manière partiellement correcte a doublé (de 24,7 à 48,8%) et enfin celle qui a offert une réponse entièrement correcte (i.e., que l'élève a

clairement identifié la déformation de l'espace comme explication de la gravité) a quadruplé (de 9,4% à 37,8%). Ces différences sont hautement significatives sur le plan statistique (*Test Q de Cochran pour échantillons appariés* = 37,74, $DF = 1$, $N = 82$, $P = 8,11 \times 10^{-10}$).

Nous avons également tenu à la toute fin de la 3^e période la passation d'un questionnaire d'appréciation du laboratoire à l'aide des échelles de Likert (Annexe H, p. 129). Au total, 87 élèves y ont répondu. Une analyse de l'indice de Cronbach démontre que les questions #3, #5 et #11 devraient être retirées du questionnaire, ce qui a permis d'augmenter l'indice de 0,781 à 0,807. Les résultats de toutes les questions d'appréciation du laboratoire sont présentés au Tableau 4 (p. 65).

L'appréciation globale de notre laboratoire s'élève en moyenne à 3,3 sur 4, et les trois groupes que nous avons visités ne diffèrent pas dans cette évaluation (ANOVA, $F_{2,85} = 0,18$, $P = 0,834$). Lorsque nous avons examiné séparément les trois questions que nous avons retirées de cette analyse, nous avons constaté que les élèves ont particulièrement apprécié le simulateur de gravité lors de la démonstration (question #3, Figure 45 : p. 136), avec un score presque parfait de 3,9 sur 4, que l'utilisation de l'ordinateur portable n'a pas augmenté particulièrement leur intérêt face au laboratoire (3,1 sur 4), mais que mes explications et mes consignes étaient toutefois en général claires (3,5 sur 4). Le score le plus faible (et par conséquent qui suggère une amélioration de notre laboratoire) touche le fait que l'utilisation de l'ordinateur portable n'a que peu aidé les élèves à comprendre la théorie de la gravité d'Einstein (2,6 sur 4), ce qui était attendu considérant que l'utilisation des ordinateurs portables en classe avait pour but d'analyser la variabilité des planètes extrasolaires (et la probabilité d'y trouver de la vie), et non en fonction de mieux enseigner la théorie de la gravité d'Einstein. Nous considérons essentiel de noter que les élèves ont conclu avoir appris quelque chose dans ce laboratoire, avec un score moyen de 3,4 sur 4.

Les réponses des élèves ont été analysées pour voir les effets d'apprentissage, notamment la question 6 *Défi* de leur cahier (Annexe E, p. 99), question qui demandait à l'élève de faire le lien entre l'excentricité des exoplanètes et la théorie de la gravité d'Einstein (Annexe L, p. 138). Seulement neuf équipes de deux élèves ont eu assez de temps et ont pu répondre à cette question. Six équipes ont répondu correctement (2 points sur 2), deux équipes partiellement correctement (1 point sur 2) et une seule n'aurait obtenu aucun point à cette question. Cela démontre que les élèves, en leur donnant le temps et les moyens qu'ils ont besoin, apprennent et peuvent répondre correctement à une question scientifique complexe.

Tableau 4. Appréciation de la SAÉ par les élèves (valeur maximale de 4).

Question d'appréciation	Moy.	Min	Max	Erreur-type ¹	Écart-type ²	N
Question #1 : Comment as-tu apprécié ce laboratoire dans son ensemble?	3,33	2	4	0,07	0,62	86
Question #2 : Crois-tu que ce laboratoire fût trop complexe pour des élèves de ton âge? ⁴	3,09	1	4	0,09	0,87	87
Question #3 : Crois-tu que le laboratoire-démonstration (avec structure élastique et boules de quille) rende le laboratoire plus intéressant?	3,90	2	4	0,04	0,38	86
Question #4 : Crois-tu que cette démonstration t'ait aidé à mieux comprendre la théorie de la gravité d'Einstein?	3,30	1	4	0,09	0,87	86
Question #5 : Crois-tu que l'utilisation d'un ordinateur rende le laboratoire plus intéressant?	3,08	0	4	0,10	0,88	86
Question #6 : Crois-tu que l'utilisation d'un ordinateur t'ait aidé à mieux comprendre cette théorie d'Einstein?	2,58	1	4	0,10	0,88	87
Question #7 : Crois-tu que l'utilisation d'une base de données interactive sur internet rende le laboratoire plus intéressant?	3,28	1	4	0,09	0,82	86
Question #8 : Crois-tu que l'utilisation de cette base de données interactive t'ait aidé à mieux comprendre les conséquences de la théorie d'Einstein?	2,73	1	4	0,10	0,93	86
Question #9 : Considères-tu que la matière vue pendant ce laboratoire fût intéressante?	3,44	2	4	0,07	0,62	87
Question #10 : As-tu l'impression générale d'avoir appris quelque chose pendant ce laboratoire?	3,44	2	4	0,07	0,64	87
Question #11 : Est-ce que les explications et les consignes de l'enseignant furent claires et assez précises?	3,50	2	4	0,07	0,61	87

¹ *Standard Error of the Mean*

² *Standard Deviation*

⁴ La SAÉ a été testée en mai 2016 grâce à la générosité du Collège Jean de la Mennais (La Prairie, Québec), de la collaboration exceptionnelle de son département des sciences, et de la participation remarquable des élèves de trois groupes enrichis inscrits en 5^e secondaire au cours à option *Techniques et Méthodes en Science*. Les élèves étaient âgés en moyenne de 17 ans.

Il est important de mettre en lumière les limites de nos résultats. En effet, ils sont centrés sur le fait que nous voulions au départ mettre ensemble trois stratégies pédagogiques dans le but d'augmenter la qualité de notre enseignement et ainsi améliorer la compréhension par l'élève de la Théorie de la Relativité Générale d'Albert Einstein, une théorie particulièrement complexe. À cette fin, nous avons fait le choix de mettre en collaboration le laboratoire-démonstration, la pédagogie de l'intégration et l'environnement numérique.

Notre étude est particulièrement limitée concernant la valeur pédagogique de l'utilisation de l'environnement numérique en science au secondaire. En effet, notre objectif principal de tester la valeur pédagogique du laboratoire-démonstration exigeait que l'élève demeure motivé malgré la complexité de la tâche (l'activité a duré deux périodes complètes de 75 minutes chacune et impliquait le questionnement d'une base de données interactive en astronomie de niveau universitaire). Toutefois, nous avons gagné notre pari en ce sens que l'élève a perçu que l'environnement numérique l'a aidé à rendre la situation d'apprentissage plus intéressante (Tableau 4 : Question #5), même si cet environnement ne l'a pas aidé à mieux comprendre la théorie d'Einstein (Tableau 4 : Question #6).

Si notre étude a testé de façon convaincante la valeur pédagogique du laboratoire-démonstration, il est moins sûr qu'elle prouve la validité de la pédagogie de l'intégration. Toutefois, même si nous n'avons pu tester de façon empirique la valeur pédagogique de l'intégration, nous pouvons néanmoins conclure que l'élève n'a pas été intimidé et il a volontiers relevé le défi de travailler sur une théorie particulièrement complexe. De plus, si l'élève a été sondé sur sa perception de ses propres apprentissages (Tableau 4), ce qui n'a pas permis de tester la valeur pédagogique de l'intégration, nous en convenons, cet élève a néanmoins été mesuré quantitativement sur ses nouveaux savoirs, notamment sur la théorie de la gravité d'Einstein (Figure 6). En effet, avant la situation d'apprentissage, 66% des élèves ont répondu ne pas connaître ou ont donné une mauvaise réponse concernant la théorie einsteinienne de la gravité, alors que 87% ont donné une réponse partiellement ou entièrement correcte après l'activité. En somme, nous croyons que notre étude aura tout au moins réussi à tester quantitativement une prémisse importante de la pédagogie de l'intégration : l'élève apprend mieux à travers une tâche complexe (Roegiers, 2004, 2005, 2010c).

DISCUSSION ET CONCLUSION

Bien que notre projet comprît deux parties relativement différentes, l'une présentant la théorie de la gravité d'Einstein et l'autre la découverte des exoplanètes habitables et les chances que l'humanité y découvre une vie extraterrestre, nous nous sommes intéressés beaucoup plus au premier volet qu'au second. Cela était dû au fait que 1) la gravité est un concept prescrit par le MELS aux niveaux de la 1^{re}, 2^e, 3^e et 5^e secondaire, 2) nous étions enthousiasmés à l'idée de quantifier la valeur pédagogique du laboratoire-démonstration lors de l'enseignement d'un concept scientifique (les élèves apprennent-ils lors d'une démonstration?), 3) nous admettons être fascinés par la carrière scientifique (et la vie personnelle) d'Albert Einstein, et 4) nous voulions relever le défi d'enseigner avec succès une théorie scientifique complexe. Cela a été d'autant plus important parce qu'il est vrai que la Théorie de la Relativité Générale est complexe et par conséquent un défi à enseigner (Hentschel and Hentschel, 1998; Einstein, 2002; Scientific American, 2015), Cette explication de la gravité par Einstein est réputée comme étant particulièrement complexe autant par les communautés scientifiques (Speziali, 1972; Einstein, 2002), biographiques (Fölsing, 1997; Isaacson, 2007), journalistiques (Scientific American, 2015) que pédagogiques (Range, 2004; Burns, 2012, 2014). À cet effet, nous avons construit un simulateur de gravité de grand format ($\emptyset = 2 \text{ m}$: Burns, 2012, 2014) et nous avons quantifié les apprentissages avant versus après la démonstration de la théorie de la gravité einsteinienne au sein de trois groupes enrichis inscrits dans un collège privé de la région de Montréal au cours à option *Techniques et Méthodes en Science* ($N = 87$). Les élèves étaient âgés en moyenne de 17 ans. Quant au programme du MELS, ce concept de la Relativité se rattache directement à celui de la gravité (Gouvernement du Québec, 2010b, c, a, 2011b).

Nous avons utilisé les découvertes spectaculaires des exoplanètes et la probabilité grandissante d'y découvrir de la vie extraterrestre comme élément déclencheur. Nous avons trouvé que le laboratoire-démonstration permettait significativement de réduire de 4,7% à 1,2% la proportion d'élèves incapables d'expliquer correctement la théorie d'Einstein et de 61,2% à 12,2% la proportion qui ne connaissait rien à cette théorie. De plus, la proportion des élèves qui ont répondu d'une manière partiellement correcte a doublé de 24,7% à 48,8% après la démonstration

et celle des élèves qui ont offert une réponse entièrement correcte a quadruplé de 9,4% à 37,8%. Nous concluons que les élèves apprennent de façon significative lors d'un laboratoire-démonstration. Bien que l'analyse de Cronbach ait suggéré le retrait de la question #3 (*Crois-tu que le laboratoire-démonstration (avec la structure élastique et les boules de quille) rende le laboratoire plus intéressant?*), il est intéressant de noter que les élèves y ont signifié que la démonstration a été le point crucial de ces apprentissages, avec un score moyen de 3,90 pour un maximum de 4 sur une échelle de Likert, le score le plus élevé de notre questionnaire. À cela s'ajoute la question #4 (*Crois-tu que cette démonstration t'ait aidé à mieux comprendre la théorie de la gravité d'Einstein?*) concernant les apprentissages de la théorie d'Einstein, question pour laquelle les élèves ont indiqué mieux comprendre le concept de gravité comme déformation de l'espace (score moyen de 3,30 sur 4).

Nos résultats sont en contradiction avec ceux de Bitsika *et al.* (2014) qui ont trouvé que les infirmières n'apprenaient pas mieux la ponction intraveineuse lorsqu'on leur en avait fait au préalable une démonstration comparativement à un deuxième groupe qui avait simplement analysé la séquence d'application et l'exécution de la méthode de ponction. Il a été suggéré que le stress de faire une erreur médicale grave était au cœur du manque d'apprentissage des infirmières (Bitsika *et al.*, 2014). Cette limite biomédicale du laboratoire-démonstration toutefois ne s'applique pas dans notre cas à l'école secondaire et les travaux de Bitsika *et al.* (2014) doivent donc être considérés ici avec précaution.

Nous nous sommes interrogés quant à savoir si la pédagogie de l'intégration, associée à l'environnement numérique, pouvait appuyer le personnel enseignant à mieux enseigner une théorie scientifique complexe, dans notre cas la théorie de la gravité d'Einstein. Comment est-il possible d'exécuter une situation d'apprentissage qui demeure intéressante et motivante pour l'élève et enrichissante sur le plan des compétences et des savoirs? Nous ne pouvons offrir une réponse de nature quantitative. Cette partie de notre étude est limitée car notre premier objectif était de mesurer quantitativement la valeur pédagogique du laboratoire-démonstration. Si la seconde partie de la SAÉ avait directement traité de la Relativité d'Einstein elle aussi, cela aurait affecté nos résultats concernant la valeur réelle de la démonstration. En effet, la question #6 (*Crois-tu que l'utilisation d'un ordinateur t'ait aidé à mieux comprendre cette théorie d'Einstein?*) et la question #8 (*Crois-tu que l'utilisation de cette base de données interactive t'ait aidé à mieux*

comprendre les conséquences de la théorie d'Einstein?) ont obtenu les scores de Likert les plus faibles de notre échantillon. Cela était attendu puisque nous avons volontairement retiré de la seconde partie de la SAÉ tout aspect qui touchait directement le sujet de la Relativité. Cela confirme que cette seconde partie de notre SAÉ n'a que très peu permis à l'élève d'enrichir ses savoirs sur la théorie de la gravité d'Einstein. Il s'agit en quelque sorte d'une erreur méthodologique; ces deux questions (#6 et #8) auraient dû en effet être retirées de notre questionnaire. Toutefois, nous avons posé une question de type *défi* à l'élève lors de la seconde partie de notre SAÉ, à savoir pourquoi les exoplanètes excentriques –celles qui ont une orbite ovale et désaxée– proches de leur étoile n'existent pas. Nous en avons profité pour demander à l'élève comment la Théorie de la Relativité d'Einstein pouvait expliquer cette absence marquée d'exoplanètes excentriques. Cette question a permis à l'élève de faire le lien entre les deux sections de notre SAÉ : les exoplanètes excentriques n'existent pas parce que les étoiles déforment tellement l'espace autour d'elles que les planètes s'écrasent sur leur soleil avec le temps.

Nous pouvons affirmer qualitativement que

1) la complexité de la question scientifique, ici la Relativité d'Einstein, est un défi pour l'élève (3,09 sur 4 sur une échelle de Likert pour la question #2 : *Crois-tu que ce laboratoire fût trop complexe pour des élèves de ton âge?*);

2) ce défi ne lui fait pas peur et il en exprime clairement son intérêt (3,33 sur 4 pour la question #1 : *Comment as-tu apprécié ce laboratoire dans son ensemble?*) et sa motivation (3,44 sur 4 pour la question #9 : *Considères-tu que la matière vue pendant ce laboratoire fût intéressante?*);

3) la complexité d'un problème scientifique dans le respect pédagogique de l'intelligence de chaque élève permet à chacun d'eux d'apprendre (Figure 6, p. 63) et d'avoir le sentiment d'avoir acquis de nouveaux savoirs (3,44 sur 4 pour la question #10 : *As-tu l'impression générale d'avoir appris quelque chose pendant ce laboratoire?*);

4) l'environnement numérique contribue à maintenir (et possiblement à augmenter) sa motivation face à la tâche (3,08 sur 4 pour la question #5 : *Crois-tu que l'utilisation d'un ordinateur rende le laboratoire plus intéressant?*);

5) l'élève augmente sa motivation à apprendre si l'information à enseigner est interactive et que l'élève obtient le plein contrôle des variables scientifiques (3,28 sur 4 pour la question #7 :

Crois-tu que l'utilisation d'une base de données interactive sur internet rende le laboratoire plus intéressant?), à la condition bien sûr que;

6) les consignes du personnel enseignant soient claires dès le départ (3,50 sur 4 pour la question #11 : *Est-ce que les explications et les consignes de l'enseignant furent claires et assez précises?*).

Notre projet d'enseigner une théorie aussi complexe que la gravité einsteinienne à des élèves de 5^e secondaire (et même aussi jeune qu'en 3^e secondaire lors de notre projet pilote un an auparavant) nous a poussé à réfléchir sur notre développement en tant que professionnel de l'enseignement (Gouvernement du Québec, 2001). En effet, nous avons choisi de présenter et d'interpréter un objet de savoirs dans l'exercice de nos fonctions (compétence #1 du Gouvernement du Québec). Nous avons été confrontés à communiquer de façon claire en tout temps, soit lors d'une démonstration publique en groupe-classe, de façon plus privée lors de la seconde partie de notre SAÉ, par écrit sur médiums électronique et papier (compétence #2), de laquelle s'est ajoutée l'intégration des technologies de l'information et des communications (compétence #8). Nous avons bien sûr conçu et piloté une SAÉ originale en fonction des élèves concernés, mais aussi en fonction du développement des compétences visées dans le programme de formation ministérielle (compétences #3 et #4). Le plus difficile aura sans nul doute été de planifier, d'organiser et d'orienter le projet en vue de favoriser au maximum l'apprentissage des élèves (compétence #6). Nous avons finalement réfléchi aux moyens à prendre afin de mieux enseigner et ainsi de s'engager dans une démarche de développement professionnel (compétence #11).

Schroeder, Scott, Tolson, Huang, Lee (2007) ont publié une méta-analyse incluant 61 études pour un total de 160 000 élèves. La question centrale demandait quelles méthodes d'enseignement ont favorisé une amélioration des apprentissages de l'élève. Les auteurs ont conclu que la meilleure stratégie consiste à produire du matériel pédagogique qui considère les expériences et les apprentissages passés de l'élève. Ce matériel doit également se rattacher au monde réel et qui impliquer des problèmes spécifiques. De plus, ils ont noté que la coopération entre les élèves favorisait les apprentissages, à la condition que cette collaboration soit encadrée par l'enseignant. Similairement à Wise (1996), les auteurs concluent qu'une bonne stratégie d'enseignement en général consiste à varier ses stratégies d'enseignement de telles sortes qu'elles

soient combinées en un tout cohérent. Ces études pourraient expliquer une partie de nos résultats. Nos élèves ont peut-être apprécié ce laboratoire, d'une part parce qu'ils ont été questionnés au préalable sur ce qu'ils savaient de la théorie de la gravité d'Einstein. La vie extraterrestre comme élément déclencheur et la complexité du laboratoire impliquant une démonstration du professeur de même que la consultation de bases de données scientifiques, et de surcroît les élèves qui devaient travailler en équipe, tous ces facteurs ont pu contribuer, de façon cumulative, à favoriser la motivation et les apprentissages des élèves.

En somme, nous concluons que la démonstration expérimentale est une stratégie pédagogique valable. L'élève apprend en observant une démonstration de nature scientifique ou professionnelle, aux conditions que celle-ci soit intéressante et que l'élève reçoive des instructions claires du corps enseignant. Nous concluons également, mais de manière qualitative seulement, que l'élève apprécie le fait d'être stimulé par des questions scientifiques complexes (tel que prédit par la pédagogie de l'intégration : Roegiers, 2000, 2004, 2005, 2010c, b, a, d, e), alors que l'utilisation de l'environnement numérique lui permet de maintenir et possiblement d'augmenter sa motivation face à ses apprentissages comme rapporté dans la littérature (Rommes et al., 2007; Marino, 2009; Keengwe et al., 2012; Keengwe and Bhargava, 2014; Liu et al., 2014; Stanhope and Corn, 2014; Thomas et al., 2014). L'association entre la pédagogie de l'intégration et l'environnement numérique permet donc au personnel enseignant d'enseigner avec plus de clarté, et permet à l'élève d'apprendre avec justesse et intérêt. La question #6 *Défi* du questionnaire (Annexe L, p. 138) en est la démonstration parfaite. Si le choix d'enseigner la théorie de la relativité einsteinienne est légitimé du fait que nous ayons pu la lier aux savoirs visés par le programme du MELS (le concept de gravité), ce choix a été rendu possible en partie parce que nous avons pu l'expérimenter auprès de groupes enrichis inscrits dans un collège privé de grande qualité. Toutefois et quoique cela reste à démontrer, nous croyons possible cette même expérimentation auprès d'élèves académiquement moins avancés (groupes réguliers, classes spéciales, troubles d'apprentissage, écoles publiques dans les quartiers économiquement défavorisés, etc.). Tout élève apprend et réussit si on lui en donne les moyens.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allaire, H. (2016) *Quelles sont les principales stratégies pédagogiques?* Montréal (Québec): Cégep Marie-Victorin (http://www.collegemv.qc.ca/CMS/Media/6145_254_fr-CA_0_Mthodes_pedagogiques_allaire_capsule.pdf)
- Arends, R.I. (2014) *Learning to teach, 10th edition*. New York. McGraw-Hill Education
- Bacon, R.A. (1992) The use of computers in the teaching of physics. *Computers & Education* 19 (1):57-66. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0360-1315\(92\)90010-3](http://dx.doi.org/10.1016/0360-1315(92)90010-3)
- Becquerel, P. (1950) La suspension de la vie au-dessous de 1/20 K absolu par démagnétisation adiabatique de l'alun de fer dans le vide les plus élevé. *C R Hebd Séances Acad Sci Paris* 231:261–263
- Bender, D.A. (1989) Combining a computer simulation with a laboratory class—The best of both worlds? *Computers & Education* 13 (3):235-243. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0360-1315\(89\)90021-3](http://dx.doi.org/10.1016/0360-1315(89)90021-3)
- Bhattacharjee, Y. (2014) Almost-Earth tantalizes astronomers with promise of worlds to come. *Science* 344:249
- Bibeau, R. (2009) *Situations d'Apprentissage et d'Évaluation (SAÉ)*. Document téléaccessible à l'adresse <<http://www.robertbibeau.ca/sae.html#1>>.
- BioDigital (2014) *BioDigital Human - Anatomy and Health Conditions in 3D!* BioDigital, Inc. Logiciel téléaccessible à l'adresse <<https://itunes.apple.com/us/app/biodigital-human-anatomy-health/id771825569?mt=8>>.
- Bitsika, E., Karlis, G., Iacovidou, N., Georgiou, M., Kontodima, P., Vardaki, Z., Xanthos, T. (2014) Comparative analysis of two venipuncture learning methods on nursing students. *Nurse Education Today* 34:15-18. doi:[doi.org/10.1016/j.nedt.2013.03.016](http://dx.doi.org/10.1016/j.nedt.2013.03.016)
- Brown, J.S., Collins, A., Duguid, P. (1989) Situated cognition and the culture of learning. *Educational Researcher* 18 (1):32-42. doi:<http://links.jstor.org/sici?sici=0013-189X%28198901%2F02%2918%3A1%3C32%3ASCATCO%3E2.0.CO%3B2-2>
- Burns, D. (2012) *Gravity visualized*. Los Gatos High School. Vidéo téléaccessible à l'adresse <www.youtube.com/watch?v=MTY1Kje0yLg>.
- Burns, D. (2014) *How to build a spacetime simulator*. Los Gatos High School. Vidéo téléaccessible à l'adresse <<https://youtu.be/2JOf1ub9US0>>.
- Carpenter, J.P., Krutka, D.G. (2014) How and why educators use Twitter: A survey of the field. *Journal of Research on Technology in Education* 46 (4):414-434

- Carricano, M., Poujol, F. (2009) *Analyse de données avec SPSS*. Paris. Pearson Éducation France
- Cassan, A., Kubas, D., Beaulieu, J.-P., Dominik, M., Horne, K., Greenhill, J., Wambsganss, J., Menzies, J., Williams, A., Jørgensen, U.G., Udalski, A., Bennett, D.P., Albrow, M.D., Batista, V., Brilliant, S., Caldwell, J.A.R., Cole, A., Coutures, C., Cook, K.H., Dieters, S., Dominis Prester, D., Donatowicz, J., Fouqué, P., K. Hill, K., N. Kains, N., S. Kane, S., Marquette, J.-B., Martin, R., Pollard, K.R., Sahu, K.C., Vinter, C., Warren, D., Watson, B., Zub, M., Sumi, T., Szymański, M.K., Kubiak, M., Poleski, R., Soszynski, I., Ulaczyk, K., Pietrzyński, G., Wyrzykowski, L. (2012) One or more bound planets per Milky Way star from microlensing observations. *Nature* 481:167-169
- CBS News (2011) *Did the internet killed privacy?* Site téléaccessible à l'adresse <<http://www.cbsnews.com/news/did-the-internet-kill-privacy/>>.
- Chamberland, G., Lavoie, L., Marquis, D. (1995) *20 formules pédagogiques*. Sainte-Foy (Québec). Presses de l'Université du Québec
- Chaplin, C. (1964) *My autobiography*. New York. Simon & Schuster
- Chartré, C., Levert, I. (2008) *Synergie : Manuel de l'élève (2^e cycle du secondaire, 1^{re} année)*. Montréal (QC). Graficor, Chenelière Éducation
- Corniou, M. (2012) Trouver des planètes qui abritent la vie. *Québec-Science (12 novembre 2012)*,
- Cronjé, J.C., Fouche, J. (2008) Alternatives in evaluating multimedia in secondary school science teaching. *Computers & Education* 51 (2):559-583.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compedu.2007.06.012>
- Einstein, A. (2002) *Physique, philosophie, politique : Textes choisis et commentés par Françoise Balibar*. Paris. Éditions du Seuil
- Escrivá, I., Gagnon, J., Richer, J.-S. (2012) *ADN : Cahier d'apprentissage (2^e cycle du secondaire, 1^{re} année)*. Montréal (QC). Chenelière Éducation
- Exoplanet Database (2016) *The Extrasolar Planets Encyclopaedia*. Base de données scientifique téléaccessible à l'adresse <<http://exoplanet.eu/diagrams/>>.
- Fölsing, A. (1997) *Albert Einstein : A biography*. Middlesex, England. Viking
- Fortin, L., Bradley, M.-F., Plante, A., Thibodeau, M. (2012) *Programme de prévention du décrochage scolaire au secondaire: Trait d'union*. Sherbrooke. Université de Sherbrooke
- Fortin, M.-F. (2010) *Fondements et étapes du processus de recherche: Méthodes quantitatives et qualitatives*. 2^e éd. edn, Montréal. Chenelière Éducation (1^{re} éd. 2005)

- Gagnon, B. (2013) *53 méthodes pédagogiques*. St-Félicien (Québec). Cégep de St-Félicien
- Giordan, A. (1999) *Une didactique pour les sciences expérimentales*. Paris. Éditions Belin
- Gouvernement de l'Alberta (2015) *Composantes constantes : Exploiter les technologies de l'information et de la communication*. Site téléaccessible à l'adresse [<https://education.alberta.ca/francais/teachers/progres/progprimaire/competences/technologies/composantes/>](https://education.alberta.ca/francais/teachers/progres/progprimaire/competences/technologies/composantes/).
- Gouvernement de la Saskatchewan (1993) *Approches pédagogiques : Infrastructure pour la pratique de l'enseignement*. Site téléaccessible à l'adresse http://www.education.gov.sk.ca/approches_pedag >.
- Gouvernement du Canada (2014) *Énoncé de politique des trois Conseils : Éthique de la recherche avec des êtres humains*. Ottawa (Ontario). CRSH, CRSNG & CRS
- Gouvernement du Québec (2001) *La formation à l'enseignant : Les orientations, les compétences professionnelles*. Québec. Ministère de l'Éducation du Loisir et du Sport
- Gouvernement du Québec (2006a) Chapitre 2 : Les domaines généraux de formation. In: *Programme de formation de l'école québécoise : Enseignement secondaire, 1^{er} cycle*. Québec. Ministère de l'Éducation du Loisir et du Sport, pp 20-29
- Gouvernement du Québec (2006b) *L'évaluation des apprentissages au secondaire : Cadre de référence*. Québec. Ministère de l'Éducation du Loisir et du Sport
- Gouvernement du Québec (2007a) Chapitre 1 : Un programme de formation pour le XXI^e siècle. In: *Programme de formation de l'école québécoise : Enseignement secondaire, 2^e cycle*. Québec. Ministère de l'Éducation du Loisir et du Sport, p 32 p.
- Gouvernement du Québec (2007b) Chapitre 2 : Les domaines généraux de formation. In: *Programme de formation de l'école québécoise : Enseignement secondaire, 2^e cycle*. Québec. Ministère de l'Éducation du Loisir et du Sport, p 14 p.
- Gouvernement du Québec (2010a) *Programme de formation de l'école québécoise : Domaine de la mathématique, de la science et de la technologie (1^{er} cycle)*. Ministère de l'Éducation du Loisir et du Sport. Document téléaccessible à l'adresse <http://www1.mels.gouv.qc.ca/sections/programmeFormation/secondaire1/pdf/chapitre062v2.pdf> >.
- Gouvernement du Québec (2010b) *Programme de formation de l'école québécoise : Domaine de la mathématique, de la science et de la technologie (2^e cycle)*. Ministère de l'Éducation du Loisir et du Sport. Document téléaccessible à l'adresse <http://www1.mels.gouv.qc.ca/sections/programmeFormation/secondaire2/medias/6c-sciencetechno.pdf> >.

- Gouvernement du Québec (2010c) *Programme de formation de l'école québécoise : Physique (5^e secondaire)*. Ministère de l'Éducation du Loisir et du Sport. Document téléaccessible à l'adresse
<http://www1.mels.gouv.qc.ca/sections/programmeFormation/secondaire2/medias/08-00763_PhysiqueVersion2.pdf>.
- Gouvernement du Québec (2011a) *Cadre d'évaluation des apprentissages : Science et Technologie. Enseignement secondaire, 2e cycle*. Ministère de l'Éducation du Loisir et du Sport. Document téléaccessible à l'adresse
<<https://www7.mels.gouv.qc.ca/DC/evaluation/index.php?page=recherche>>.
- Gouvernement du Québec (2011b) *Progression des apprentissages au secondaire : Science et Technologie 1^{er} cycle, Science et Technologie 2^e cycle, Science et Technologie de l'Environnement*. Document téléaccessible à l'adresse
<http://www1.mels.gouv.qc.ca/progressionSecondaire/pdf/progrApprSec_ST_PFG_fr-2011-11-24.pdf>.
- Gouvernement du Québec (2014) *Compétences transversales*. Ministère de l'Éducation du Loisir et du Sport. Document téléaccessible à l'adresse
<http://www1.mels.gouv.qc.ca/sections/programmeFormation/secondaire2/medias/3-pfeq_chap3.pdf>.
- Greene, B. (2004) *The fabric of the cosmos : Space, time, and the texture of reality*. New York. Alfred A. Knopf
- Guilbault, C. (2015) *Activités pédagogiques en laboratoire favorisant l'intégration de connaissances conditionnelles*. Montréal. Rapport de stage présenté à la Faculté des sciences infirmières en vue de l'obtention du grade de Maîtrise en sciences infirmières (M.Sc.) : Université de Montréal
- Hair, J., Anderson, R., Tatham, R., Black, W. (1998) *Multivariate data analysis, 5^e édition*. London. Prentice Hall International
- Harrisson, D. (2000) L'éthique et la recherche sociale. In: Karsenti, T., Savoie-Zajc, L. (eds) *Introduction à la recherche en éducation*. Sherbrooke (Québec). Éditions du CRP, pp 33-56
- Hentschel, A.M., Hentschel, K. (1998) *The collected papers of Albert Einstein (Volume 8) - The Berlin years : Correspondence, 1914-1918*. Princeton (NJ). Princeton University Press
- Horikawa, D.D. (2012) Survival of Tardigrades in extreme environments: A model animal for Astrobiology. In: Altenbach, V.A., Bernhard, M.J., Seckbach, J. (eds) *Anoxia: Evidence for Eukaryote Survival and Paleontological Strategies*. Dordrecht. Springer Netherlands, pp 205-217. doi:10.1007/978-94-007-1896-8_12
- Huet, S. (2015) Exoplanètes : La traque se précise. *Libération* (22 juin 2015),

- Hutchens, J.S., Hayes, T. (2014) In your Facebook: Examining Facebook usage as misbehavior on perceived teacher credibility. *Education and Information Technologies* 19:5-20
- Indiana University (2016) *Planet temperature calculation*. Simulateur téléaccessible à l'adresse <<http://www.astro.indiana.edu/gsimonel/temperature1.html>>.
- Isaacson, W. (2007) *Einstein : His life and universe*. New York. Simon & Schuster
- Janosz, M. (2000) L'abandon scolaire chez les adolescents: perspective nord-américaine. *VEI Enjeux* 122:105-122
- Joyce, B.R., Weil, M. (1986) *Models of Teaching*. Prentice-Hall
- Kashefi, K., Lovley, D.R. (2003) Extending the upper temperature limit for life. *Science* 301 (5635):934-934. doi:10.1126/science.1086823
- Keengwe, J., Bhargava, M. (2014) Mobile learning and integration of mobile technologies in education. *Education and Information Technologies* 19:737-746
- Keengwe, J., Onchwari, G., Agamba, J. (2014a) Promoting effective e-learning practices through the constructivist pedagogy. *Education and Information Technologies* 19:887-898
- Keengwe, J., Schnellert, G., Jonas, D. (2014b) Mobile phones in education: Challenges and opportunities for learning. *Education and Information Technologies* 19:441-450
- Keengwe, J., Schnellert, G., Mills, C. (2012) Laptop initiative: Impact on instructional technology integration and student learning. *Education and Information Technologies* 17:137-146
- Lasnier, F. (2000) *Réussir la formation par compétences*. Montréal (Québec). Éditions Guérin
- Legendre, R. (2005) *Dictionnaire actuel de l'éducation, 3^e édition*. Montréal. Édition Guérin
- Liu, M., Scordino, R., Geurtz, R., Navarrete, C., Ko, Y., Lim, M. (2014) A look at research on mobile learning in K–12 education from 2007 to the present. *Journal of Research on Technology in Education* 46 (4):325-372
- Malhotra, N. (2011) *Études Marketing avec SPSS, 6^e édition*. Paris. Pearson Éducation France
- Marino, M.T. (2009) Understanding how adolescents with reading difficulties utilize technology-based tools. *Exceptionality: A Special Education Journal* 17 (2):88-102
- Meyer, É., Kinnard, N. (2015) *Systèmes : Cahier d'apprentissage (2^e cycle du secondaire, 1^{re} année)*. Montréal (QC). Les Éditions CEC
- Müller, T.W.A., Haghhighipour, N. (2014) Calculating the Habitable Zone of Multiple Star Systems. *arXiv:14010601 [astro-phEP]*

- Müller, T.W.A., Haghighipour, N. (2015) *Habitable Zones in Multiple Star Systems*. Simulateur téléaccessible à l'adresse <<http://astro.twam.info/hz-multi/#kid5653126>>.
- Murray, A.E., Kenig, F., Fritsen, C.H., McKay, C.P., Cawley, K.M., Edwards, R., Kuhn, E., McKnight, D.M., Ostrom, N.E., Peng, V., Ponce, A., Priscu, J.C., Samarkin, V., Townsend, A.T., Wagh, P., Young, S.A., Yung, P.T., Doran, P.T. (2012) Microbial life at -13°C in the brine of an ice-sealed Antarctic lake. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109 (50):20626-20631. doi:10.1073/pnas.1208607109
- Paillé, P. (2007) La méthodologie de recherche dans un contexte de recherche professionnalisante: douze devis méthodologiques exemplaires. *Recherches Qualitatives* 27 (2):133-151
- Pikuta, E.V., Marsic, D., Bej, A., Tang, J., Krader, P., Hoover, R.B. (2005) *Carnobacterium pleistocenium* sp. nov., a novel psychrotolerant, facultative anaerobe isolated from permafrost of the Fox Tunnel in Alaska. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 55:473–478
- Popper, K.R. (1973) *La logique de la découverte scientifique (traduction de la version originale de 1934)*. Collections : Bibliothèque scientifique, Paris. Payot
- Potkonjak, V., Gardner, M., Callaghan, V., Mattila, P., Guetl, C., Petrović, V.M., Jovanović, K. (2016) Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering : A review. *Computers & Education* 95:309-327. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.002>
- Quintana, E.V., Barclay, T., Raymond, S.N., Rowe, J.F., Bolmont, E., Caldwell, D.A., Howell, S.B., Kane, S.R., Huber, D., Crepp, J.R., Lissauer, J.J., Ciardi, D.R., Coughlin, J.L., Everett, M.E., E., C., Henze, C.E., Horch, E., Isaacson, H., Ford, E.B., Adams, F.C., Still, M., Hunter, R.C., Quarles, B., Selsis, F. (2014) An Earth-sized planet in the habitable zone of a cool star. *Science* 344:277-280. doi:DOI: 10.1126/science.1249403
- Range, S.K. (2004) *Gravity Probe B: Examining Einstein's spacetime with gyroscopes - An educator's guide*. NASA and Stanford University. Document téléaccessible à l'adresse <<http://einstein.stanford.edu/RESOURCES/education-index.html>>.
- Rein, H. (2014) *Exoplanet for iPad*. Hanno Rein. Application téléaccessible à l'adresse <<https://itunes.apple.com/fr/app/exoplanet/id327702034?mt=8>>.
- Rein, H., Fujii, Y., Spiegel, D.S. (2014) Some inconvenient truths about biosignatures involving two chemical species on Earth-like exoplanets. *PNAS* 111 (19):6871-6875. doi:www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1401816111
- Robinson, D. (1985) *Chaplin : His life and art*. New York. McGraw-Hill

- Roegiers, X. (2000) *Une pédagogie de l'intégration: Compétences et intégration des acquis dans l'enseignement*. Bruxelles. De Boeck
- Roegiers, X. (2004) *Une pédagogie de l'intégration: Compétences et intégration des acquis dans l'enseignement, 2^e édition*. Pédagogies en Développement, Bruxelles. de Boeck & Larcier
- Roegiers, X. (2005) L'évaluation selon la pédagogie de l'intégration: Est-il possible d'évaluer les compétences des élèves? In: Toualbi-Thaâlibi, K., Tawil, S. (eds) *La refonte de la pédagogie en Algérie: Défis et enjeux d'une société en mutation*. Alger. UNESCO-ONPS, pp 107-124
- Roegiers, X. (2010a) *Approche par compétences 1*. eduwebann (<http://www.eduweb-an.com>)
- Roegiers, X. (2010b) *Approche par compétences 2*. eduwebann (<http://www.eduweb-an.com>)
- Roegiers, X. (2010c) *Approche par compétences 3*. eduwebann (<http://www.eduweb-an.com>)
- Roegiers, X. (2010d) *Approche par compétences 4*. eduwebann (<http://www.eduweb-an.com>)
- Roegiers, X. (2010e) *Approche par compétences 5*. eduwebann (<http://www.eduweb-an.com>)
- Rommes, E., Overbeek, G., Scholte, R., Engels, R., De Kemp, R. (2007) « I'm not interested in computers » : Gender-based occupational choices of adolescents. *Information, Communication & Society* 10 (3):299-319
- Santini, J.-L. (2015) Une exoplanète semblable à la Terre. *La Presse* (23 juillet 2015),
- Schroeder, C.M., Scott, T.P., Tolson, H., Huang, T.-Y., Lee, Y.-H. (2007) A meta-analysis of national research: Effects of teaching strategies on student achievement in science in the United States. *Journal of Research in Science Teaching* 44 (10):1436-1460. doi:10.1002/tea.20212
- Scientific American (2015) Special issue : 100 years of General Relativity (Einstein : How relativity changed the rules of our reality). *Scientific American* 313 (3):1-100
- Seager, S. (2009) *Is there life out there? The search for habitable exoplanets*. Cambridge, MA. Massachusetts Institute of Technology (Lee Billings)
- Senkbeil, E.G., Crisp, P. (2004) Demonstrations for teaching laboratory safety. *Chemical Health and Safety* 11 (4):17-24. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.chs.2004.04.001>
- Sesen, B.A., Tarhan, L. (2010) Innovation and creativity in education promoting active learning in high school chemistry : learning achievement and attitude. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 2 (2):2625-2630. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.03.384>

- Sever, S., Yurumezoglu, K., Oguz-Unver, A. (2010) Comparison teaching strategies of videotaped and demonstration experiments in inquiry-based science education. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 2 (2):5619-5624
- Sokal, R.R., Rohlf, F.J. (2011) *Biometry, 4th edition*. New York. Freeman
- Speziali, P. (1972) *Albert Einstein Michele Besso : Correspondance 1903-1955*. Collection Histoire de la Pensée, Paris. Herman, Éditeurs des Sciences et des Arts
- SPSS Inc. (2013) *SPSS 22.0 Application Guide*. Chicago. SPSS Inc.
- Stanhope, D.S., Corn, J.O. (2014) Acquiring teacher commitment to 1:1 initiatives: The role of the technology facilitator. *Journal of Research on Technology in Education* 46 (3):252-276
- Stoica, D., Paragina, F., Paragina, S., Miron, C., Jipa, A. (2011) The interactive whiteboard and the instructional design in teaching physics. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 15:3316-3321. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.292>
- SurveyMonkey (2015) *L'échelle de Likert, qu'est-ce que c'est?* Site web téléaccessible à l'adresse <<https://fr.surveymonkey.com/mp/likert-scale/>>.
- Tatli, Z., Ayas, A. (2010) Virtual laboratory applications in chemistry education. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 9:938-942. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.12.263>
- Thomas, K.M., O'Bannon, B.W., Britt, V.G. (2014) Standing in the schoolhouse door: Teacher perceptions of mobile phones in the classroom. *Journal of Research on Technology in Education* 46 (4):373-395
- Tiernan, P. (2014) A study of the use of Twitter by students for lecture engagement and discussion. *Education and Information Technologies* 19:673-690
- Touchette, P. (2007) *Planifier et réaliser une situation d'apprentissage et d'évaluation (SAÉ)*. Université Laval. Document téléaccessible à l'adresse <<http://classeur.pistes.org/chantier/theme/675/GuidePlanification.pdf>>.
- Tsujimoto, M., Imura, S., Kanda, H. (2016) Recovery and reproduction of an Antarctic tardigrade retrieved from a moss sample frozen for over 30 years. *Cryobiology* 72 (1):78-81. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cryobiol.2015.12.003>
- TVA Nouvelles (2015) *Découverte d'une exoplanète semblable à la Terre*. Québecor Inc. Vidéos téléaccessibles à l'adresse <<http://www.tvanouvelles.ca/2015/07/23/decouverte-dune-exoplanete-semblable-a-la-terre>>.

- Veselinovska, S.S., Gudevab, L.K., Djokicb, M. (2011) The effect of teaching methods on cognitive achievement in biology studying. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 15:2521-2527. doi:doi:10.1016/j.sbspro.2011.04.138
- Visser, R.D., Evering, L.C., Barrett, D.E. (2014) #TwitterforTeachers: The implications of Twitter as a self-directed professional development tool for K-12 teachers. *Journal of Research on Technology in Education* 46 (4):396-413
- Wells, H.G. (1898) *The war of the worlds*. London. Heinemann
- Wise, K.C. (1996) Strategies for Teaching Science: What Works? *The Clearing House: A Journal of Educational Strategies, Issues and Ideas* 69 (6):337-338.
doi:10.1080/00098655.1996.10114334
- Yergeau, E., Poirier, M. (2013) *SPSS : Analyse en composantes principales*. Université de Sherbrooke. Page web téléaccessible à l'adresse :
<http://spss.espaceweb.usherbrooke.ca/pages/interdependance/analyse-en-composantes-principales.php?searchresult=1&sstring=likert#wb_110>.

**ANNEXE A : QUESTIONNAIRE RELATIVEMENT AUX SAVOIRS PRÉSENTÉ
AVANT L'EXÉCUTION DE LA SAÉ**

Note : Les bonnes réponses ont été surlignées en gris.

Albert Einstein (1879-1955) est devenu célèbre grâce à plusieurs de ses théories qui se sont avérées vraies. Répondre au mieux de tes connaissances aux questions suivantes.

Si tu ne connais pas la réponse, l'indiquer plutôt que de « prendre une chance ».

1. Einstein était un homme de science. Quel métier pratiquait-il?
 - a. Biologie
 - b. Médecine
 - c. Chimie
 - d. Physique
 - e. Histoire des sciences
 - f. Je ne sais pas

2. Einstein a redéfini les travaux d'un grand scientifique avant lui. De qui s'agit-il?
 - a. Alfred Nobel
 - b. Galileo Galilei
 - c. Isaac Newton
 - d. Louis Pasteur
 - e. Charles Darwin
 - f. Je ne sais pas

3. Selon toi, laquelle de ses théories est la plus connue *du grand public*?
 - a. Théorie de l'effet photoélectrique (la lumière est faite de particules)
 - b. Théorie sur le mouvement brownien (le mouvement des atomes)
 - c. Théorie sur l'électrodynamique des corps en mouvement (le temps est relatif)
 - d. Théorie de l'équivalence masse-énergie ($e = mc^2$)
 - e. Théorie de la relativité générale (phénomène de la gravité)
 - f. Je ne sais pas

4. Selon toi, laquelle de ses théories est considérée comme étant la plus importante *par les scientifiques* (autant à son époque que ceux contemporains)?
- Théorie de l'effet photoélectrique (la lumière est faite de particules)
 - Théorie sur le mouvement brownien (le mouvement des atomes)
 - Théorie sur l'électrodynamique des corps en mouvement (le temps est relatif)
 - Théorie de l'équivalence masse-énergie ($e = mc^2$)
 - Théorie de la relativité générale (phénomène de la gravité)
 - Je ne sais pas
5. La *Théorie de la Relativité Générale* d'Albert Einstein porte également le nom de *théorie de la gravité*. Décrire dans tes mots ce que tu connais de cette théorie. Si tu ne la connais pas, l'indiquer.

Réponse partiellement correcte :

- La gravité en tant que force invisible, qui retient comme une corde ou semblable au magnétisme (théorie de Newton)
- Relation quantitative entre la masse et la force de gravité (ex. : plus la masse est élevée, plus son effet gravitationnel est grand)

Réponse entièrement correcte :

- La gravité en tant que déformation de l'espace
-
-
-

Je te remercie infiniment de ta participation !

ANNEXE B : ÉLÉMENT DÉCLENCHEUR – PRÉSENTATION *POWER POINT*

LES EXOPLANÈTES ET LA PROBABILITÉ DE VIE EXTRATERRESTRE

Sondage d'enquête :
Que connais-tu d'Albert Einstein?

DEVOIR : LECTURE PRÉPARATOIRE AU LABO
 Ton document est en version électronique et tu y as accès à partir de Moodle. Le document s'appelle « Labo Einstein ».

S.V.P.
 Rapporte ton sondage lorsque tu as terminé

Merci !

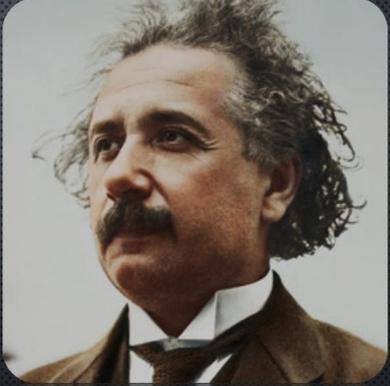


Figure 7. Diapositive 1 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : Le sondage d'enquête sur Albert Einstein (Annexe A, p. 81) est présenté à l'élève à ce stade.

Les exoplanètes... et la vie extraterrestre !

Labo Einstein !




Activité préparée par
 Alain Houle, PhD.
 Université de Sherbrooke
 Mai 2016

UNE EXOPLANÈTE SEMBLABLE À LA TERRE

DIRECT

Source TVA, 2015

Figure 8. Diapositive 2 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : annonce médiatique de la découverte d'une exoplanète semblable à la planète Terre (TVA Nouvelles, 2015).

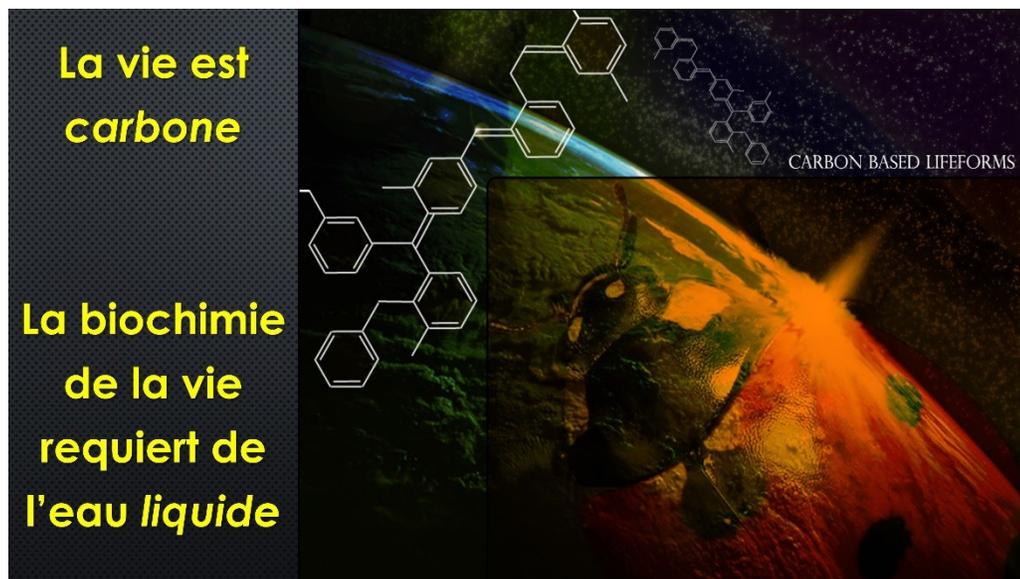


Figure 9. Diapositive 3 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : l'enseignante ou l'enseignant rappelle à l'élève que deux conditions strictes sont nécessaires pour que la vie –telle que nous la connaissons– existe, soit la présence de carbone et d'eau liquide, toutes deux essentielles aux réactions biochimiques.

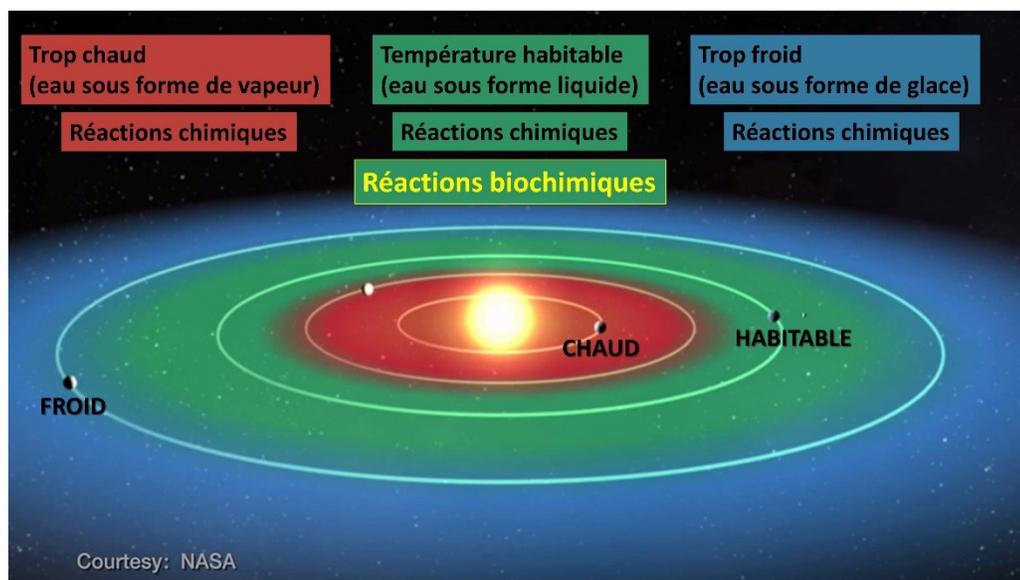


Figure 10. Diapositive 4 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : relation entre la distance étoile-planète et la température de l'eau; la zone verte indique la zone habitable (eau liquide), là où les réactions de nature biochimique et l'évolution de formes de vie sont possibles.



Figure 11. Diapositive 5 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : relation entre la masse d'un Soleil et la dispersion de la zone habitable; la zone verte indique la zone habitable (eau liquide).

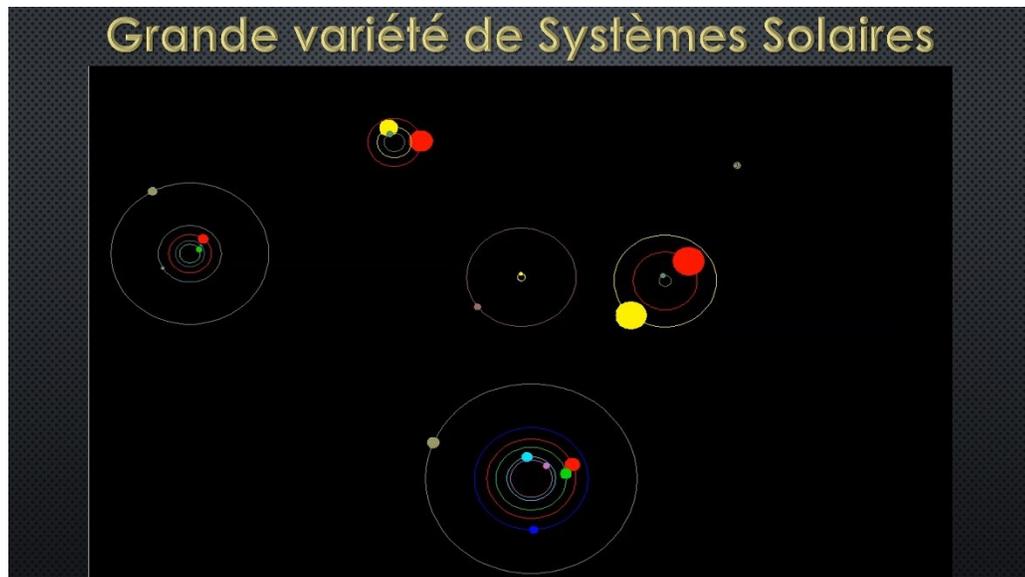


Figure 12. Diapositive 6 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : variabilité des systèmes solaires identifiés à ce jour. L'enseignante ou l'enseignant décrit les différents systèmes planétaires.

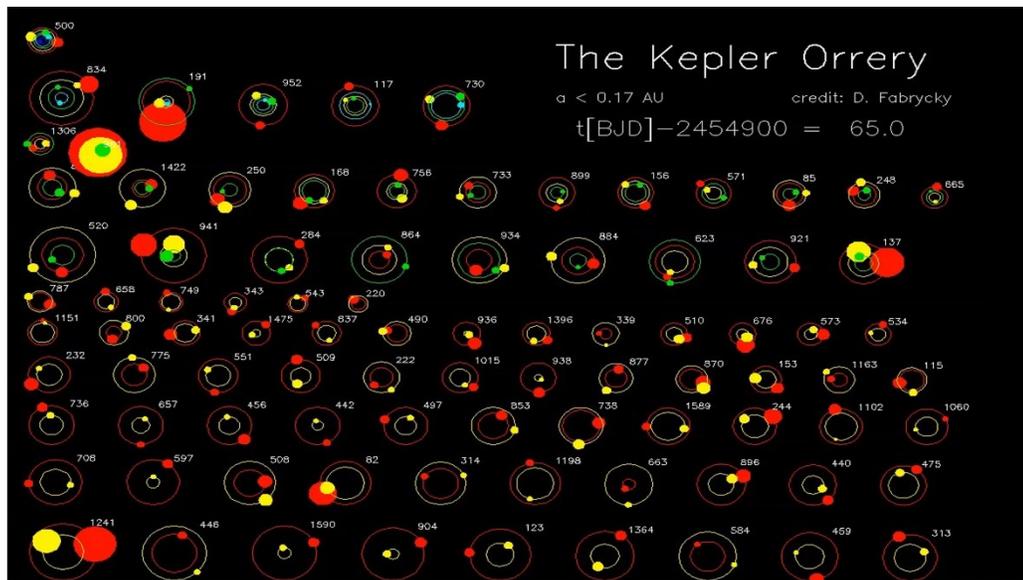


Figure 13. Diapositive 7 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : variabilité des systèmes solaires identifiés à ce jour.

Cette diapositive illustre encore une fois la très grande variabilité dans les systèmes extrasolaires; toutefois, elle doit être présentée plus rapidement que la précédente, tout en laissant le temps à l'élève de s'en imprégner.

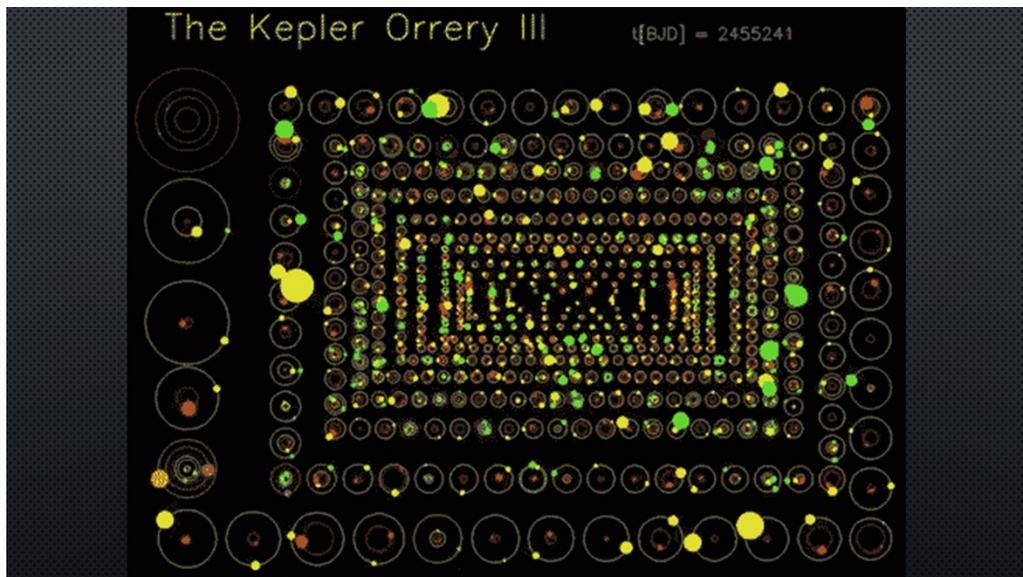


Figure 14. Diapositive 8 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : variabilité additionnelle des systèmes extrasolaires identifiés à ce jour.

Il est préférable que cette diapositive soit présentée plus rapidement que la précédente. Les trois diapositives qui présentent les systèmes extrasolaires ne devraient pas durer plus d'une minute au total, sauf si l'élève le demande.

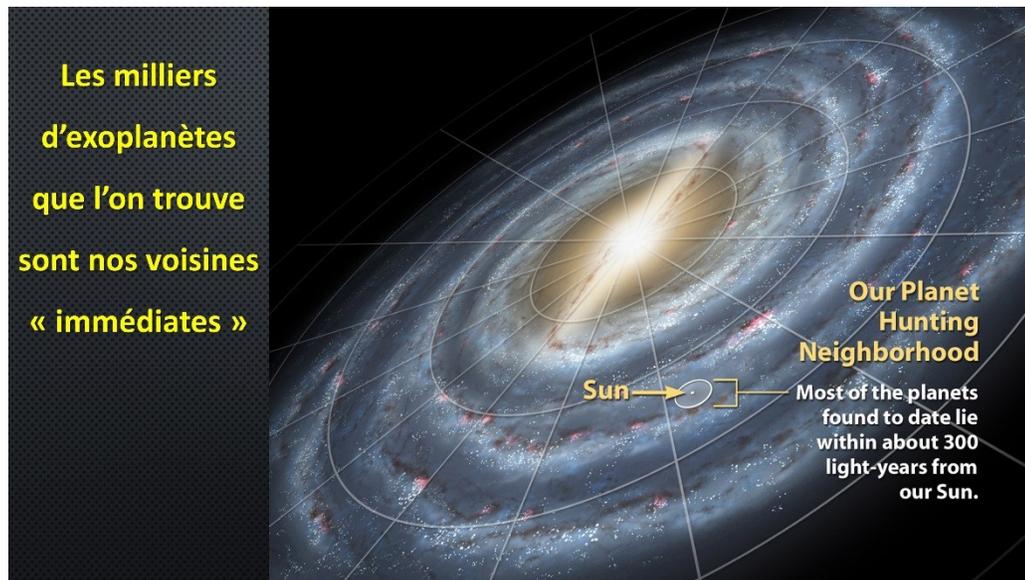


Figure 15. Diapositive 9 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : la très grande variabilité des systèmes extrasolaires n'a été découverte que dans une toute petite fraction de notre galaxie –la Voie Lactée.

La plupart des exoplanètes ont été découvertes en-deçà de 300 années-lumière. La Voie Lactée fait 100 000 années-lumière de diamètre moyen.

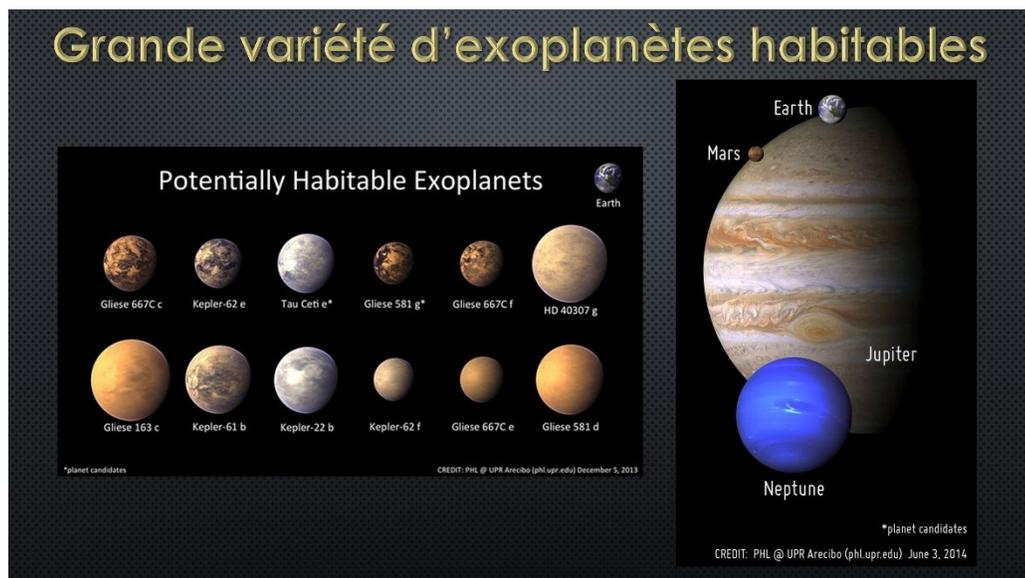


Figure 16. Diapositive 10 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : variabilité des exoplanètes qui montrent une zone habitable où l'eau –s'il y en a– peut circuler sous forme liquide.

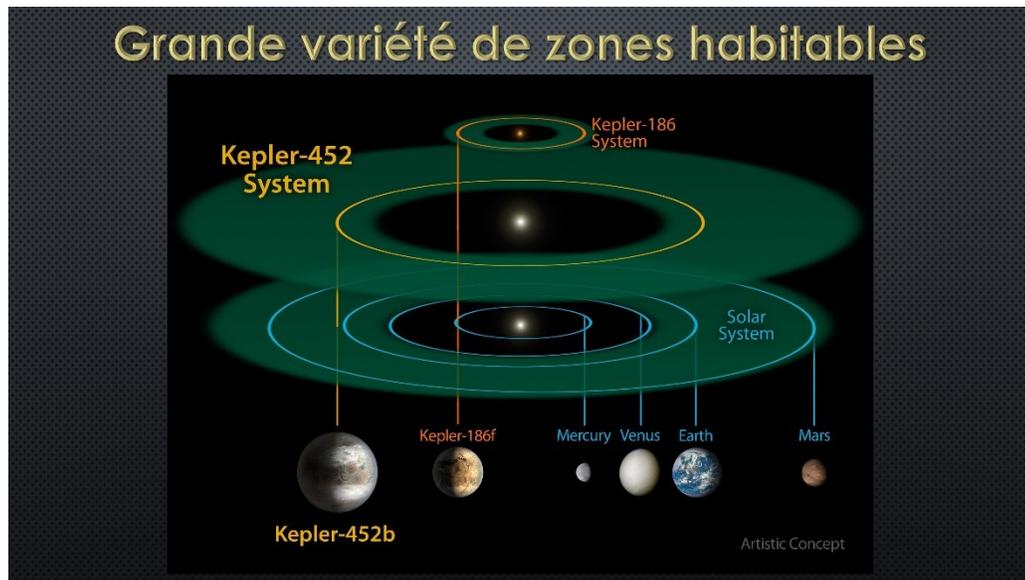


Figure 17. Diapositive 11 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : comparaison entre trois systèmes planétaires.

Il est recommandé que l'enseignante ou l'enseignant commence par exposer notre propre système solaire (en bleu sur la diapositive), pour ensuite le comparer aux deux autres systèmes.



Figure 18. Diapositive 12 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : film créé avec la collaboration de Stephen Hawking illustrant la formation d'un système solaire. Comment est-il possible que des objets célestes puissent se former de cette façon?

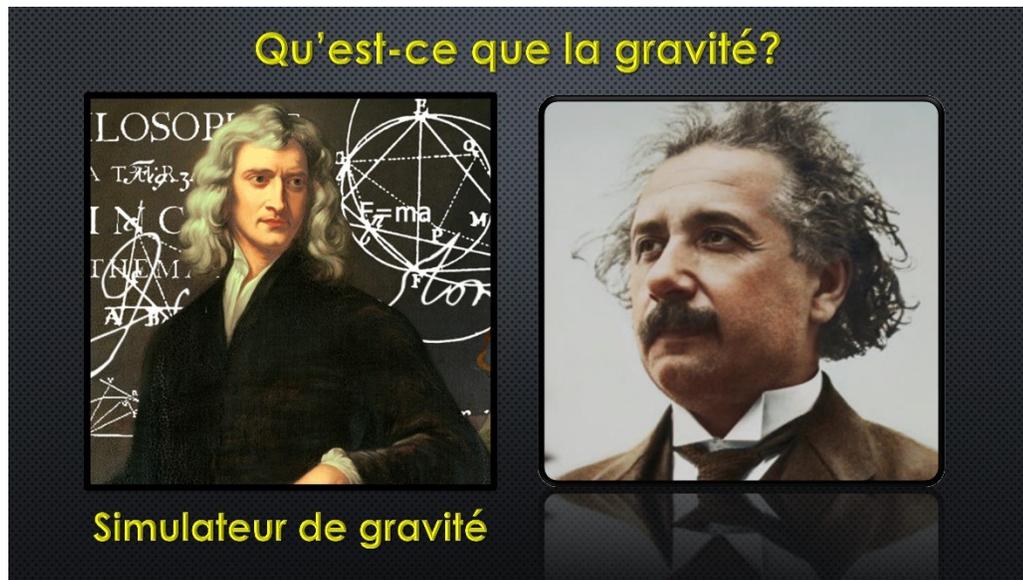


Figure 19. Diapositive 13 de la présentation Power Point (élément déclencheur) : Confrontation scientifique entre deux physiciens sur le sens que l'on doit donner au concept de gravitation universelle.

C'est ici que les élèves sont appelés à se disposer tout autour du simulateur de gravité (Figure 39, p. 134). Les diapositives qui suivent n'appartiennent pas à cette présentation (élément déclencheur : *Les exoplanètes... et la vie extraterrestre !*).

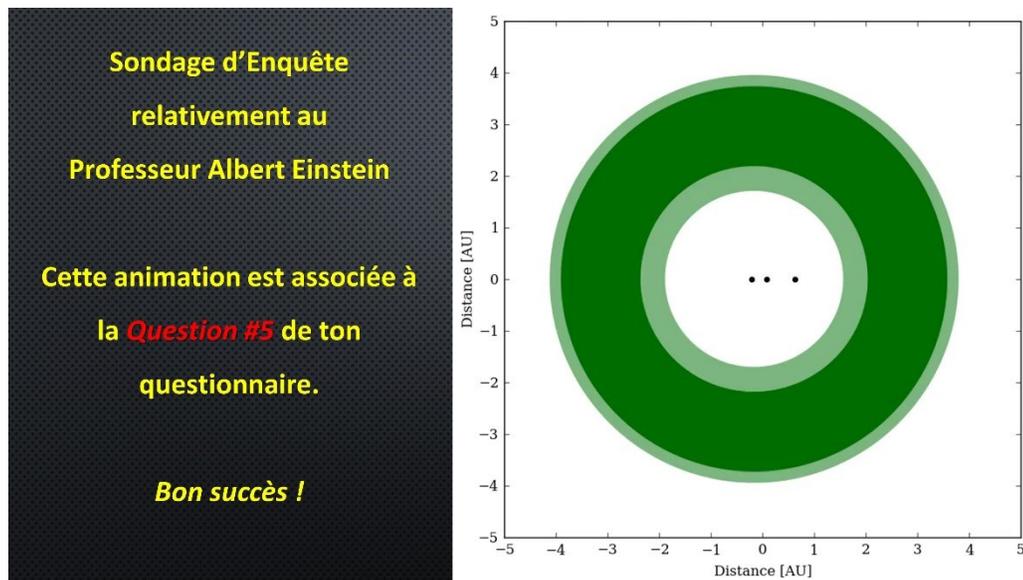


Figure 20. Diapositive 14 de la présentation Power Point : Animation réaliste utilisée lors de l'évaluation de l'élève d'un système solaire à trois étoiles. Ce système s'appelle KID 5653126.

Cette animation est associée à la question d'examen #5. La passation de l'évaluation se fait à la 4^e période (ANNEXE K : CALENDRIER DE RÉALISATION DE LA SAÉ, p. 137).



Figure 21. Diapositive 15 de la présentation Power Point : Animation de l'exoplanète HD 33636b qui orbite à la fois au sein de la zone habitable et à l'extérieur de celle-ci. Question DÉFI à la fin de la 2^e période.

Il est demandé à l'élève de discuter de la possibilité d'une forme de vie dans un tel contexte. Après une brève discussion, l'enseignante ou l'enseignant rappelle aux élèves la découverte des microbes qui vivent en-dessous de la calotte glaciaire à -13 °C en Antarctique (Murray, Kenig, Fritsen, McKay, Cawley et al., 2012), et affiche l'image des microbes en question. De plus, il faut rappeler l'étude de la NASA qui prouve que des bactéries gelées dans de la glace depuis 32 000 ans en Arctique vivent à nouveau en réchauffant l'eau (Pikuta, Marsicn, Bej, Tang, Krader et al., 2005). Théoriquement, il est possible que cette exoplanète abrite une forme de vie microbienne, même si l'exoplanète sort de manière saisonnière de la zone habitable.



Figure 22. Diapositive 16 de la présentation Power Point : Question Défi. L'animation réaliste montre une exoplanète passant (en transit) devant son Soleil. L'élève doit déduire que les lignes qui tournent sans arrêt autour de la planète représentent la lumière située derrière la planète et qui est déviée par celle-ci. Cette question est présentée à la toute fin de la 3^e période, et la discussion est ouverte à toute la classe.



Figure 23. Diapositive 17 de la présentation Power Point : Remerciements à l'élève pour sa participation.



ANNEXE C : DOCUMENT DE L'ENSEIGNANT LORS DE L'UTILISATION DU SIMULATEUR DE GRAVITÉ

LE SIMULATEUR DE GRAVITÉ

Ce document est destiné à l'intention de l'enseignante ou l'enseignant qui utilise le simulateur de gravité (Figure ci-contre) lors de la première période, c'est-à-dire pendant le laboratoire-démonstration. Nous suggérons quelques démonstrations qu'il est possible de mettre en place afin d'illustrer à l'élève, et ce en temps réel, ce qu'est la gravitation universelle selon Einstein. Noter que la bande plastique de jardinage autour de la structure est essentielle afin de maintenir les sphères à l'intérieur du simulateur.



- 1) Utiliser des sphères de masse différente afin d'illustrer la déformation de l'espace sur le tissu élastique du simulateur de gravité. Nous croyons important d'utiliser les sphères par masse croissante, soit en commençant par les plus légères (styromousse, plastique, verre, bois), pour ensuite continuer avec celles en métal (plomb, acier, fer, bronze, aluminium), et terminer avec les –impressionnantes– boules de quille.
- 2) Déposer la boule de quille la plus légère en plein centre du simulateur. Lancer une seule sphère autour de celle-ci. Expliquer le mouvement planétaire.
- 3) Déposer une boule de quille plus lourde (~ 4,5 kg = 10 livres, ou plus). Lancer deux sphères de masse très différente (acier et verre) et tenter de les propulser en même temps. La plus lourde (simulant la Terre) tourne autour du Soleil (la boule de quille) pendant que la plus légère (simulant la Lune) tourne autour de la Terre. Il est recommandé de se pratiquer et de tester des sphères de différentes masses avant de le faire devant la classe.

- 4) Répéter le point précédent, mais utiliser cette fois-ci une boule de billard (ou de snooker) conjointement avec une vingtaine de petites billes de verre. Plusieurs billes de verre orbiteront autour de la boule de billard –et le tout autour du Soleil– avec pour effet ultime de simuler le système de Jupiter et ses multiples satellites.
- 5) Il est possible d’illustrer la formation de planètes en utilisant des billes métalliques aimantées. Il s’agit ici d’en lancer plusieurs (une centaine?) mais de différents endroits autour du simulateur de telle sorte que les billes aimantées se collent dès qu’elles s’approchent les unes des autres. Il est recommandé de se faire aider ici par quelques élèves dispersés tout autour du simulateur. Nous n’avons pu vérifier si cela fonctionne, faute de matériel.
- 6) Simuler les origines d’un système solaire en lançant, en direction *opposée*, deux contenants de billes de verre (au moins une cinquantaine dans chaque contenant). Demander à l’élève de remarquer deux points : a) il y a plusieurs collisions au tout début puisque les billes orbitent en sens inverse, et b) une fois les collisions passées, seulement quelques billes orbitent dans le simulateur et elles tournent toutes dans le *même* sens. Il est intéressant de recommencer ce processus de 3 à 5 fois, car le système solaire final sera différent à chaque fois.
- 7) Simuler un système binaire en lançant une boule de masse intermédiaire comme une boule de billard (idéalement un peu plus lourde comme une boule de polo, selon la disponibilité). Au fur et à mesure que la boule de billard s’approche de la boule de quille, faire remarquer à l’élève l’oscillation de la *petite étoile* due au mouvement circulaire de la *grosse planète* (cf. méthode de détection radiale; voir lecture en devoir).
- 8) Simuler un trou noir en utilisant une boule de quille très lourde (par exemple $\sim 7 \text{ kg} = 15$ livres). Répéter les démonstrations précédentes, au choix du personnel enseignant.

ANNEXE D : LECTURE REMISE À L'ÉLÈVE EN VERSION ÉLECTRONIQUE APRÈS LE LABORATOIRE-DÉMONSTRATION

(Ce texte est à lire en devoir entre la 1^{re} et la 2^e période)

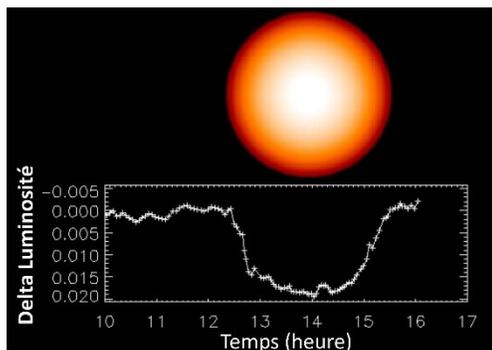
MÉTHODES DE DÉTECTION DES EXOPLANÈTES ET LEUR DIVERSITÉ

ALAIN HOULE, PH.D. – UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

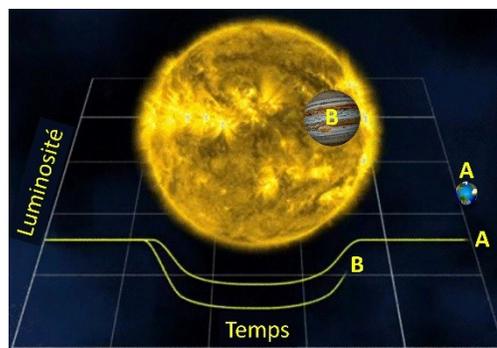
Les Astronomes regorgent d'ingéniosité quand vient le temps d'explorer l'Univers qui nous entoure. Pour découvrir les systèmes extrasolaires –ceux que l'on retrouve en dehors de notre propre système solaire– et les exoplanètes qui y orbitent, les Astronomes utilisent essentiellement six méthodes. En voici trois.

1^{RE} MÉTHODE : LA PLANÈTE QUI TRANSITE

Lorsqu'une planète passe devant son Soleil, elle lui fait de l'ombre et la luminosité de l'étoile en est diminuée. La Figure ci-contre illustre la luminosité moyenne d'une étoile (l'axe des *Y*) en fonction du temps (l'axe des *X*). Lorsque la planète transite devant l'étoile, nous percevons la perte de lumière grâce aux télescopes qui sont de plus en plus puissants. On voit dans la Figure que l'exoplanète a transité devant son Soleil pendant environ 3 heures. Cette perte de luminosité équivaut à un peu moins de 2% de la luminosité totale de ce Soleil.

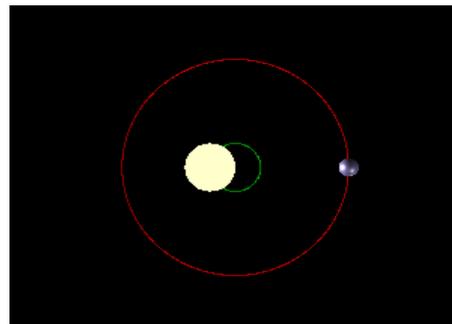


La perte de luminosité est proportionnelle à la taille de l'exoplanète. Par exemple, une planète de type terrestre (la planète *A* dans la Figure ci-contre) diminue moins la luminosité de l'étoile comparativement à une planète de la taille de Jupiter (la planète *B*). Ainsi, la perte de lumière pendant le transit permet aux astronomes de mesurer la taille de l'exoplanète et ainsi déterminer si elle est de nature gazeuse ou rocheuse.



2^E MÉTHODE : LA VITESSE RADIALE DE L'ÉTOILE

Cette méthode consiste à observer l'oscillation que fait l'étoile, comme si elle tournait elle-même sur une orbite autour d'un objet céleste. Lorsque la planète est située d'un côté, le Soleil se trouve de l'autre, et inversement. La Figure contre illustre ce principe, mais une version en format « animation GIF » existe; tu peux la voir sur Wikipédia en cliquant [ici](#).

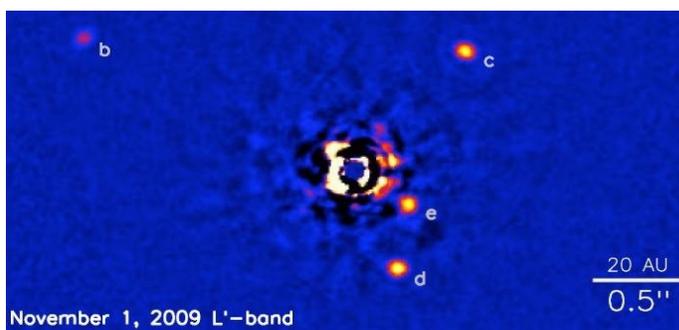


ci-

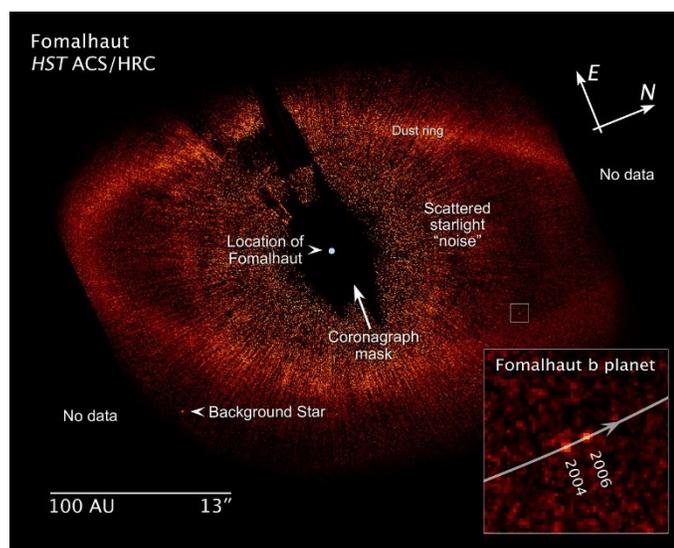
3^E MÉTHODE : LA PHOTOGRAPHIE DIRECTE

Cette méthode pour détecter les planètes extrasolaires consiste tout simplement... à les photographier. Le problème repose bien sûr sur le fait que l'étoile, brillante de tous ses feux, « cache » la présence de la planète. C'est comme si les astronomes étaient aveuglés par la lumière de l'étoile. Pour ce faire, les astronomes place devant le télescope une petite plaque qui bloque la

lumière de l'étoile, mais laisse passer la lumière tout autour. Si tu regardes attentivement les Figures suivantes, tu verras un disque foncé qui recouvre l'étoile afin d'en bloquer sa trop grande luminosité. Un astronome avait dit une fois en entrevue que cela équivalait à un observateur à Montréal qui pointait son



télescope vers un phare maritime à New York, bloquait la lumière provenant de ce phare, dans le but d'observer une toute petite chandelle juste à côté. Dans la Figure ci-dessus, tu remarqueras 4 exoplanètes (b, c, d et e); la barre blanche représente 20 unités astronomiques. Dans la Figure ci-contre, on voit que l'exoplanète a bougé entre 2004 et 2006.

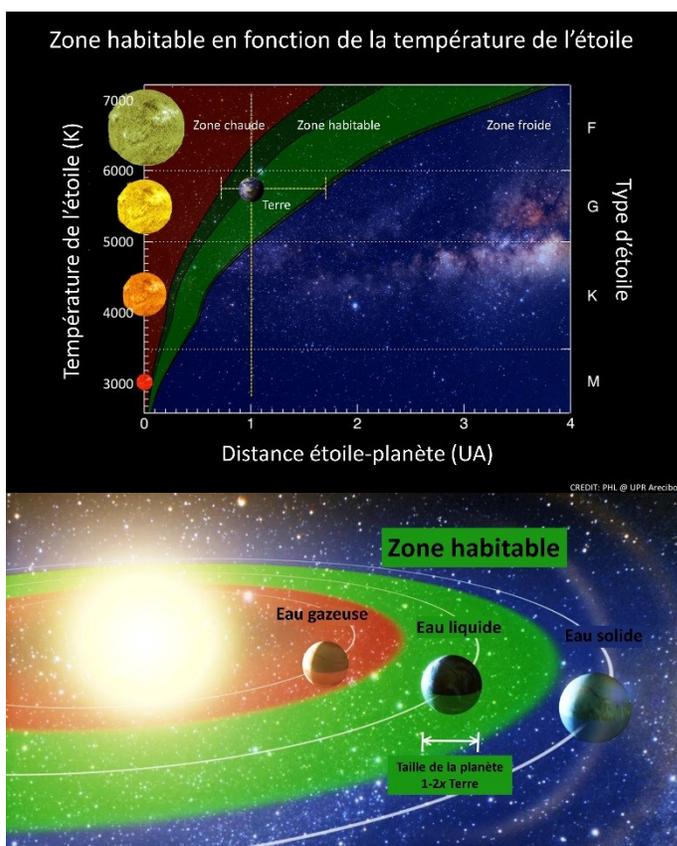


ZONE HABITABLE

On entend par zone habitable la ceinture se trouvant tout autour d'une étoile qui permet à l'eau –si elle est présente– de circuler sur la planète sous forme liquide.

La température de surface d'une planète dépend de quatre facteurs :

- 1) *la masse de l'étoile* (plus le Soleil est massif, plus la planète est chaude);
- 2) *la distance étoile-planète* (plus la planète est proche, plus elle est chaude);
- 3) *l'effet Albédo* (moins les rayons solaires sont réfléchis et retournés dans l'espace, plus la planète est chaude); et enfin
- 4) *l'effet de serre* (plus les gaz favorisant le maintien de la chaleur dans l'atmosphère sont denses, plus la planète est chaude).



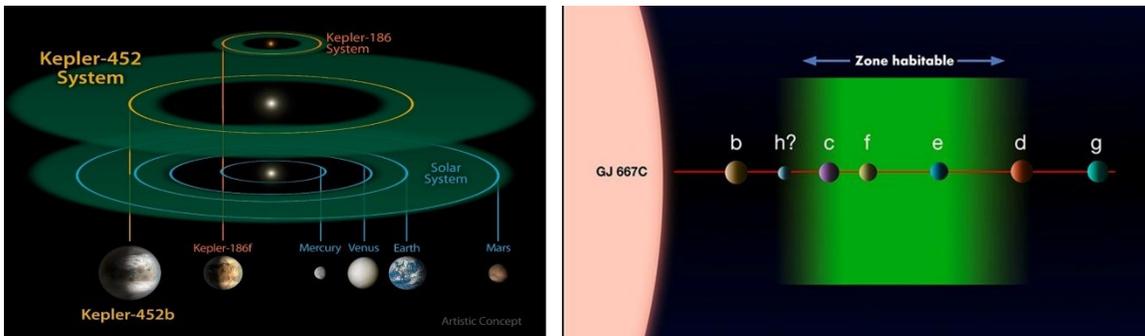
La masse du Soleil affecte de façon significative la distribution des zones trop froides, habitables et trop chaudes. La Figure ci-contre illustre notre Soleil (de type *G* en jaune) et la position de notre Terre. En comparaison, une étoile très massive, donc très chaude (de type *F* en vert pâle), éloigne la zone habitable. En revanche, les petites étoiles sont associées à des zones habitables rapprochées.

La Figure ci-contre illustre l'effet de la distance sur la disposition de la zone habitable. On distingue bien la zone trop froide (qui retient l'eau sous forme solide), la zone habitable (eau liquide) de celle trop chaude (eau gazeuse).

Lequel des quatre facteurs est le plus important dans la détermination de la

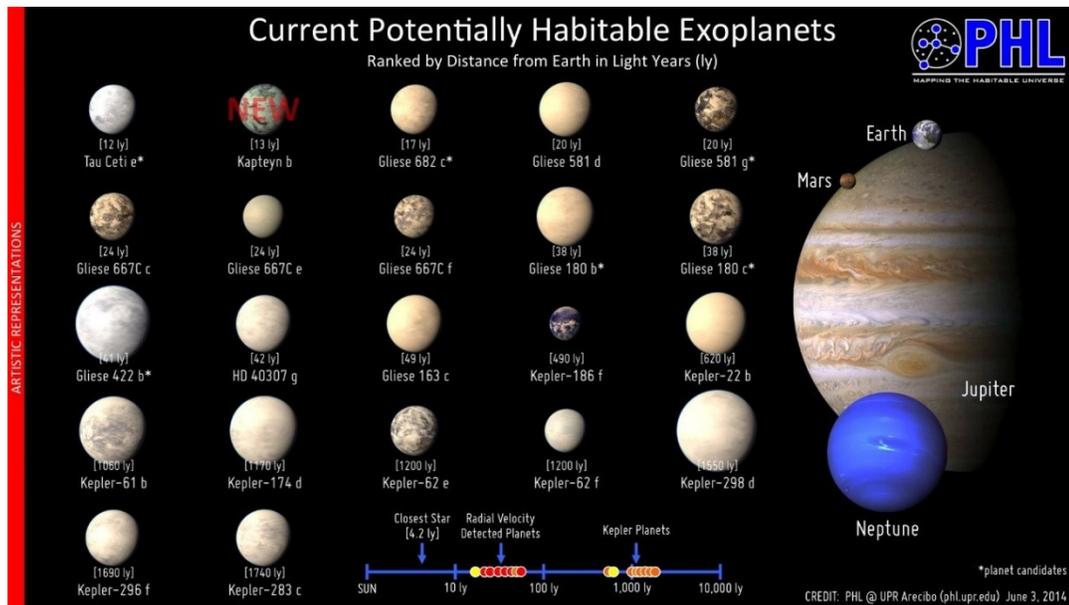
température moyenne d'une planète? Par exemple, si on doublait la masse du Soleil, est-ce que la température de la planète augmenterait autant que si on gardait la même masse mais qu'on diminuait la distance de moitié? Qu'en pensez-vous?

Les systèmes extrasolaires impressionnent de par leur diversité. Les deux Figures ci-dessous en sont témoin. La Figure de gauche montre que le système Kepler-186 contient un Soleil beaucoup plus petit que le nôtre, ce qui n'empêche pas l'exoplanète Kepler-186f d'y orbiter dans une zone habitable rapprochée. À l'inverse, le système extrasolaire Kepler-452 abrite un Soleil beaucoup plus massif, ce qui éloigne la zone habitable. La Figure de droite expose la grande diversité des planètes qui se trouvent dans le système extrasolaire appelé GJ 667C : au moins trois d'entre elles se situent dans la zone habitable (c, f et e).

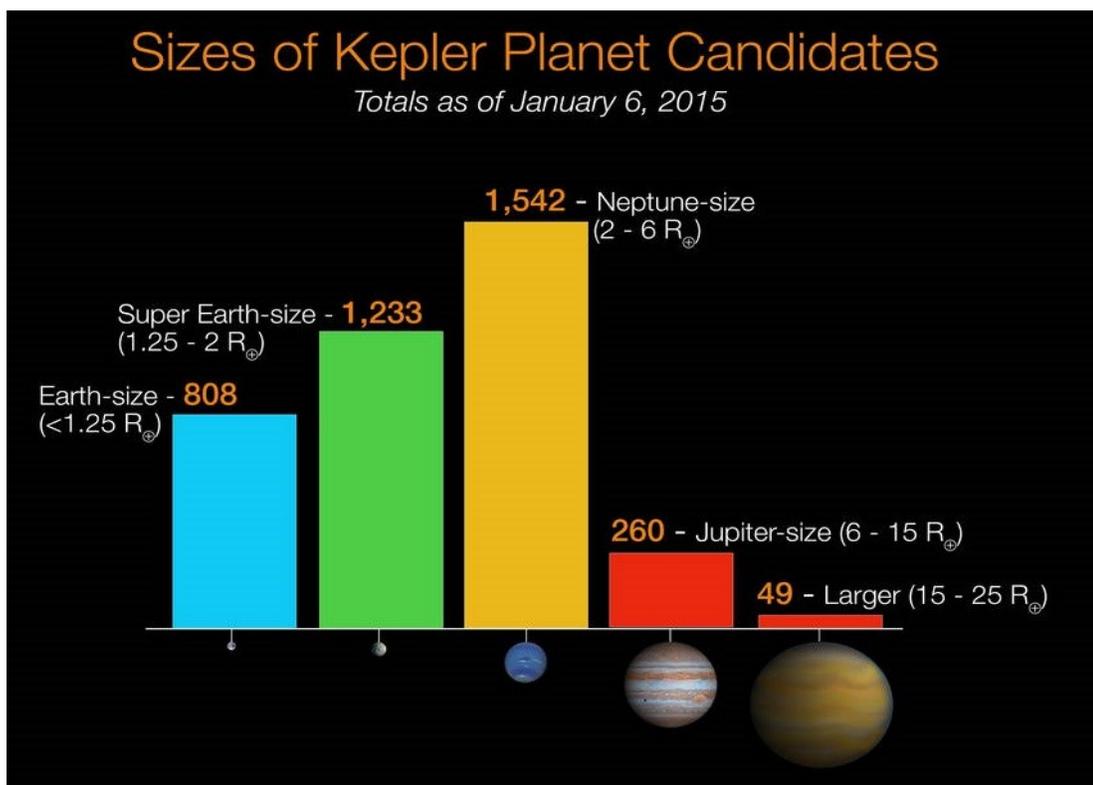


LA DIVERSITÉ DES PLANÈTES EXTRASOLAIRES

Les planètes extrasolaires sont d'une grande diversité, passant de 5 à 10 fois la masse de Jupiter ou aussi petite que Mercure. La Figure ci-dessous illustre quelques-unes de ces exoplanètes qui ont le potentiel d'abriter de l'eau sous forme liquide.



Nous avons trouvé sur le site internet de la NASA une analyse graphique de la taille des exoplanètes découvertes en date du 6 janvier 2015 (Figure ci-dessous). Nous pouvons conclure que les planètes extrasolaires de taille similaire à la Terre représentent environ 21% de toutes les planètes découvertes à ce jour. Les « super-Terres » –qui présentent un rayon de 1.25 fois à 2 fois le rayon de la Terre représentent à elles seules 32% de l'échantillon. Les exoplanètes de la taille de Neptune sont les plus abondantes avec 40% de l'échantillon, alors que les planètes gazeuses de type Jupiter 7%, et les « Jupiter chaudes » 1%. Les astronomes croient que la vie serait possible sur les Terres et super-Terres, à la condition bien sûr qu'elles soient situées dans la zone habitable de leur système solaire respectif.



CONCLUSION

CLa très grande diversité des planètes extrasolaires favorise l'hypothèse que la vie extraterrestre existe. Cela est d'autant plus possible que les exoplanètes découvertes à ce jour sont de tailles différentes, en nombre différent d'un système solaire à l'autre et surtout que plusieurs d'entre elles –possiblement un système solaire sur cinq– orbitent dans une zone où l'eau liquide, essentielle aux réactions biochimiques, circule en toute liberté. La NASA estime que notre galaxie à elle seule abrite au minimum... 50 milliards de planètes! Cela représente 5 milliards de Terres et Super-Terres avec de l'eau liquide !

Nom et Gr. :

**ANNEXE E : DOCUMENT *WORD* UTILISÉ PAR L'ÉLÈVE (EN VERSION ÉLECTRONIQUE) LORS DES 2^E ET 3^E PÉRIODES DE LA SAÉ
(Pendant le questionnement des bases de données interactives en Astronomie)**

LA VARIABILITÉ DES SYSTÈMES EXTRASOLAIRES

Activité préparée par

Alain Houle, PhD.

Université de Sherbrooke – 1 mai 2016

Probabilité de vie extraterrestre selon le nombre d'étoiles dans le système solaire (caricature courtoisie de Mason, Zuluaga, Cuartas et Clark, 2013).



INSTRUCTIONS :

1. Se mettre en équipe de 2 personnes. Chaque élève accède à l'*Encyclopédie des Planètes Extrasolaires* à l'adresse suivante : <http://exoplanet.eu/diagrams/>.
2. Répondre aux questions directement à l'intérieur du présent document. Cliquer sur « *Save Figure* » pour sauvegarder ton graphique dans ton dossier numérique (Moodle ou autre réseau). Choisir la résolution 840 x 600 px. Tu peux également utiliser simplement la fonction *copier-coller*.
3. Chaque question implique 3 réponses : ton analyse graphique, un titre au graphique et l'interprétation du graphique. Insérer tes réponses à l'endroit approprié (dans le tableau tout de suite après la question). Pour ce faire, cliquer dans ton fichier *Word* à l'endroit exacte où tu veux inscrire ta réponse → cliquer dans le menu *Insertion* → *Images* → sélectionner le fichier graphique que tu as sauvegardé au préalable → cliquer sur *Insérer*. Ajuster la taille du graphique afin de respecter la largeur du Tableau. Ajouter Titre et Interprétation.
4. Poster avant la fin du cours ton document à l'adresse courriel suivante : alainhoule2@usherbrooke.ca. **Ne pas oublier d'inscrire ton nom et ton groupe.**

Merci et bonnes découvertes !

RAPPEL 1 : Dans une analyse graphique (comme dans une régression linéaire), c'est la variable X qui prédit la variable Y , et non l'inverse.

RAPPEL 2 : Les données scientifiques sur ce site web professionnel sont réelles et chaque point dans le graphique équivaut à une exoplanète dont l'existence a été *confirmée*.

Pour répondre aux questions, il faut entrer les variables X et Y dans les menus appropriés de la page web. Étant donné que le site web est en anglais, le nom de chaque variable t'est donné en français et en anglais. Une fois ton graphique sauvegardé dans ton espace numérique, ne pas oublier de l'insérer au bon endroit dans le présent document et surtout de l'interpréter : que vois-tu dans cette analyse mathématique? Que sait-on de l'habitabilité des systèmes extrasolaires découverts à ce jour par les Astronomes?

Question 1. Comment la distance entre une planète et son étoile (*Semi-Major Axis*) prédit elle le temps que prend cette planète à faire le tour de son étoile (*Orbital Period*)? Afin de mieux répartir les points dans la Figure, choisir l'échelle logarithmique (*log scale*) pour les deux variables. Un exemple de titre au graphique et d'interprétation possible sont donnés pour cette question (mes attentes); à toi d'y ajouter le graphique.

Figure 1. Période orbitale en fonction de la distance moyenne étoile-planète.

Interprétation : La relation mathématique entre les deux variables est linéaire, positive et très forte, c'est-à-dire que plus la planète en moyenne est éloignée de son Soleil, plus elle a besoin de temps en moyenne pour faire une révolution complète autour de son Soleil, et cela est vrai pour l'ensemble des exoplanètes.

Question 2. Est-ce que la masse d'une étoile (*Mass of a host star*) peut prédire la température à la surface d'une exoplanète (*Calculated temperature*)? Afin de mieux voir la relation, ne pas choisir les échelles logarithmiques (les deux cases sont décochées), établir la valeur minimum de la masse de l'étoile à « 0.5 » et la valeur maximale à « 2.0 », soit respectivement la moitié et deux fois la masse de notre Soleil.

La relation mathématique est-elle positive, négative ou neutre? S'il y a une relation, est-elle faible ou forte? Comment interprète-on les exceptions, par exemple les 3 exoplanètes situées en bas et complètement à droite du graphique? Serais-tu capable d'identifier la zone du graphique là où les exoplanètes sont –en théorie– habitables? Rappel : $0\text{ }^{\circ}\text{K} = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figure 2.

Interprétation :

Question 3. Est-ce que la masse d'un Soleil (*Mass of a host star*) peut prédire son rayon (*Radius of a host star*)? Choisir les échelles logarithmiques pour les deux variables. La relation est-elle linéaire, exponentielle ou asymptotique? Interpréter ce que vous voyez.

Figure 3.

Interprétation :

Question 4. Quelle est la probabilité de trouver une exoplanète (« *Frequency* ») en fonction de sa masse (*Planetary Mass* (***Mearth***))? Pour répondre à cette question, il faut construire un histogramme, aussi appelé diagramme à bandes (***Histogram plot*** → en haut et à droite de l'écran). Indiquer 100 barres (*Number of bins*) et s'assurer que les unités pour la masse de l'exoplanète sont en nombre de fois la masse de la Terre (***Mearth***).

Figure 4.

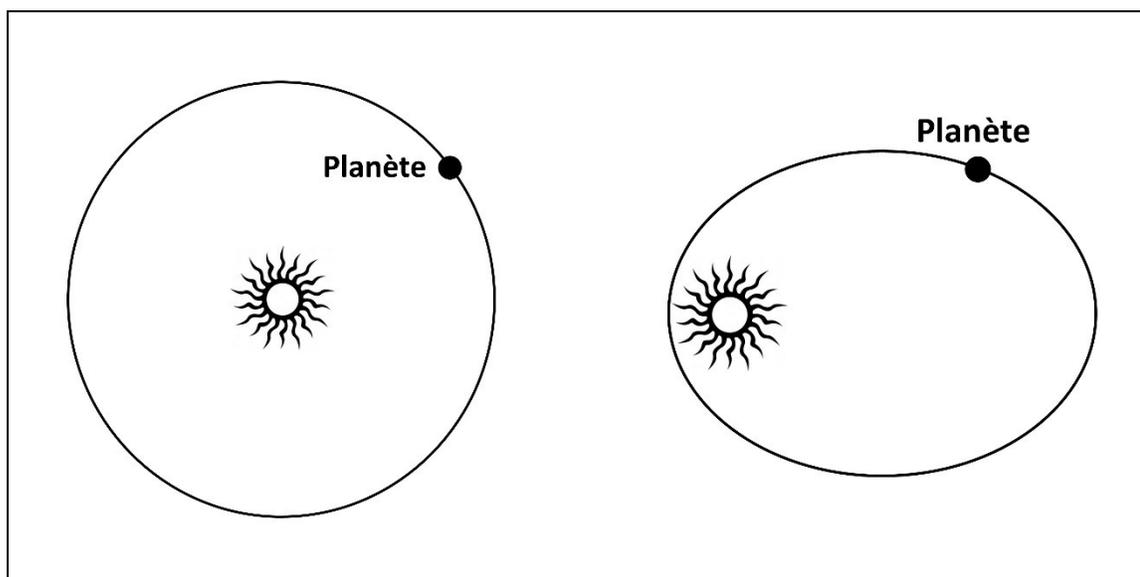
Interprétation :

Question 5. Est-ce que les petites exoplanètes sont plus difficiles à détecter que les grosses? Pour répondre à cette question, construire un nuage de points (***Scatter plot*** → en haut et à droite de l'écran) qui présente l'année de découverte de l'exoplanète (*Year of Discovery*) en fonction du rayon des exoplanètes (*Planetary Radius*). Utiliser l'échelle logarithmique pour le rayon des planètes mais pas pour l'année de découverte. Pour l'année, sélectionner de 1994 à 2018; cela aura pour effet de mieux centrer les points dans la Figure. Repérer la masse de la Terre (***Rearth*** : la valeur $1e+0$). Est-ce que les petites exoplanètes sont effectivement plus difficiles à détecter que les grosses?

Figure 5.

Interprétation :

Question 6 : DÉFI. La distance moyenne étoile-planète (*Semi-Major Axis*) peut-elle affecter l'excentricité des planètes (*Orbital Eccentricity*)? L'excentricité est une mesure qui détermine si la planète orbite autour de son Soleil en forme de cercle parfait (avec son Soleil située en plein centre de l'orbite, voir Figure de gauche ci-dessous), ou si au contraire la planète est désaxée sur son orbite par rapport à son Soleil, c'est-à-dire qu'elle passe très près de son étoile pour s'en éloigner par la suite, et revenir tout près de son étoile encore une fois à la révolution suivante et ainsi de suite (Figure de droite).



Lorsque la planète orbite comme un cercle parfait (Figure de gauche), on lui donne une valeur d'excentricité de 0.0, alors que l'excentricité maximale (Figure de droite) obtient une valeur maximale de 1.0. Afin de mieux distribuer les données dans le nuage de points, utiliser l'échelle logarithmique pour la distance moyenne étoile-planète, avec une valeur minimale de 0.03 et une valeur maximale de 9.6, et utiliser l'échelle régulière pour l'excentricité avec une valeur minimale de -0.1. Tu devrais normalement trouver trois éléments de réponse (3 conclusions) à cette question *défi*. Voici un indice pour la 3^e conclusion : « Pourquoi est-ce que les exoplanètes excentriques proches de leur étoile n'existent pas? » Comment la Théorie de la Relativité d'Einstein peut aider à expliquer cette 3^e conclusion?

Figure 6.

Interprétation :

Question 7 : La question DÉFI. Toutes les questions précédentes se rapportent à une analyse à deux variables seulement. Comme vous êtes des élèves doués avec un grand avenir en science, il va sans dire ;-), voici une question relativement difficile où vous devez considérer trois variables en même temps. Comment peut-on expliquer la période orbitale d'une planète (*Orbital Period*) par la distance moyenne étoile-planète (*Semi-Major Axis*), et ce en fonction de la masse d'une étoile (*Mass of a host star*)? Représenter la distribution des points en utilisant les échelles logarithmiques pour la période orbitale et la distance étoile-planète. Afin de mieux cerner l'information, établir pour la distance étoile-planète un minimum de 0.01 et un maximum 9.58; pour la masse du Soleil, un maximum de 3. En plus de la question concernant l'interaction des trois variables (période orbitale d'une planète, distance moyenne étoile-planète, et masse d'une étoile), serais-tu en mesure de relier ton résultat à la théorie de la gravitation d'Einstein?

Figure 7.

Interprétation :

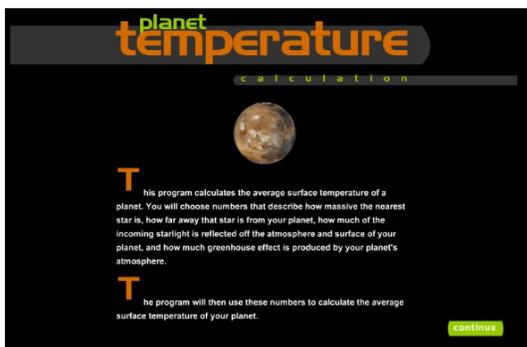
Pour répondre aux prochaines questions il faut se rendre sur le site en Astronomie de l'Université d'Indiana :

<http://www.astro.indiana.edu/gsimonel/temperature1.html>

Ce site professionnel pour astronomes présente une simulation de la température moyenne d'une exoplanète en fonction de quatre variables (que tu as lues dans ta lecture en devoir). En effet, la température de surface d'une planète dépend de :

- 1) *la masse de l'étoile* (plus elle est massive, plus elle est chaude);
- 2) *la distance étoile-planète* (plus elle est proche, plus elle est chaude);
- 3) *l'effet Albédo* (moins les rayons solaires sont réfléchis et retournés dans l'espace, plus la planète est chaude); et
- 4) *l'effet de serre* (plus les gaz favorisant le maintien de la chaleur dans l'atmosphère sont denses, plus la planète est chaude).

La base de données de l'Université d'Indiana est interactive, c'est-à-dire que l'on peut entrer une valeur numérique pour chacune des 4 variables. Ta première tâche est de recréer la planète Terre; cela prouvera bien que le simulateur de température fonctionne. Après, nous allons explorer quelques exoplanètes.



La Figure ci-contre montre la page d'accueil du simulateur de température; après l'avoir lu, cliquer sur continuer (*continue*).



À la page web suivante, il faut entrer la valeur numérique pour la masse du Soleil; entrer **1**, soit **une** fois la masse de notre Soleil (cette variable s'étend de 0.08 à 100 fois la masse de notre Soleil). Cliquer sur suivant (*next*).

distance of your planet to your star

Next, decide how far away from your star your planet will be. The Earth is 1 Astronomical Unit (AU) away from the Sun. Mercury is a little under 0.4 AU away from the Sun. Pluto is around 39.5 AU from the Sun.

Less than 0.01 from a star a planet would likely be so hot that any solid surface would be molten. More than 1000 AU from a star and a planet would receive little, if any, heat from it. You should choose a distance somewhere between 0.01 AU and 1000 AU for your planet.

Enter a number for DISTANCE from 0.01 and 1000 (Earth's distance = 1)

[intro](#) [mass](#) [distance](#) [bond albedo](#) [greenhouse effect](#) [review](#)

Ensuite, il faut entrer la distance planète-étoile; entrer **1**, soit **une** fois la distance Soleil-Terre (cette variable s'étend de 0.01 à 1000 fois la distance Soleil-Terre). Cliquer sur suivant (*next*).

bond albedo of your planet

Next you have to decide how much of the solar energy that reaches your planet gets reflected back into space. Energy reflected back into space does not heat your planet. The amount of energy a planet reflects depends on the composition of its atmosphere (if it has one) and whether it has a mostly rocky, watery or icy surface.

Dark rocks reflect very little energy, around 3% of the total energy they receive. Ice reflects a lot back, usually over 50%. Water reflects about 25%. Altogether, the Earth's surface and clouds reflect about 29% of the incoming sunlight back into space. This is called "BOND ALBEDO." The higher the Bond albedo, the more starlight is reflected by the planet. You need to decide the percent of starlight that your planet reflects back into space. Since this is a percent, you should choose a number between 0 (no starlight reflected) and 100 (all of the starlight reflected). You do not need to enter the percent sign.

Enter a number for BOND ALBEDO between 0 and 100 (Earth=29)

[intro](#) [mass](#) [distance](#) [bond albedo](#) [greenhouse effect](#) [review](#)

Il faut entrer l'effet Albédo, soit la proportion de rayonnement solaire qui est réfléchi par l'atmosphère de la Terre (29%) et retournée dans l'espace; entrer **29**. Cliquer sur suivant (*next*).

greenhouse effect of your planet

Finally, you have to decide how much infrared radiation, what you experience as "heat" when you warm your hands by a fire, is absorbed by the greenhouse gases in your planet's atmosphere. The more greenhouse gases in your atmosphere, the more the temperature of your planet will increase. If we say that Earth has a GREENHOUSE EFFECT factor of 1, then Venus would have a factor of around 280. A planet without any atmosphere would have a greenhouse factor of 0, meaning that there is no greenhouse effect. In theory, there is no upper limit, but it is hard to imagine a planet with a greenhouse factor much above 500. You should choose a number from 0 to 500 to represent how much heat is trapped in your planet's atmosphere by greenhouse gases.

Enter a number for GREENHOUSE EFFECT between 0 and 500 (Earth=1)

[intro](#) [mass](#) [distance](#) [bond albedo](#) [greenhouse effect](#) [review](#)

Enfin, il faut entrer la valeur pour l'effet de serre, soit la proportion de chaleur qui est retenue par l'atmosphère de la Terre; entrer **1**, soit **une** fois la valeur sur la Terre (cette variable s'étend de 0 à 500 fois la Terre). Cliquer sur suivant (*next*).

you have **entered:**

MASS between 0.08 and 100 (Earth = 1)

DISTANCE from 0.1 to 1000 (Earth = 1)

BOND ALBEDO between 0 and 100 (Earth=29)

GREENHOUSE EFFECT between 0 and 500 (Earth=1)

[intro](#) [mass](#) [distance](#) [bond albedo](#) [greenhouse effect](#) [calculate](#)

La page suivante te permet de vérifier que l'information que tu as entrée est la bonne. Tu devrais voir les valeurs 1, 1, 29 et 1 à l'écran (dans cet ordre). Si ce n'est pas le cas corriger, sinon cliquer sur calculer (*calculate*).

Le simulateur estime la température moyenne de l'exoplanète. Quelle est la température moyenne de la planète Terre?

Si tu obtiens 15 °C, excellent. Remarquer que le simulateur donne une estimation de la vie totale de l'étoile. Dans notre cas, le simulateur affiche 10 milliards d'années, ce qui équivaut bel et bien à la durée de vie de notre Soleil telle qu'estimée par les Astronomes.

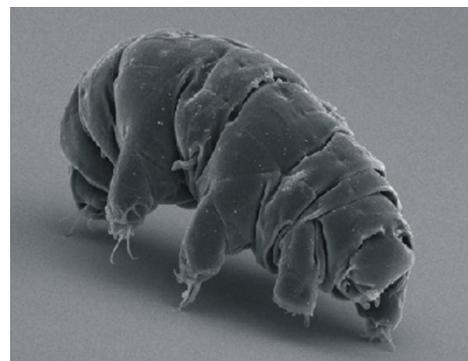
Question 8. L'exoplanète GJ 1132b a été découverte en 2015. Elle mesure 1.15 fois le rayon de la Terre et elle est située à une distance de 0.0154 UA de son Soleil, duquel elle prend 1.6 jours à faire une révolution complète. L'étoile est tout petite ! Elle a une masse estimée à 0.181 fois celle de notre Soleil. En assumant que l'effet Albédo et l'effet de serre sont identiques à la Terre, cette exoplanète est-elle –en théorie– habitable à sa surface?

Réponse :

Question 9. L'exoplanète KIC 6436029b a été découverte en 2014. Elle mesure 3 fois le rayon de la Terre et elle est située à une distance de 1.15 UA de son Soleil, duquel elle prend 505 jours à faire une révolution complète. L'étoile a une masse estimée à 0.79 fois celle de notre Soleil. En assumant que l'effet Albédo et l'effet de serre sont identiques à la Terre, cette exoplanète est-elle –en théorie– habitable à la surface de cette exoplanète?

Réponse :

Question 10. La forme de vie qui a supporté la température record la plus élevée sur la Terre est une bactérie et elle s'appelle *Geogemma barossii* (Kashefi and Lovley, 2003). Elle se reproduit (division cellulaire –mitose) jusqu'à une température de 121 °C. À 130 °C, elle ne se reproduit plus, mais elle vit encore et se reproduit à nouveau si la température baisse. La température la plus basse appartient encore à l'infiniment petit, et le microbe peut vivre à une température aussi basse que -18 °C. La Figure ci-contre montre un *tardigrade*. Il peut survivre quelques minutes à 151 °C (Horikawa, 2012), survivre 30 ans à -20 °C (Tsujiimoto, Imura, and Kanda, 2016), survivre quelques minutes à -272 °C (Becquerel, 1950), et quelques jours à -200 °C (Horikawa, 2012).



Le Tableau suivant présente un système extrasolaire absolument fascinant ! Il a été découvert en 2013 par la méthode du transit (voir la lecture en devoir). Ce système solaire comprend... **sept** planètes. Le Soleil de ce système, *Kepler-90*, a une masse estimée à 1.13 fois celle de notre propre Soleil. Laquelle ou lesquelles des exoplanètes représentent un potentiel écologiquement habitable parmi la liste ci-dessous? Compléter la colonne de droite du Tableau et inscrire ta réponse finale ci-dessous en considérant la survie des formes de vie terrestre aux températures extrêmes.

Nom de l'exoplanète	Rayon de l'exoplanète (R_{Terre})	Période orbitale (jours)	Distance orbitale (UA)	Température estimée (° Celsius)
Kepler-90 b	1.31	7.0	0.074	
Kepler-90 c	1.19	8.7	0.089	
Kepler-90 d	2.88	59.7	0.32	
Kepler-90 e	2.67	91.9	0.42	
Kepler-90 f	2.89	124.9	0.48	
Kepler-90 g	8.13	210.6	0.71	
Kepler-90 h	11.3	331.6	1.01	

Réponse finale :

Question 11 : DÉFI. Lequel des deux facteurs, la masse du Soleil ou la distance étoile-planète, est le plus important lorsque vient le temps de déterminer la température moyenne d'une exoplanète? Pour y répondre, voici comment il t'est suggéré de procéder. Dans un premier temps, il faut doubler la masse du Soleil, mais tout en gardant les mêmes valeurs –que la planète Terre– pour les 3 autres facteurs. Noter la température moyenne de l'exoplanète. Répéter le calcul mais cette fois-ci en divisant la distance étoile-planète en deux, tout en gardant les 3 autres facteurs stables –identiques à la Terre. Comparer les deux températures moyennes. Lequel des deux facteurs affecte le plus la température moyenne d'une exoplanète : la masse de son Soleil ou la distance entre elle-même et son Soleil?

Réponse :

Question 12 : DÉFI. Tu peux voir à l'écran une animation réaliste de l'exoplanète HD 33636b qui orbite à la fois au sein de la zone habitable et à l'extérieur de celle-ci. En considérant que 1) des microbes vivent en-dessous de la calotte glaciaire à $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ en Antarctique (Murray et al., 2012), et 2) des bactéries gelées dans de la glace depuis 32 000 ans en Arctique ont repris vie en réchauffant l'eau (Pikuta et al., 2005), que pourrais-tu dire de la possibilité d'une forme de vie dans un tel contexte astronomique?



Réponse :

ANNEXE F : CORRIGÉ DU DOCUMENT *WORD* UTILISÉ PAR L'ÉLÈVE LORS DES 2^E ET 3^E PÉRIODES DU LABORATOIRE

(Pendant le questionnement des bases de données interactives en Astronomie)

LA VARIABILITÉ DES SYSTÈMES EXTRASOLAIRES

Activité préparée par

Alain Houle, PhD.

Université de Sherbrooke – 21 décembre 2017

Probabilité de vie extraterrestre selon le nombre d'étoiles dans le système solaire (caricature courtoisie de Mason, Zuluaga, Cuartas et Clark, 2013).



INSTRUCTIONS :

1. Se mettre en équipe de 2 personnes. Chaque élève accède à l'*Encyclopédie des Planètes Extrasolaires* à l'adresse suivante : <http://exoplanet.eu/diagrams/>.
2. Répondre aux questions directement à l'intérieur du présent document. Cliquer sur « *Save Figure* » pour sauvegarder ton graphique dans ton dossier numérique (Moodle ou autre réseau). Choisir la résolution 840 x 600 px. Tu peux également utiliser simplement la fonction *copier-coller*.
3. Chaque question implique 3 réponses : ton analyse graphique, un titre au graphique et l'interprétation du graphique. Insérer tes réponses à l'endroit approprié (dans le tableau tout de suite après la question). Pour ce faire, cliquer dans ton fichier *Word* à l'endroit exacte où tu veux inscrire ta réponse → cliquer dans le menu *Insertion* → *Images* → sélectionner le fichier graphique que tu as sauvegardé au préalable → cliquer sur *Insérer*. Ajuster la taille du graphique afin de respecter la largeur du Tableau. Ajouter Titre et Interprétation. Sauvegarder ton fichier au fur et à mesure que tu progresses dans ton labo.
4. Poster avant la fin du cours ton document à l'adresse courriel suivante : alainhoule2@usherbrooke.ca. **Ne pas oublier d'inscrire ton nom et ton groupe.**

RAPPEL 1 : Dans une analyse graphique (comme dans une régression linéaire), c'est la variable *X* qui prédit la variable *Y*, et non l'inverse.

RAPPEL 2 : Les données scientifiques sur ce site web professionnel sont réelles et chaque point dans le graphique équivaut à une exoplanète dont l'existence a été *confirmée*.

Pour répondre aux questions, il faut entrer les variables X et Y dans les menus appropriés de la page web. Étant donné que le site web est en anglais, le nom de chaque variable t'est donné en français et en anglais. Une fois ton graphique sauvegardé dans ton espace numérique, ne pas oublier de l'insérer au bon endroit dans le présent document et surtout de l'interpréter : que vois-tu dans cette analyse mathématique? Que sait-on de l'habitabilité des systèmes extrasolaires découverts à ce jour par les Astronomes?

Question 1. Comment la distance entre une planète et son étoile (*Semi-Major Axis*) prédit elle le temps que prend cette planète à faire le tour de son étoile (*Orbital Period*)? Afin de mieux répartir les points dans la Figure, choisir l'échelle logarithmique (*log scale*) pour les deux variables. Un exemple de titre au graphique et d'interprétation possible sont donnés pour cette question (mes attentes); à toi d'y ajouter le graphique.

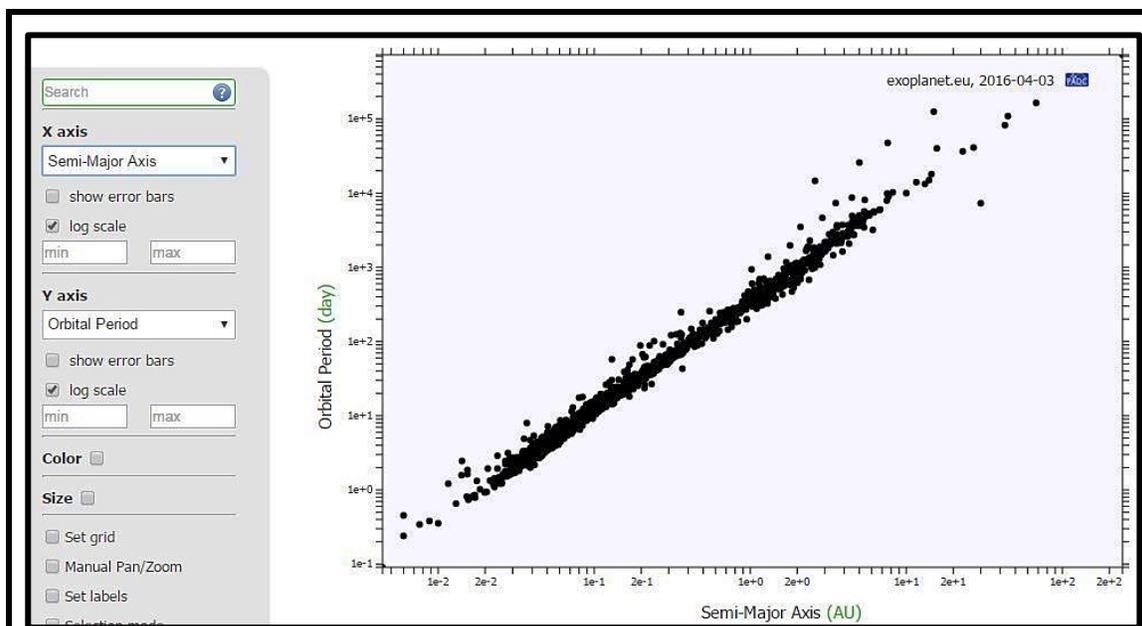


Figure 24. Période orbitale en fonction de la distance moyenne étoile-planète.

Interprétation : La relation mathématique entre les deux variables est linéaire, positive et très forte, c'est-à-dire que plus la planète en moyenne est éloignée de son Soleil, plus elle a besoin de temps en moyenne pour faire une révolution complète autour de son Soleil, et cela est vrai pour l'ensemble des exoplanètes.

Question 2. Est-ce que la masse d'une étoile (*Mass of a host star*) peut prédire la température à la surface d'une exoplanète (*Calculated temperature*)? Afin de mieux voir la relation, ne pas choisir les échelles logarithmiques (les deux cases sont décochées), établir la valeur minimum de la masse de l'étoile à « 0.5 » et la valeur maximale à « 2.0 », soit respectivement la moitié et deux fois la masse de notre Soleil.

Question 2a) La relation mathématique est-elle positive, négative ou neutre? 2b) S'il y a une relation, est-elle faible ou forte? 2c) Comment interprète-on les exceptions, par exemple les 3 exoplanètes situées en bas et complètement à droite du graphique? 2d) Serais-tu capable d'identifier la zone du graphique là où les exoplanètes sont –en théorie– habitables?

Rappel : $0\text{ }^{\circ}\text{K} = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$.

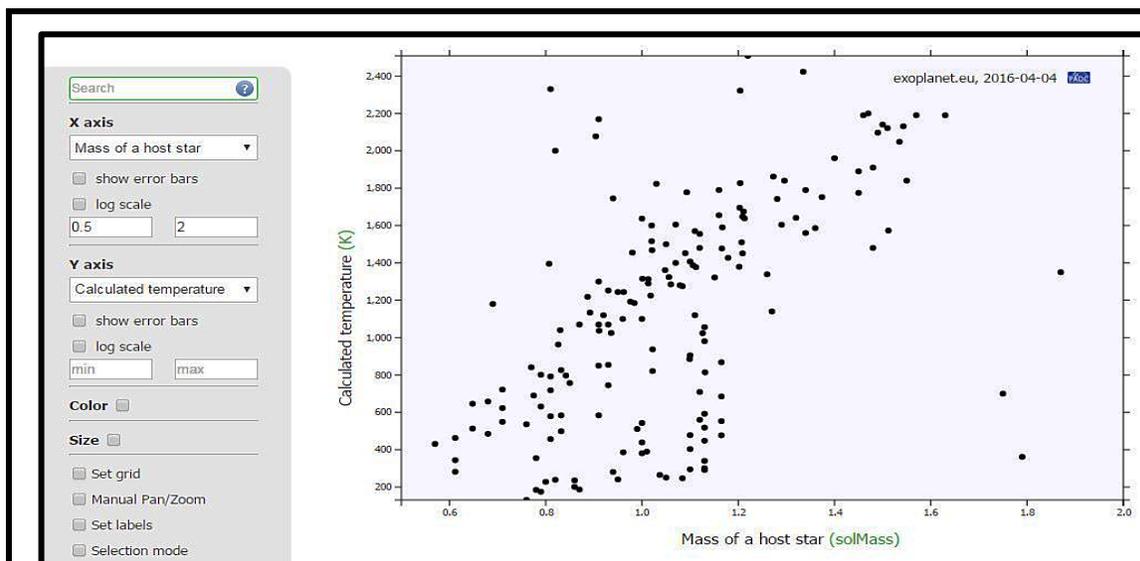


Figure 25. Température à la surface d'une exoplanète en fonction de la masse de son Soleil.

Interprétation : La relation est positive, c'est-à-dire que plus la masse moyenne du Soleil est grande, plus la température moyenne à la surface de la planète extrasolaire est élevée. Toutefois, la relation n'est pas aussi forte que la précédente et il existe beaucoup de variations d'un système solaire à l'autre. Par exemple, les trois étoiles à droite du graphique ont une masse élevée de 1.8 fois celle de notre Soleil, et pourtant la température de leur planète respective varie énormément, de 5 100 °K à 8 700 °K à sa surface. Cela est probablement associé à l'âge de l'étoile : les grosses mais vieilles étoiles ont peu d'énergie. Les planètes théoriquement habitables sont celles situées en-dessous de 375 °K.

Question 3. Est-ce que la masse d'un Soleil (*Mass of a host star*) peut prédire son rayon (*Radius of a host star*)? Choisir les échelles logarithmiques pour les deux variables. La relation est-elle linéaire, exponentielle ou asymptotique? Interpréter ce que vous voyez.

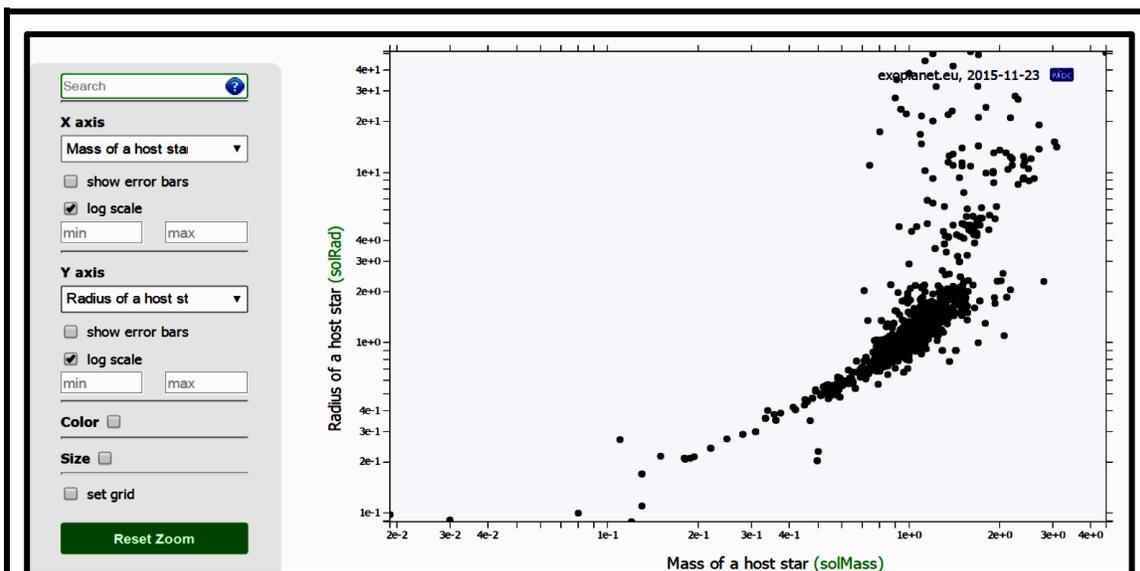


Figure 26. Rayon d'une étoile en fonction de sa masse.

Interprétation : La relation mathématique est positive et exponentielle. Si une étoile est massive, elle est généralement grande, mais ce n'est pas toujours le cas : en effet, il semble y avoir une masse maximale pour les étoiles (environ trois fois la masse de notre Soleil, au-delà de laquelle elles grossissent plus vite que leurs masses (en haut à droite du graphique).

Question 4. Quelle est la probabilité de trouver une exoplanète (« *Frequency* ») en fonction de sa masse (*Planetary Mass (Mearth)*)? Pour répondre à cette question, il faut construire un histogramme, aussi appelé diagramme à bandes (*Histogram plot* → en haut et à droite de l'écran). Indiquer 100 barres (*Number of bins*) et s'assurer que les unités pour la masse de l'exoplanète sont en nombre de fois la masse de la Terre (*Mearth*).

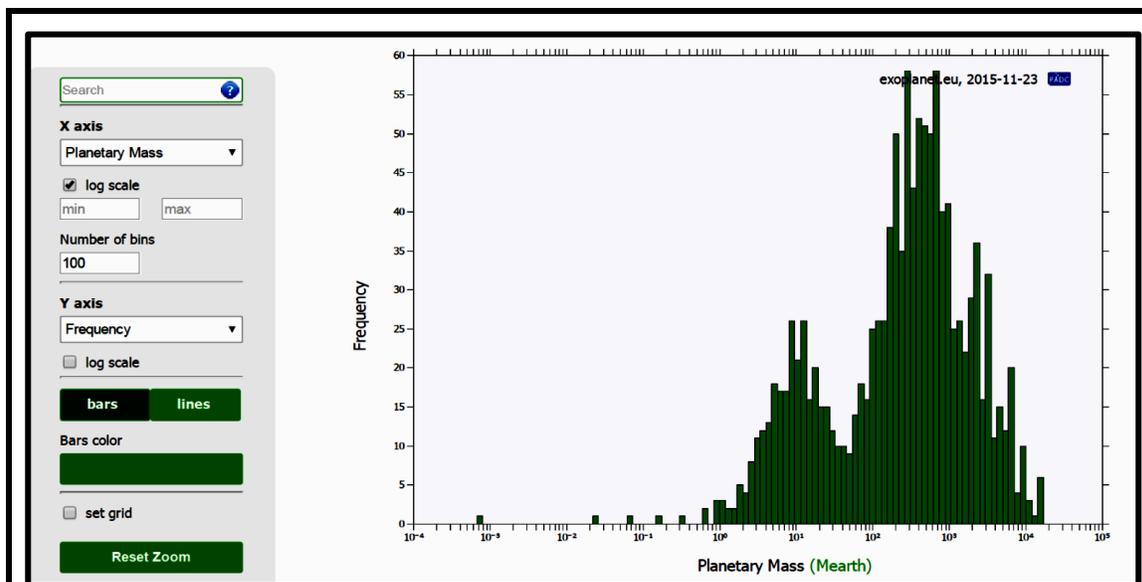


Figure 27. Probabilité de trouver une exoplanète en fonction de sa masse.

Interprétation : La grande majorité des exoplanètes découvertes à ce jour sont grosses comme Neptune (les « super-Terres » côté gauche) ou Jupiter (les planètes gazeuses côté droit). Les exoplanètes de taille similaire à la Terre sont rares pour le moment, mais de plus en plus détectées. Est-il possible que les petites exoplanètes sont plus difficiles à détecter? La prochaine question tente d'y répondre.

Question 5. Est-ce que les petites exoplanètes sont plus difficiles à détecter que les grosses? Pour répondre à cette question, construire un nuage de points (*Scatter plot* → en haut et à droite de l'écran) qui présente l'année de découverte de l'exoplanète (*Year of Discovery*) en fonction du rayon des exoplanètes (*Planetary Radius*). Utiliser l'échelle logarithmique pour le rayon des planètes mais pas pour l'année de découverte. Pour l'année, sélectionner de 1994 à 2018; cela aura pour effet de mieux centrer les points dans la Figure. Repérer la masse de la Terre (*Rearth* : la valeur 1e+0). Est-ce que les petites exoplanètes sont effectivement plus difficiles à détecter que les grosses?

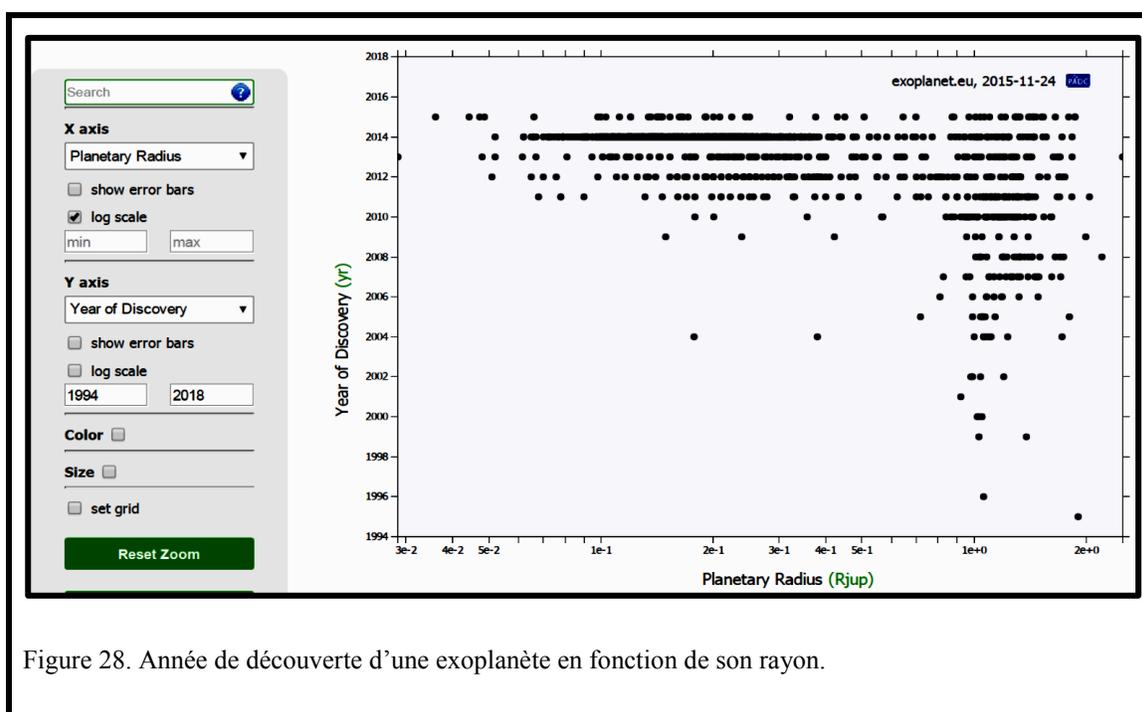
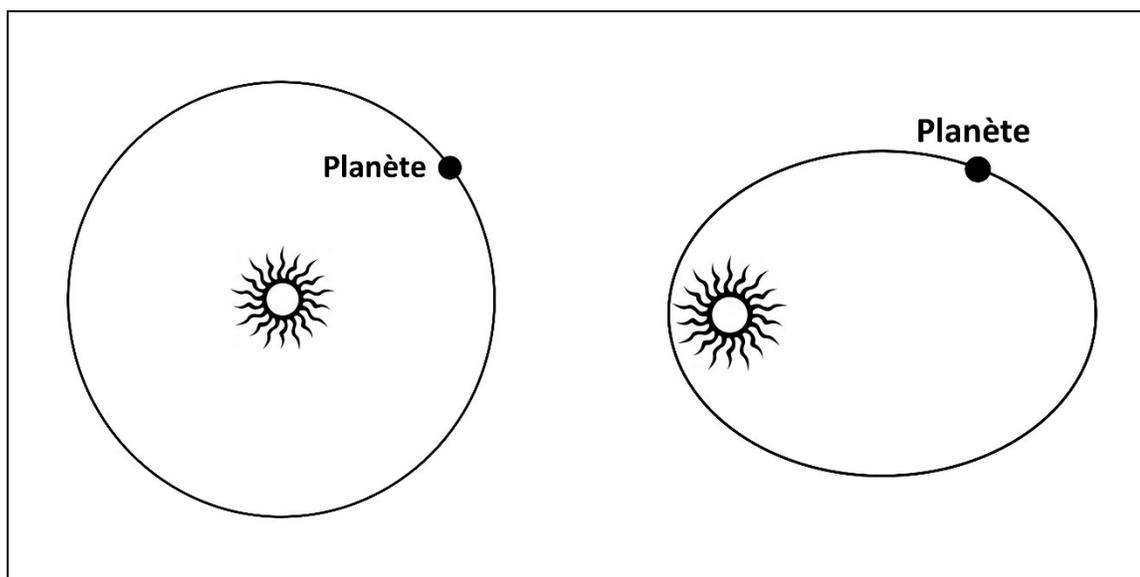


Figure 28. Année de découverte d'une exoplanète en fonction de son rayon.

Interprétation : Les petites exoplanètes (à gauche du graphique) sont plus difficiles à détecter que les grosses (à droite), probablement parce qu'elles diminuent plus faiblement la luminosité de leur Soleil lors du transit, ou parce qu'elles interfèrent peu dans la déviation de leur Soleil puisque leur effet gravitationnel est faible, ou encore elles sont plus difficiles à photographier parce qu'elles reflètent moins de lumière. Les télescopes modernes sont plus puissants, permettant aux Astronomes de détecter les exoplanètes les plus petites. Plus précisément, on voit que, si les premières exoplanètes découvertes avant l'an 2008 sont grosses comme Jupiter (la valeur 1e+0 sur la Figure), celles découvertes par la suite sont en moyenne plus petites.

Question 6 : DÉFI. La distance moyenne étoile-planète (*Semi-Major Axis*) peut-elle affecter l'excentricité des planètes (*Orbital Eccentricity*)? L'excentricité est une mesure qui détermine si la planète orbite autour de son Soleil en forme de cercle parfait (avec son Soleil située en plein centre de l'orbite, voir Figure de gauche ci-dessous), ou si au contraire la planète est désaxée sur son orbite par rapport à son Soleil, c'est-à-dire qu'elle passe très près de son étoile pour s'en éloigner par la suite, et revenir tout près de son étoile encore une fois à la révolution suivante et ainsi de suite (Figure de droite).



Lorsque la planète orbite comme un cercle parfait, on lui donne une valeur d'excentricité de 0.0, alors que l'excentricité maximale obtient une valeur maximale de 1.0. Afin de mieux distribuer les données dans le nuage de points, utiliser l'échelle logarithmique pour la distance moyenne étoile-planète, avec une valeur minimale de 0.03 et une valeur maximale de 9.6, et utiliser l'échelle régulière pour l'excentricité avec une valeur minimale de -0.1 (sans valeur maximale). Tu devrais normalement trouver trois éléments de réponse (3 conclusions) à cette question *défi*. Voici un indice pour la 3^e conclusion : « Pourquoi est-ce que les exoplanètes excentriques proches de leur étoile n'existent pas? » Comment la Théorie de la Relativité d'Einstein peut aider à expliquer cette 3^e conclusion?

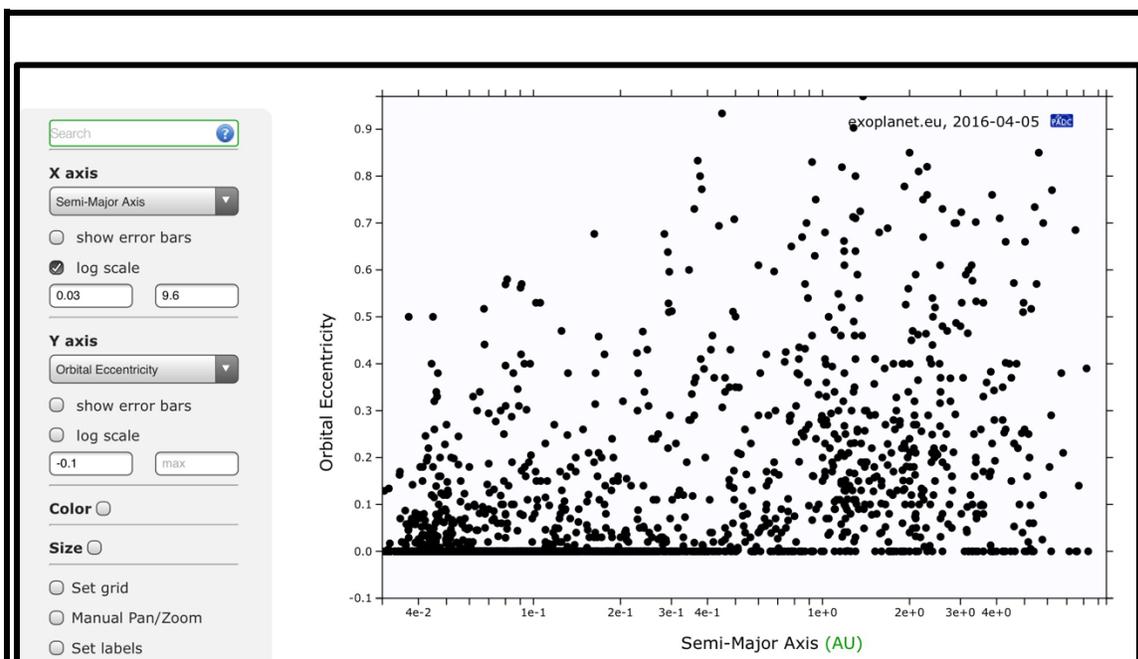


Figure 29. Excentricité des planètes (*Orbital Eccentricity*) en fonction de la distance moyenne avec son étoile (*Semi-Major Axis*).

Interprétation : De cette analyse, on trouve trois éléments de réponse.

Conclusion 1 : la très grande majorité des exoplanètes ont une excentricité très près de 0 (zéro), c'est-à-dire qu'elles tournent autour de leurs étoiles avec une orbite formant un cercle presque parfait.

Conclusion 2 : en revanche, certaines exoplanètes ont une excentricité très élevée, c'est-à-dire que leur orbite forme une ellipse et un côté de cette orbite elliptique est située relativement proche de son étoile, et ce peu importe leur distance moyenne étoile-planète.

Conclusion 3 : les astronomes n'ont toutefois pas trouvé d'exoplanètes présentant à la fois une excentricité élevée (> 0.5) et une petite distance de son étoile (< 0.3 unité astronomique), soit en haut et à gauche du graphique.

L'élève est appelé ici à faire le lien entre cette analyse et la théorie de la gravité d'Einstein : la déformation de l'espace causée par la masse énorme de l'étoile favorise l'exoplanète excentrique à s'écraser sur son étoile! Cette hypothèse est soulevée à la question suivante.

Question 7 : DÉFI. Toutes les questions précédentes se rapportent à une analyse à deux variables seulement. Comme vous êtes des élèves doués avec un grand avenir en science, il va sans dire ;-), voici une question relativement difficile où vous devez considérer trois variables en même temps. Comment peut-on expliquer la période orbitale d'une planète (*Orbital Period*) par la distance moyenne étoile-planète (*Semi-Major Axis*), et ce en interaction avec la masse d'une étoile (*Mass of a host star*)? Afin de mieux représenter la distribution des points, utiliser les échelles logarithmiques pour la période orbitale et la distance étoile-planète. Afin de mieux cerner l'information, établir pour la distance étoile-planète un minimum de 0.01 et un maximum 9.58; pour la masse du Soleil, un maximum de 3. Utiliser la fonction couleur (*Color*) pour représenter la 3^e variable. En plus de la question concernant l'interaction des trois variables (période orbitale d'une planète, distance moyenne étoile-planète, et masse d'une étoile), serais-tu en mesure de relier ton résultat à la théorie de la gravitation d'Einstein?

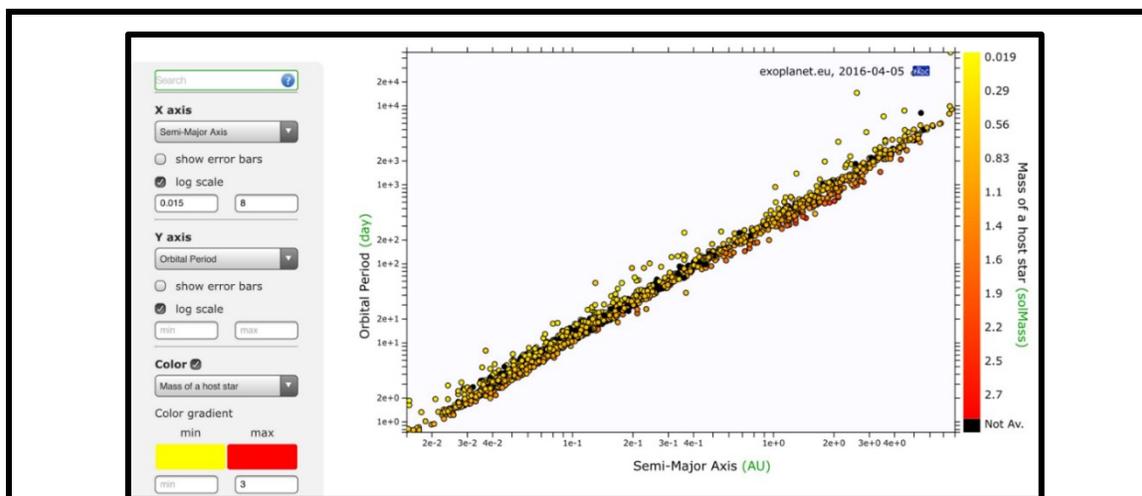


Figure 30. Variations de la période orbitale par la distance moyenne étoile-planète en fonction de la masse solaire.

Interprétation : Les Soleils légers en jaune sont distribués partout sur la régression. Cela suggère que la distance moyenne étoile-planète prédit très bien le temps que prend cette planète à compléter une révolution (période orbitale), mais seulement pour les systèmes extrasolaires impliquant des étoiles légères. Les points rougeâtres en haut à droite de la Figure suggèrent que les exoplanètes orbitant autour des très gros Soleils ont tendance à être éloignées de leur étoile respective; il est possible que les exoplanètes trop proches d'étoiles géantes s'écrasent rapidement sur leur Soleil et ne survivent pas longtemps à l'échelle cosmique. La théorie de la gravité d'Einstein suggère que la déformation de l'espace causée par la masse énorme de l'étoile favorise l'exoplanète (orbite circulaire ou excentrique) tend à s'écraser sur son étoile. Cette question est en quelque sorte complémentaire à la question précédente. Les exoplanètes proches des gros Soleils tombent rapidement sur leur étoile, et cela est encore plus vrai pour les planètes excentriques.

Pour répondre aux prochaines questions il faut se rendre sur le site en Astronomie de l'Université d'Indiana :

<http://www.astro.indiana.edu/gsimonel/temperature1.html>

Ce site professionnel pour astronomes présente une simulation de la température moyenne d'une exoplanète en fonction de quatre variables (que tu as révisées dans ta lecture en devoir). En effet, la température de surface d'une planète dépend de :

- 1) *la masse de l'étoile* (plus le Soleil est massif, plus la planète est chaude);
- 2) *la distance étoile-planète* (plus la planète est proche, plus elle est chaude);
- 3) *l'effet Albédo* (moins les rayons solaires sont réfléchis et retournés dans l'espace, plus la planète est chaude); et enfin
- 4) *l'effet de serre* (plus les gaz favorisant le maintien de la chaleur dans l'atmosphère sont denses, plus la planète est chaude).

La base de données de l'Université d'Indiana est interactive, c'est-à-dire que l'on peut entrer une valeur numérique pour chacune des 4 variables. Ta première tâche est de recréer la planète Terre; cela prouvera bien que le simulateur de température fonctionne. Après quoi, nous allons explorer quelques planètes extrasolaires.



La Figure ci-contre montre la page d'accueil du simulateur de température; après l'avoir lu, cliquer sur continuer (*continue*).



À la page web suivante, il faut entrer la valeur numérique pour la masse du Soleil; entrer **1**, soit **une** fois la masse de notre Soleil (cette variable s'étend de 0.08 à 100 fois la masse de notre Soleil). Cliquer sur suivant (*next*).

distance of your planet to your star

Next, decide how far away from your star your planet will be. The Earth is 1 Astronomical Unit (AU) away from the Sun. Mercury is a little under 0.4 AU away from the Sun. Pluto is around 39.5 AU from the Sun.

Less than 0.01 from a star a planet would likely be so hot that any solid surface would be molten. More than 1000 AU from a star and a planet would receive little, if any, heat from it. You should choose a distance somewhere between 0.01 AU and 1000 AU for your planet.

Enter a number for DISTANCE from 0.01 and 1000 (Earth's distance = 1)

Ensuite, il faut entrer la distance planète-étoile; entrer **1**, soit **une** fois la distance Soleil-Terre (cette variable s'étend de 0.01 à 1000 fois la distance Soleil-Terre). Cliquer sur suivant (*next*).

bond albedo of your planet

Next you have to decide how much of the solar energy that reaches your planet gets reflected back into space. Energy reflected back into space does not heat your planet. The amount of energy a planet reflects depends on the composition of its atmosphere (if it has one) and whether it has a mostly rocky, watery or icy surface.

Dark rocks reflect very little energy, around 3% of the total energy they receive. Ice reflects a lot back, usually over 50%. Water reflects about 25%. Altogether, the Earth's surface and clouds reflect about 29% of the incoming sunlight back into space. This is called "BOND ALBEDO." The higher the Bond albedo, the more starlight is reflected by the planet. You need to decide the percent of starlight that your planet reflects back into space. Since this is a percent, you should choose a number between 0 (no starlight reflected) and 100 (all of the starlight reflected). You do not need to enter the percent sign.

Enter a number for BOND ALBEDO between 0 and 100 (Earth=29)

Il faut entrer l'effet Albédo, soit la proportion de rayonnement solaire qui est réfléchi par l'atmosphère de la Terre (29%) et retournée dans l'espace; entrer **29**. Cliquer sur suivant (*next*).

greenhouse effect of your planet

Finally, you have to decide how much infrared radiation, what you experience as "heat" when you warm your hands by a fire, is absorbed by the greenhouse gases in your planet's atmosphere. The more greenhouse gases in your atmosphere, the more the temperature of your planet will increase. If we say that Earth has a GREENHOUSE EFFECT factor of 1, then Venus would have a factor of around 280. A planet without any atmosphere would have a greenhouse factor of 0, meaning that there is no greenhouse effect. In theory, there is no upper limit, but it is hard to imagine a planet with a greenhouse factor much above 500. You should choose a number from 0 to 500 to represent how much heat is trapped in your planet's atmosphere by greenhouse gases.

Enter a number for GREENHOUSE EFFECT between 0 and 500 (Earth=1)

Enfin, il faut entrer la valeur pour l'effet de serre, soit la proportion de chaleur qui est retenue par l'atmosphère de la Terre; entrer **1**, soit **une** fois la valeur sur la Terre (cette variable s'étend de 0 à 500 fois la Terre). Cliquer sur suivant (*next*).

you have **entered:**

MASS between 0.08 and 100 (Earth = 1)

DISTANCE from 0.1 to 1000 (Earth = 1)

BOND ALBEDO between 0 and 100 (Earth=29)

GREENHOUSE EFFECT between 0 and 500 (Earth=1)

La page suivante te permet de vérifier que l'information que tu as entrée est la bonne. Tu devrais voir les valeurs 1, 1, 29 et 1 à l'écran (dans cet ordre). Si ce n'est pas le cas corriger, sinon cliquer sur calculer (*calculate*).

Le simulateur estime la température moyenne de l'exoplanète. Quelle est la température moyenne de la planète Terre?

Si tu obtiens 15°C , excellent. Remarque que le simulateur donne une estimation de la vie totale de l'étoile. Dans notre cas, le simulateur affiche 10 milliards d'années, ce qui équivaut bel et bien à la durée de vie de notre Soleil telle qu'estimée par les Astronomes.

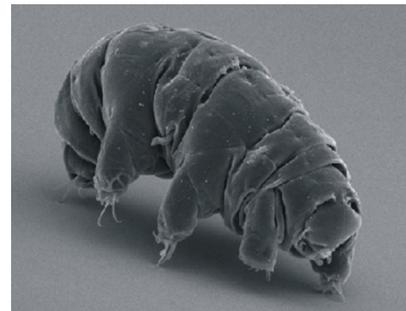
Question 8. L'exoplanète GJ 1132b a été découverte en 2015. Elle mesure 1.15 fois le rayon de la Terre et elle est située à une distance de 0.0154 UA de son Soleil, duquel elle prend 1.6 jours à faire une révolution complète. L'étoile est tout petite ! Elle a une masse estimée à 0.181 fois celle de notre Soleil. En assumant que l'effet Albédo et l'effet de serre sont identiques à la Terre, cette exoplanète est-elle –en théorie– habitable à sa surface?

Réponse : Non. La température moyenne de l'exoplanète GJ 1132b s'élève à 370°C .

Question 9. L'exoplanète KIC 6436029b a été découverte en 2014. Elle mesure 3 fois le rayon de la Terre et elle est située à une distance de 1.15 UA de son Soleil, duquel elle prend 505 jours à faire une révolution complète. L'étoile a une masse estimée à 0.79 fois celle de notre Soleil. En assumant que l'effet Albédo et l'effet de serre sont identiques à la Terre, cette exoplanète est-elle –en théorie– habitable à la surface de cette exoplanète?

Réponse : Non. La température moyenne de l'exoplanète KIC 6436029b s'élève à -48°C .

Question 10. La forme de vie qui a supporté la température record la plus élevée sur la Terre est une bactérie et elle s'appelle *Geogemma barossii* (Kashefi and Lovley, 2003). Elle se reproduit (division cellulaire –mitose) jusqu'à une température de 121 °C. À 130 °C, elle ne se divise plus, mais elle survit et se reproduit à nouveau si la température baisse. La température la plus basse appartient encore à l'infiniment petit, et le microbe le plus résistant au froid peut vivre à une température aussi basse que -13 °C (Murray et al., 2012). La Figure ci-contre montre un *tardigrade*. Il peut survivre quelques minutes à 151 °C (Horikawa, 2012), survivre 30 ans à -20 °C (Tsujiimoto et al., 2016), survivre quelques minutes à -272 °C (Becquerel, 1950), et quelques jours à -200 °C (Horikawa, 2012).



Le Tableau suivant présente un système extrasolaire absolument fascinant ! Il a été découvert en 2013 par la méthode du transit. Ce système solaire comprend... **sept** planètes. Le Soleil de ce système, *Kepler-90*, a une masse estimée à 1.13 fois celle de notre propre Soleil. Laquelle ou lesquelles des exoplanètes représentent un potentiel écologiquement habitable parmi la liste ci-dessous? Compléter la colonne de droite du Tableau en assumant que les effets Albédo et de serre sont identiques à la Terre. Inscrire ta réponse finale ci-dessous en considérant la survie des formes de vie terrestre aux températures extrêmes.

Nom de l'exoplanète	Rayon de l'exoplanète (R_{Terre})	Période orbitale (jours)	Distance orbitale (UA)	Température estimée ($^{\circ}$ Celsius)
Kepler-90 b	1.31	7.0	0.074	886 °C
Kepler-90 c	1.19	8.7	0.089	784 °C
Kepler-90 d	2.88	59.7	0.32	284 °C
Kepler-90 e	2.67	91.9	0.42	213 °C
Kepler-90 f	2.89	124.9	0.48	182 °C
Kepler-90 g	8.13	210.6	0.71	101 °C
Kepler-90 h	11.3	331.6	1.01	41 °C

Réponse finale : Les exoplanètes Kepler-90 g et Kepler-90 h sont potentiellement habitables pour deux raisons : elles permettent –en théorie– d'y trouver de l'eau sous forme liquide en plus d'y offrir une température en-deçà des limites extrêmes des formes de vie terrestre.

Question 11 : DÉFI. Lequel des deux facteurs, la masse du Soleil ou la distance étoile-planète, est le plus important lorsque vient le temps de déterminer la température moyenne d'une exoplanète? Pour y répondre, voici comment il t'est suggéré de procéder. Dans un premier temps, il faut doubler la masse du Soleil tout en gardant les mêmes valeurs –que la planète Terre– pour les 3 autres facteurs. Noter la température moyenne de l'exoplanète. Répéter le calcul mais cette fois-ci en divisant la distance étoile-planète en deux, tout en gardant les 3 autres facteurs identiques à la Terre. Comparer les deux températures moyennes. Lequel des deux facteurs affecte le plus la température moyenne d'une exoplanète : la masse de son Soleil ou la distance entre elle-même et son Soleil?

Réponse : Si l'on double la masse de l'étoile et que les 3 autres facteurs sont fixes par rapport à la Terre, on obtient une température moyenne de 211 °C.

MASS between 0.08 and 100 (Earth = 1)

DISTANCE from 0.1 to 1000 (Earth = 1)

BOND ALBEDO between 0 and 100 (Earth=29)

GREENHOUSE EFFECT between 0 and 500 (Earth=1)

mass distance bond albedo greenhouse effect calculate

mass: 2 distance: 1 bond albedo: 29 greenhouse effect: 1

Your **star** has a life cycle of about 2,500,000,000 years

The average **surface temperature** on your planet is 484 degrees Kelvin

211 degrees Celsius

412 degrees Fahrenheit

This is above the boiling point of water on Earth.

The Earth's oceans would boil away (107 C)

return

Si l'on divise par deux la distance étoile-planète et que les 3 autres facteurs sont fixes, on obtient une température moyenne de 134 °C.

MASS between 0.08 and 100 (Earth = 1)

DISTANCE from 0.1 to 1000 (Earth = 1)

BOND ALBEDO between 0 and 100 (Earth=29)

GREENHOUSE EFFECT between 0 and 500 (Earth=1)

mass distance bond albedo greenhouse effect calculate

mass: 1 distance: 0.5 bond albedo: 29 greenhouse effect: 1

Your **star** has a life cycle of about 10,000,000,000 years

The average **surface temperature** on your planet is 407 degrees Kelvin

134 degrees Celsius

273 degrees Fahrenheit

This is above the boiling point of water on Earth.

The Earth's oceans would boil away (107 C)

return

Les résultats suggèrent que la masse solaire détermine plus fortement la température moyenne d'une exoplanète que la distance étoile-planète. En effet, si la température moyenne de la Terre est de 15 °C, cela signifie que raccourcir la distance-étoile de 50% fait augmenter la température de la planète de 9 fois (134 °C), alors qu'en doublant la masse du Soleil, la température de la planète devient 14 fois plus chaude que la Terre (211 °C).

Question 12 : DÉFI. Tu peux voir à l'écran une animation réaliste de l'exoplanète HD 33636b qui orbite à la fois au sein de la zone habitable et à l'extérieur de celle-ci. En considérant que 1) des microbes vivent en-dessous de la calotte glaciaire à $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ en Antarctique (Murray et al., 2012), et 2) des bactéries gelées dans de la glace depuis 32 000 ans en Arctique ont repris vie en réchauffant l'eau (Pikuta et al., 2005), crois-tu que la vie pourrait en théorie apparaître sur cette exoplanète et y survivre et se reproduire?



Réponse : Question DÉFI à la fin de la 3^e période.

Théoriquement, il est possible que cette exoplanète abrite une forme de vie microbienne, même si l'exoplanète sort de manière saisonnière de la zone habitable. Un microbe peut théoriquement s'y reproduire dans la zone habitable pendant la brève période où l'eau circule sous forme liquide. En dehors de la période chaude, l'eau gèle et les formes de vie cessent de se reproduire : leur métabolisme reste en suspens (hibernation) jusqu'à la révolution suivante.

**ANNEXE G : QUESTIONNAIRE RELATIVEMENT AUX SAVOIRS PRÉSENTÉ
APRÈS L'EXÉCUTION DE LA SAÉ**

Note : Les bonnes réponses ont été surlignées en gris.

Répondre au mieux de tes connaissances aux questions suivantes. Tu remarqueras que certaines questions sont les mêmes que celles qui t'ont été présentées avant le laboratoire. C'est normal. Encore une fois, si tu ne connais pas la réponse, l'indiquer plutôt que de « prendre une chance ».

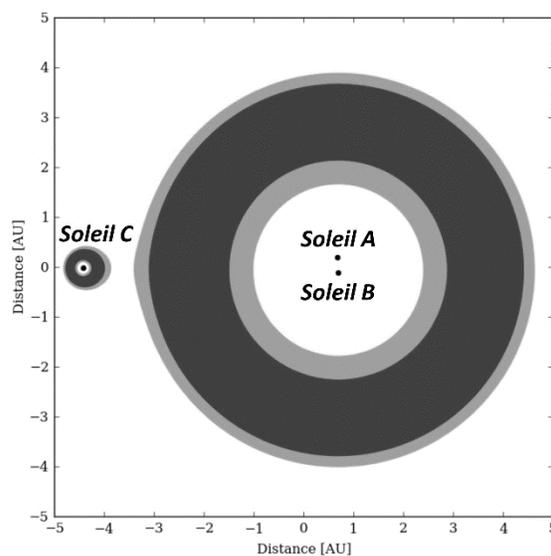
1. Einstein était un homme de science. Quel métier pratiquait-il?
 - a. Biologie
 - b. Physique
 - c. Histoire des sciences
 - d. Médecine
 - e. Chimie
 - f. Je ne sais pas

2. Einstein a redéfini les travaux d'un grand scientifique avant lui. De qui s'agit-il?
 - a. Galileo Galilei
 - b. Louis Pasteur
 - c. Isaac Newton
 - d. Alfred Nobel
 - e. Charles Darwin
 - f. Je ne sais pas

3. Selon toi, laquelle de ses théories est la plus connue *du grand public*?
 - a. Théorie sur l'électrodynamique des corps en mouvement (le temps est relatif)
 - b. Théorie de l'équivalence masse-énergie ($e = mc^2$)
 - c. Théorie de l'effet photoélectrique (la lumière est faite de particules)
 - d. Théorie de la relativité générale (phénomène de la gravité)
 - e. Théorie sur le mouvement brownien (le mouvement des atomes)
 - f. Je ne sais pas

4. Selon toi, laquelle de ses théories est considérée comme étant la plus importante *par les scientifiques* (autant à son époque que ceux contemporains)?
- Théorie sur l'électrodynamique des corps en mouvement (le temps est relatif)
 - Théorie de l'équivalence masse-énergie ($e = mc^2$)
 - Théorie de l'effet photoélectrique (la lumière est faite de particules)
 - Théorie de la relativité générale (phénomène de la gravité)
 - Théorie sur le mouvement brownien (le mouvement des atomes)
 - Je ne sais pas

5. Tu peux voir à l'écran une animation vidéo qui présente un système solaire à **trois étoiles** qui gravitent les unes par rapport aux autres. Les trois Soleils brûlent et chacun fournit de l'énergie. Ce système solaire à trois étoiles existe réellement; les astronomes l'ont découvert en 2014. Il se nomme KID-5653126. Nommons les deux étoiles au centre de l'animation *Soleil A* et *Soleil B*, et la troisième étoile qui gravite autour des deux premières *Soleil C*. Les zones foncées représentent des zones habitables. Selon toi :



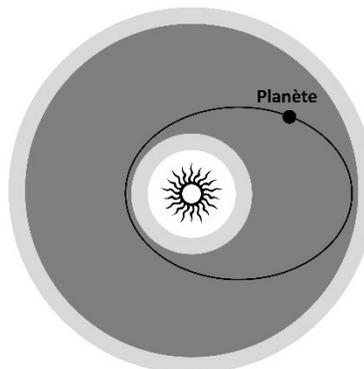
- Serait-il possible –théoriquement– que la vie apparaisse *et* survive sur une planète qui se situerait dans la zone habitable autour des *Soleils A* et *B*? Expliquer.

Oui, à la condition que le Soleil C n'interfère jamais avec la planète qui orbite autour des Soleils A et B (ce qui est peu probable toutefois).

- b. Serait-il possible –théoriquement– que la vie apparaisse *et* survive sur une planète qui se situerait dans la zone habitable autour du *Soleil C*? Expliquer.

Non, car le Soleil C s'approche tellement près des Soleils A et B que la température de surface d'une planète qui y orbiterait augmenterait de manière excessive (probablement au-delà du point d'ébullition de l'eau).

6. S'il est évident qu'un objet céleste de grande masse comme le Soleil attire un objet de petite masse comme une planète, est-ce que le contraire est vrai? Une petite masse comme une planète peut-elle en attirer une plus grande comme une étoile?
- Oui et avec une très grande force de gravité
 - Oui et avec une force proportionnelle à la masse de la planète
 - Oui et avec une force proportionnelle à la masse de l'étoile
 - Oui et avec une force proportionnelle à la masse des deux objets célestes
 - Non et peu importe la masse des deux objets célestes
 - Je ne sais pas
7. Est-ce que la distance entre la planète et son étoile affecte la *vitesse* à laquelle la première tourne autour de la seconde?
- Oui : plus la planète s'approche, plus elle tourne lentement
 - Oui : plus la planète s'approche, plus elle tourne rapidement
 - Non : cela ne change rien
 - Je ne sais pas
8. Quel impact l'orbite asymétrique dans l'image ci-dessous pourrait avoir sur les *saisons*?
- Aucun impact
 - Court été, long hiver
 - Court hiver, long été
 - Je ne sais pas



9. La *Théorie de la Relativité Générale* d'Albert Einstein porte également le nom de *théorie de la gravité*. Décrire dans tes mots ce que tu connais de cette théorie. Si tu ne la connais pas, l'indiquer.

Réponse partiellement correcte :

- La gravité en tant que force invisible, qui retient comme une corde ou semblable au magnétisme (théorie de Newton)
- Relation quantitative entre la masse et la force de gravité (ex. : plus la masse est élevée, plus son effet gravitationnel est grand)

Réponse entièrement correcte :

- La gravité en tant que déformation de l'espace

10. Toutes les planètes actuelles de notre système solaire tournent dans le même sens. Ce n'était pas le cas lorsque les planètes se sont formées autour du Soleil. Quelle hypothèse est la plus plausible pour expliquer pourquoi toutes les planètes modernes de notre système solaire tournent dans le *même* sens?
- a. Il n'y a pas de preuve scientifique que toutes les planètes tournent dans le même sens. La question est illogique dès le départ.
 - b. Cela est dû au hasard, c'est-à-dire que toutes les planètes qui se sont formées à l'origine tournaient déjà dans le même sens.
 - c. Plusieurs planètes se sont formées à l'origine, se sont entrechoquées pour en fabriquer des plus grosses et les plus grosses planètes ont imposé de par leur grande masse la direction uniforme du mouvement de tous les objets célestes en présence.
 - d. Je ne sais pas.

**ANNEXE H : QUESTIONNAIRE D'APPRÉCIATION DE LA SAÉ
(ÉCHELLE DE LIKERT)**

QUESTIONS	Très insatisfait	Insatisfait	Neutre	Satisfait	Très satisfait
1. Comment as-tu apprécié ce laboratoire dans son ensemble?					
2. Crois-tu que ce laboratoire fût trop complexe pour des élèves de ton âge?					
3. Crois-tu que le laboratoire-démonstration (avec la structure élastique et les boules de quille) rende le laboratoire plus intéressant?					
4. Crois-tu que cette démonstration t'ait aidé à mieux comprendre la théorie de la gravité d'Einstein?					
5. Crois-tu que l'utilisation d'un ordinateur rende le laboratoire plus intéressant?					
6. Crois-tu que l'utilisation d'un ordinateur t'ait aidé à mieux comprendre cette théorie d'Einstein?					
7. Crois-tu que l'utilisation d'une base de données interactive sur internet rende le laboratoire plus intéressant?					
8. Crois-tu que l'utilisation de cette base de données interactive t'ait aidé à mieux comprendre les conséquences de la théorie d'Einstein?					
9. Considères-tu que la matière vue pendant ce laboratoire fût intéressante?					
10. As-tu l'impression générale d'avoir appris quelque chose pendant ce laboratoire?					
11. Est-ce que les explications et les consignes de l'enseignant furent claires et assez précises?					

12. Si tu as d'autres commentaires, tu peux les inscrire ici :

Je te remercie infiniment de ta participation !

**ANNEXE I : LISTE, COÛTS ET CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX
NÉCESSAIRES À LA FABRICATION DU SIMULATEUR DE GRAVITÉ ILLUSTRANT
LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ D'EINSTEIN**

Matériaux¹	Quantité	Prix à l'unité²	Prix Total¹	Commentaires
Goujons de bois de 7/8" (22 mm) de diamètre, 16' au total (Figure 31, p. 132)	4 unités de 4' (1,22 m)	\$3,40 par unité	\$13,60	La longueur des goujons dépend de la grandeur moyenne des élèves. Dans notre cas (Figure 38, p.134), nous avons choisi une longueur de 30" (76 cm) pour un projet qui s'adresse à des jeunes de 3 ^e secondaire (14-15 ans). Les goujons doivent parfaitement s'ajuster aux coupleurs (Figure 34, p. 132).
Collets ajustables en métal, à vis, 4" (10.2 cm) de long (Figure 33, p. 132)	16	\$1,09	\$17,44	Ces collets sont essentiels pour des raisons de sécurité : la pression est très forte sur les coupleurs, surtout si l'on y ajoute la boule de quille la plus lourde. Plus d'un coupleur ont cassé sans les collets lors de nos essais, et cela pose un risque sérieux lors de la démonstration (Figure 34, p. 132). Il n'est pas recommandé de coller les tuyaux aux coupleurs, afin de minimiser l'espace de rangement lorsque l'appareil n'est pas utilisé.
Tuyaux à plomberie, pvc, 1/2" (12.7 mm) de diamètre, coupés à 59" de longueur chacun (1.5 m), relativement flexible (Figure 31, p. 132)	4 unités de 10' chacun (3 m)	\$7,49 par unité	\$29,96	Ces tuyaux sont disponibles en longueur de 10' chacun. Si on ajoute 1" de longueur provenant de chacun des quatre coupleurs en pvc (Figure 32, p. 132), cela donnera une structure circulaire totalisant 240" de circonférence, soit 76.4" (194 cm) de diamètre. Il n'est pas recommandé de construire une structure plus grande que celle-ci (en utilisant 60" de longueur pour chaque tuyau par exemple), car le tissu extensible (voir ci-dessous et Figure 35, p. 133) se limite à 59" (1.5 m) de largeur : une structure plus grande étire trop le tissu extensible et limite la déformation de ce tissu par la masse des boules de quille. De plus, il est recommandé d'éviter d'utiliser un tuyau en pvc offrant un diamètre plus petit que 1/2" (par exemple 1/4"), la structure globale n'étant pas assez solide, surtout lorsqu'une boule de quille y est déposée. Dans un cas, la structure utilisant des tuyaux de 1/4" s'est même effondrée en y déposant une boule de quille.
Coupleurs de plomberie en forme de T, pvc, 1/2" (12.7 mm) de diamètre (Figure 32, p. 132)	8	\$0,76	\$6,08	Les coupleurs doivent parfaitement s'ajuster aux tuyaux (Figure 34, p. 132).
Pincen en métal 1" d'épaisseur (2,5 cm)	16	\$0,59	\$9,48	Ces pincen servent à maintenir le tissu extensible en place (Figure 39, p. 134). Augmenter le nombre de pincen au besoin.

Matériaux ¹	Quantité	Prix à l'unité ²	Prix Total ¹	Commentaires
Tissu extensible de type « <i>Spandex</i> » pour maillot de bain, 59" par 59" (1.5 m par 1.5 m) (Figure 35, p. 133)	1,5 m	\$19,99 / mètre	\$29,99	Le tissu extensible est vendu à 1,5 m de largeur. En achetant 1,5 m de longueur, on obtient un carré de taille suffisante. Il est conseillé de choisir une couleur unie, sur laquelle on peut dessiner une grille à tous les 4" (10.2 cm; Figure 35, p. 133).
Boules de quille de petite, moyenne et grande masses (~3-12 livres, ~1-6 kg) (Figure 38, p. 134)	3	\$10 (usagée)	\$30	La boule de quille de petite masse pourrait être jaune (pour représenter notre Soleil), et celle de grande masse rouge (pour représenter une étoile géante rouge). Il n'est pas nécessaire d'acheter neuves les boules de quille (elles sont très dispendieuses); plusieurs modèles usagés sont disponibles à très petit coût dans les annonces classées de votre région.
Billes de verre et de métal, boules de billard et de snooker, de grosseur, de couleurs et de densités variées (Figure 37, p. 133)	3 paquets	\$5 paquet	\$15	Les petites billes de verre et de métal et représentent les planètes gazeuses, métalliques et naines, de même que les satellites naturels, ou tout autres objets célestes. Il est intéressant aussi d'y ajouter des boules de snooker et de billard, car elles représentent une masse intermédiaire entre les petites billes de verre et de métal et les gigantesques boules de quille (planètes géantes de type Jupiter et Saturne).
Bordure à gazon de plastique (6" de haut et 240" de circonférence) (Figure 45, p. 136)	1	\$5,99	\$5,99	La bordure à gazon sert à contenir le déplacement circulaire des petites billes. Cela permet en effet d'éviter que les billes de verre et les boules de billard ne tombent par terre lorsque l'enseignante ou l'enseignant les fait rouler autour de la boule de quille. Une structure sans bande tout autour est la garantie que plusieurs des billes et boules se retrouveront par terre, elles seront difficiles à trouver, sans compter le risque (potentiellement grave) qu'un élève roule dessus et se cogne la tête en tombant. Cette bande, en plus d'assurer la sécurité, permet de projeter les billes et boules à <i>grande vitesse</i> , augmentant la viabilité des systèmes planétaires créés lors de la démonstration.
Sous-total			\$157,54	Montant avant taxes
Taxes sur les Produits et Services (Canada)			\$7,88	5% du sous-total
Taxes de Vente Provinciale (Québec)			\$15,75	10% du sous-total
GRAND TOTAL			CDN \$181,17	

¹ Une version similaire est disponible en utilisant des tuyaux de pvc pour câbles électriques (Range, 2004; Burns, 2014). Cette version est plus dispendieuse, mais elle est probablement plus solide, car elle comporte sept poteaux (Burns, 2014) au lieu de quatre (Figure 38, p. 134).

² Matériel acheté à Montréal (Canada) en novembre 2015.

ANNEXE J : ILLUSTRATIONS DES MATÉRIAUX NÉCESSAIRES À LA FABRICATION ET À L'UTILISATION DU SIMULATEUR DE GRAVITÉ

(Photos de l'auteur)



Figure 31. Matériel nécessaire à la construction du simulateur de gravité einsteinienne.

Tuyaux à plomberie, pvc, $\frac{1}{2}$ " (12,7 mm), relativement flexible, 40 pieds (12,2 m) de long, coupés en huit morceaux de 59" chacun (1,5 m). Quatre goujons de $\frac{7}{8}$ " (22 mm), qui s'ajustent parfaitement aux coupleurs. La règle de métal mesure 12" (30 cm).



Figure 32. Coupleur de plomberie en forme de T, pvc, $\frac{1}{2}$ " (12,7 mm).



Figure 33. Collets ajustables en métal, à vis, 4" (10,2 cm) de long.



Figure 34. Ajustement entre le coupleur, les tuyaux de part et d'autre, de même que les collets. Ces derniers sont essentiels pour des raisons de sécurité (voir texte).

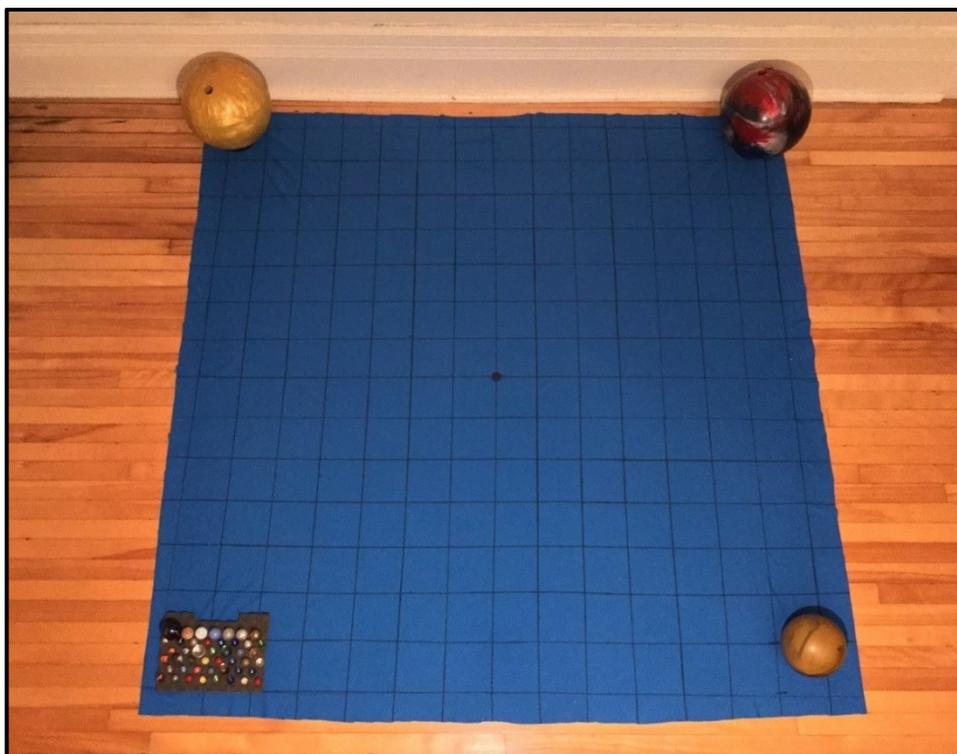


Figure 35. Tissu extensible (élastique) de type « Spandex » pour maillot de bain, sur lequel nous avons dessiné une grille à tous les 4" (10,2 cm).

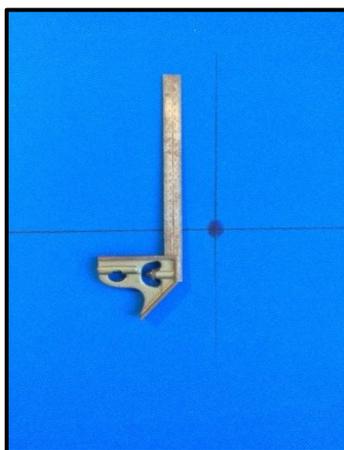


Figure 36. L'utilisation de l'équerre sur le tissu extensible augmente la qualité du tracé des premières lignes de la grille.



Figure 37. Des billes de métal, de verre et de bois, de même que des boules de billard et de snooker, de grosseur, de couleurs et de densité variées, ont été utilisées pour représenter les planètes et les satellites.

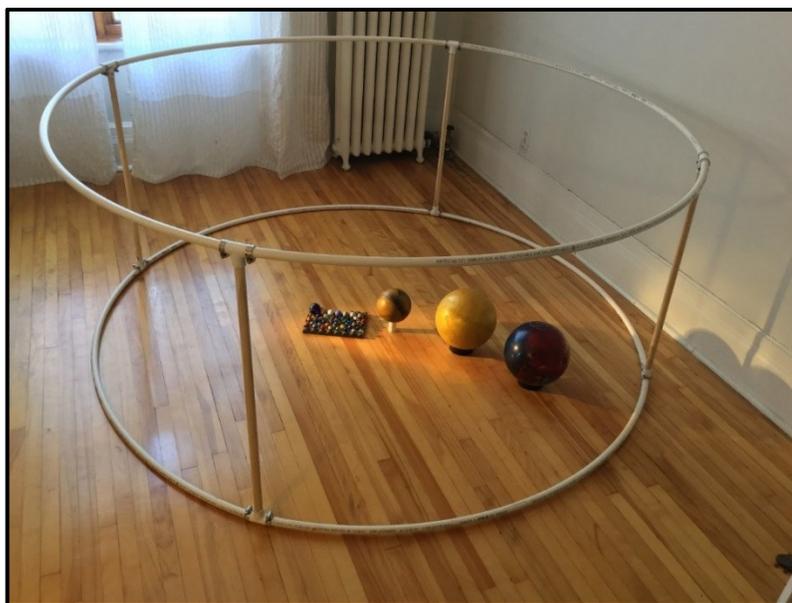


Figure 38. Montage de la structure en pvc du simulateur de gravité, avant l'installation du tissu extensible.

La Figure montre également la grosseur relative des boules de quille que nous avons utilisées lors des essais en classe. La structure circulaire totalise 240'' (609,6 cm) de circonférence, soit 76,4'' (194 cm) de diamètre.



Figure 39. Montage final du simulateur de gravité, après l'installation du tissu extensible. La flèche rouge pointe une des quatre pinces qui retiennent le tissu extensible aux poteaux de la structure; cela contribue à stabiliser le tissu mais aussi toute la structure en pvc.



Figure 40. Une petite bille de verre (masse de quelques grammes) ne produit pas d'effet gravitationnel visible sur le tissu extensible.

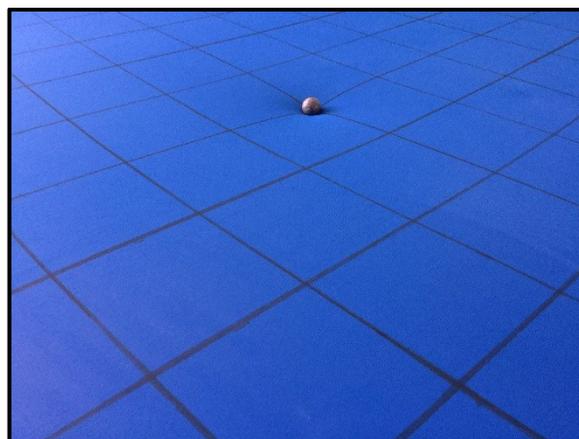


Figure 41. Une petite bille de plomb (masse d'environ 75 g) produit un petit effet gravitationnel sur le tissu extensible.

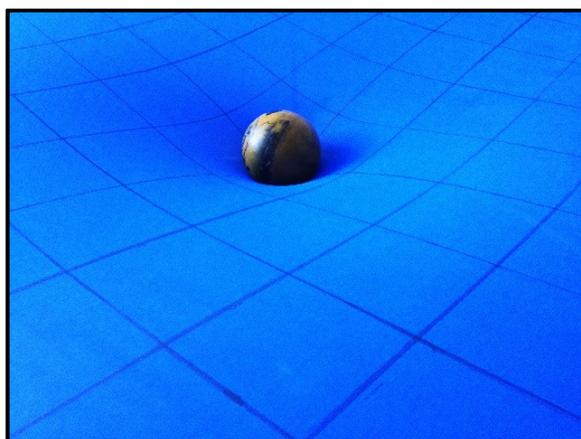


Figure 42. Une petite boule de quille (masse de 1,6 kg) produit un effet gravitationnel modéré sur le tissu extensible.

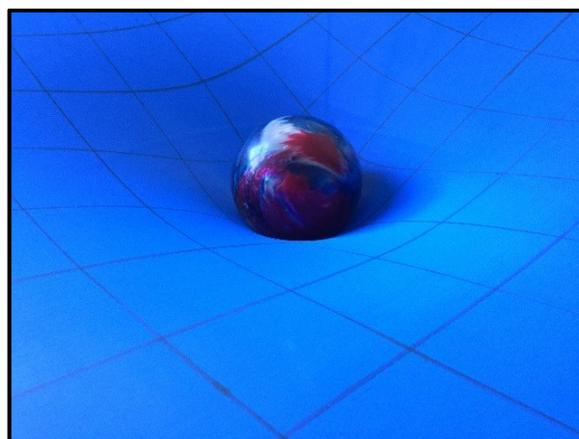


Figure 43. Une grosse boule de quille (masse de 4,6 kg) produit un effet gravitationnel élevé sur le tissu extensible.



Figure 44. Une très grosse boule de quille (masse de 5,6 kg) produit un effet gravitationnel extrême sur le tissu extensible. La boule de quille la plus lourde sur le marché atteint 6,8 kg.

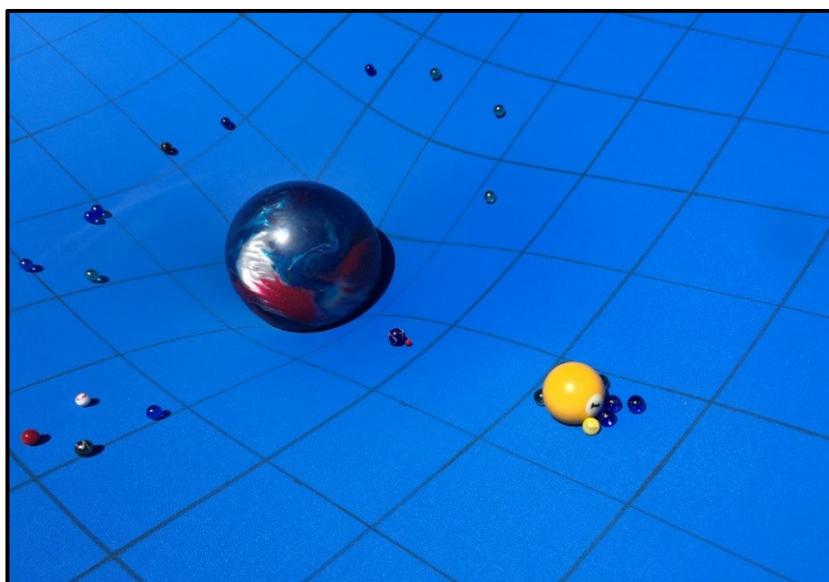


Figure 45. Les billes de petite masse sont lancées autour de la boule de quille, simulant un système planétaire dont l'espace a été déformé par le Soleil.

Noter que la bande plastique de jardinage (non visible sur la photo, voir Annexe C, p. 92) est essentielle, car elle empêche les billes et les boules de tomber par terre, surtout au début lorsqu'elles sont lancées avec force. Il est possible de simuler plusieurs systèmes astronomiques (Annexe C). Sur cette photo, remarquer combien la boule de billard #1 (jaune) attire de plus petites billes de verre, imitant le système Jupiter et ses multiples satellites; remarquer également le système Terre-Lune (billes bleue et rouge) situé entre le Soleil (boule de quille) et Jupiter.

ANNEXE K : CALENDRIER DE RÉALISATION DE LA SAÉ

Étapes de réalisation	Date Échantillon Durée	Moyens
Projet pilote Démontrer la Théorie de la Relativité Générale d'Einstein grâce au simulateur de gravité	Sept. 2014 57 élèves 2 groupes réguliers 2 périodes de 1 heure	1) Lecture au préalable de textes en astronomie (en devoir) 2) Exécution du laboratoire-démonstration (Figure 45, p. 136). 3) Retour en classe sur le laboratoire (appréciation verbale de la démonstration). L'horaire et les contraintes scolaires n'ont pas permis d'évaluer les savoirs.
Mise à l'essai de la SAÉ 1) Aucun travail préparatoire au laboratoire-démonstration	Mai 2016 87 élèves 3 groupes enrichis	1) Nous n'avons pas donné de lecture ou de travail préparatoire à l'élève <i>avant</i> le laboratoire-démonstration utilisant le simulateur de gravité pour ne pas influencer ses réponses au premier sondage (leurs savoirs en lien avec Einstein; Annexe A, p. 81).
2) Élément déclencheur	1 ^{re} période 30 minutes	2) Présentation orale et discussion de classe : Qu'est-ce qu'une exoplanète? Comment les découvre-t-on? Qu'est-ce qui caractérise une zone habitable? Quelle est la probabilité que la vie extraterrestre existe? Les bases théoriques derrière la présentation de l'élément déclencheur sont discutées à la section 3), p. 35, et celui utilisé dans cette SAÉ à la section 4.1, p. 47. Nous avons présenté une vidéo de nature journalistique concernant la découverte spectaculaire de l'exoplanète Kepler 452b en juillet 2015 (TVA Nouvelles, 2015).
3) Démontrer la Théorie de la Relativité d'Albert Einstein	1 ^{re} période 30 minutes	3) Laboratoire-démonstration à l'aide du simulateur de gravité (section 4.1.2, p. 48 et section 4.3, p. 58; Figure 45, p. 136). L'élève reçoit en devoir la lecture du texte <i>Méthodes de détection des exoplanètes et leur diversité</i> (Annexe D, p. 94).
4) Analyse quantitative et graphique des systèmes extrasolaires	2 ^e et 3 ^e périodes 90 minutes	4) Questionner une base de données interactive professionnelle en Astronomie : <i>L'Encyclopédie des Planètes Extrasolaires</i> (Exoplanet Database, 2016) dans le but de prédire les conséquences de la gravité sur la variabilité des systèmes extrasolaires (sections 4.1.5, p. 51 et 4.1.6, p. 51).
5) Prédire l'habitabilité d'une exoplanète existante	3 ^e période 30 minutes	5) Accéder et questionner un simulateur d'exoplanètes professionnel dans le but de prédire la température moyenne à la surface d'une exoplanète (section 4.1.8, p. 54). Voir Indiana University (2016).
6) Évaluation des savoirs de l'élève	4 ^e période 45 minutes	6) Questionnaire relativement aux savoirs qui est présenté aux élèves après l'exécution complète de la SAÉ (3 ^e période; section 4.1.9, p. 57; Annexe G, p. 125).
7) Retour sur la SAÉ	4 ^e période 15 minutes	7) Questionnaire d'appréciation de la SAÉ à l'aide des échelles de Likert (section 3.2, p. 30; Annexe H, p. 129).

**ANNEXE L : RÉPONSES DISPONIBLES À LA QUESTION DÉFI #6 DE L'ANNEXE E
FAISANT LE LIEN ENTRE L'EXCENTRICITÉ D'UNE EXOPLANÈTE ET LA
THÉORIE DE LA GRAVITÉ D'EINSTEIN**

$N = 9$ équipes de 2 élèves provenant de 3 groupes enrichis, 5^e secondaire, 17 ans, Collège Jean de la Mennais. Les autres équipes n'ont pas répondu à la question (ni aux suivantes, faute de temps). Une bonne réponse a été indiquée en vert ($N = 6$; 2 points sur 2), une réponse correcte mais incomplète dans son explication en orange ($N = 2$; 1 point sur 2), et une mauvaise réponse, ou une réponse qui ne répond pas à la question, en rouge ($N = 1$; 0 point sur 2).

Réponse intégrale (incluant fautes d'orthographe, grammaire, etc.) fournie par l'équipe de 2 élèves
Les planètes très proches de leur étoile et ayant un axe de rotation très désaxé n'existent pas. Elles s'écrasent sur leur étoile dû au fait qu'elles sont passées trop près de celle-ci.
Les exoplanètes excentriques proche de leur étoile ne peuvent pas exister, puisqu'elles devraient passer trop près de leur Soleil. Elles seraient donc attirées par celui-ci et s'écraseraient.
Selon la théorie générale de la gravité d'Einstein, une planète qui s'approcherait trop du soleil serait attirée vers celui-ci pour se détruire. Ceci explique pourquoi une planète située en moyenne proche de son soleil ne pourrait pas avoir une orbite ovale, car cela signifierait que cette planète s'approche énormément de son soleil, pour entrer en collision avec celui-ci.
Parce que si les planètes se rapprochent trop de leur étoile, alors elles vont se percuter. Cet hypothèse est démontré par la théorie de la relativité d'Albert Einstein, qui prouve que le vide est déformé par les corps. Voilà pourquoi les exo planètes rentrent en collision avec leur étoile si elles s'approchent trop proche de ce dernier.
Les planètes à l'orbite très asymétrique ne peuvent pas être trop près de leur étoile. Si c'était le cas, elles seraient à risque d'être emportées par la gravité de leur étoile lors de leur point le plus proche de l'étoile dans leur orbite.
Les exoplanètes excentriques proches de leur étoile n'existent pas puisque l'étoile exerce une trop grande force pour que l'astre ait une orbite excentrique. La Théorie de la Relativité d'Einstein explique qu'une grande masse attire vers elle tout corps de masse inférieure.
Selon la Théorie de Relativité d'Einstein, les planètes déforment l'espace et s'attirent. Ainsi, lorsqu'une planète est proche de son Soleil, elle est constamment attirée vers son Soleil. Elle ne peut donc pas avoir d'orbitale excentrique.
Plus que l'exoplanète est éloignée de l'étoile, plus elle est attirée par le champ gravitationnel d'autres planètes ou étoiles.
Peu de planètes passent extrêmement proche du leur soleil

Albert Einstein

