

**PHYSIQUE, SECONDAIRE 4**  
**Document de mise en œuvre**

**REGROUPEMENT 2 : LES CHAMPS**

**ÉBAUCHE NON RÉVISÉE**

**AVRIL 2006**

## Les enjeux liés à l'exploration spatiale

**Durée suggérée : 160 minutes**

### **Résultats d'apprentissage spécifiques**

S4P-2-01 identifier et examiner des enjeux liés à l'exploration spatiale,  
*par exemple la taille de l'univers, les progrès technologiques, la promotion de la coopération mondiale, les avantages sociaux et économiques, l'allocation de ressources aux dépens d'autres activités, les désastres possibles;*

S4P-0-3c relever des enjeux d'ordre social liés aux sciences et à la technologie, en tenant compte des besoins humains et environnementaux et des considérations éthiques;  
RAG : B3, B5

S4P-0-3d appliquer le processus de prise de décisions à un enjeu STSE;

S4P-0-4d acquérir un sens de responsabilité personnelle et collective au regard de l'impact des êtres humains sur l'environnement, et prendre en considération les conséquences d'actions prévues sur la société et l'environnement;  
RAG : B1, B2

S4P-0-4e manifester un intérêt soutenu et plus éclairé dans les sciences et les questions d'ordre scientifique;  
RAG : B4, B5

### **Stratégies d'enseignement suggérées**

#### **En tête**

##### **1**

Inviter les élèves à participer à une séance de remue-méninges pour déterminer des enjeux courants liés à l'exploration spatiale. Les propositions de tous les élèves peuvent être compilées. Les élèves peuvent utiliser cette liste de propositions pour déterminer les enjeux qu'ils (ou la classe) souhaitent examiner dans l'activité suivante sur la prise de décisions.

**OU**

##### **2**

Inviter les élèves à compléter un guide d'anticipation (voir *L'enseignement des sciences de la nature au secondaire*, p. 9.19 et 9.20). Voici des suggestions d'énoncés :

- On devrait tenter d'envoyer des astronautes à la planète Mars.
- Le Canada devrait participer au programme *Space-Based Infrared System* des États-Unis.
- On devrait permettre au secteur privé de développer des systèmes de transport à la station spatiale internationale.
- Le gouvernement canadien ne devrait pas subventionner l'exploration spatiale.

Les élèves ont pris connaissance du processus de prise de décisions en S1. Ce RAS est placé au début de la section sur les champs gravitationnels pour donner un certain contexte à l'étude des champs. On recommande d'étaler ce projet sur plusieurs semaines. L'**annexe 1** fournit des renseignements sur le comment et le pourquoi du processus de prise de décisions.

#### **En quête**

##### **1**

Inviter les élèves à entreprendre un projet en groupe dans lequel ils abordent un enjeu concret lié à l'exploration spatiale. Préciser que le projet sera réalisé sur plusieurs semaines et nécessitera de la recherche indépendante de leur part. Établir un échéancier à long terme et afficher les dates de tombée dans la classe. Encourager les élèves à inscrire ces dates dans leur agenda.

Inviter les élèves à choisir une approche pour entamer le processus de prise de décisions, par exemple un débat, une conférence, un exposé de position, un exposé en classe (si les élèves n'ont pas beaucoup d'expérience avec le processus de prise de décisions, on peut leur assigner une approche spécifique). Élaborer des critères d'évaluation avec les élèves (voir l'annexe 1 pour des suggestions de critères).

## En fin

### 1

Inviter les élèves à compléter une autoévaluation de leur travail de groupe. Les questions suivantes peuvent servir de guide :

- *As-tu aidé ton équipe à prendre une décision?*
- *A-t-il été difficile pour ton équipe d'en arriver à cette décision? Pourquoi ou pourquoi pas?*
- *Les membres de ton équipe ont-ils eu l'impression d'avoir assez d'information pour prendre une décision informée?*
- *Étais-tu d'accord ou non avec la décision de ton groupe?*

### 2

Revoir les énoncés du guide d'anticipation de la section « En tête » et demander aux élèves si leur opinion a changé. Discuter au besoin de certains enjeux qui suscitent beaucoup d'intérêt auprès des élèves.

## Stratégies d'évaluation suggérées

### 1

Évaluer le travail des élèves selon les critères élaborés dans la section « En quête ». Le type d'évaluation utilisée variera selon l'approche adoptée, mais l'évaluation devrait mettre l'accent sur la capacité des élèves à démontrer les compétences indiquées dans le regroupement 0.

### 2

Inviter les élèves à analyser un article traitant d'un enjeu courant lié à l'exploration spatiale. Un cadre d'analyse d'articles de nature factuelle ou un cadre d'analyse d'articles qui prêtent à discussion peut faciliter ce travail (voir *L'enseignement des sciences de la nature au secondaire*, p. 11.40 et 11.41).

## Les lois de Kepler et la loi de la gravitation universelle

### Résultats d'apprentissage spécifiques

S4P-2-02 décrire le mouvement planétaire au moyen des lois de Kepler;

S4P-2-03 résumer la loi de la gravitation universelle de Newton et résoudre des problèmes au

moyen de l'équation  $\vec{F}_g = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$ ;

### Stratégies d'enseignement suggérées

## En tête

### 1

Inviter les élèves à construire une liste révisant des scientifiques qui ont contribué à notre compréhension de l'univers. Réviser les deux modèles: le point de vue géocentrique et le point de vue héliocentrique. (Ces concepts sont à l'étude en Sciences de la nature S1). Réviser la contribution de Kepler.

## OU

Poser les questions suivantes aux élèves :

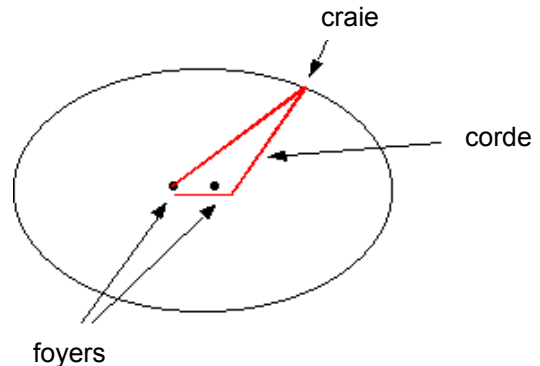
- C'est quoi une orbite?
- Nommez des objets qui font des orbites.
- Quelle est la forme d'une orbite?
- Toutes les orbites ont-elles la même forme?
- Pourquoi les planètes ne voyagent-elles pas en ligne droite?
- Qu'est-ce qu'il y a au milieu d'une orbite?

Le site Internet <http://www.univ-lemans.fr/enseignement/s/physique/02/meca/planete.html> contient une simulation qui permet de visualiser les lois de Kepler

### En quête

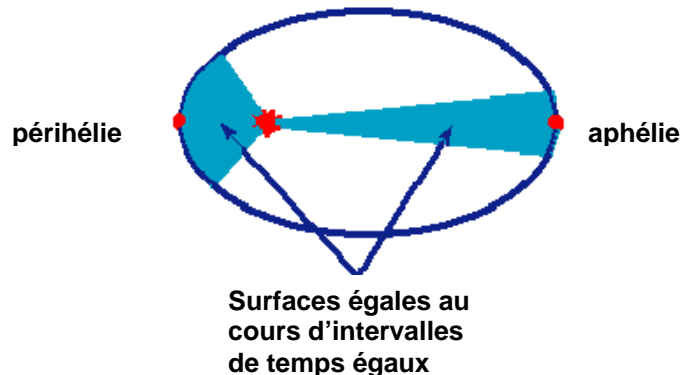
A) Inviter les élèves à faire une activité pour illustrer la première loi de Kepler (voir *Physique* 12, p. 273 ou effectuer la marche à suivre suivante) :

- Placer une feuille de papier graphique sur un morceau de carton.
- Enfoncer deux punaises à travers le papier et le carton.
- Enfiler une boucle de fil autour des deux punaises.
- Placer un crayon dans la boucle de fil et, en tirant toujours la boucle de fil vers l'extérieur au moyen du crayon, tracer graduellement une ellipse. Faire remarquer aux élèves que pour chaque point sur l'ellipse, on obtient la même valeur si on additionne la distance à un des foyers avec la distance à l'autre foyer. Inviter les élèves à ralentir lorsqu'ils sont plus éloignés du « Soleil » et à accélérer lorsqu'ils en sont plus proches.



Présenter aux élèves la première loi de Kepler (voir l'annexe 2).

B) Présenter aux élèves la deuxième loi de Kepler (voir l'annexe 2). Inviter les élèves à employer les diagrammes d'ellipse préparés à l'étape précédente pour illustrer cette loi.



C) Inviter les élèves à trouver le rayon orbital moyen et la période de révolution de chaque planète du système solaire, et à tracer un graphique du cube du rayon orbital moyen en fonction du carré de la période de révolution moyenne. Les inviter à tirer une conclusion basée sur le graphique. Énoncer la troisième loi de Kepler (voir l'annexe 2).

D) Expliquer comment Newton a développé la loi de la gravitation universelle (voir l'annexe 2).

Présenter la formule  $F_g = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$ .

Inviter les élèves à préparer un tableau de données présentant la masse de chaque planète, son rayon orbital moyen et sa période de révolution moyenne. Inviter les élèves à calculer la force centripète et la force gravitationnelle agissant sur chaque planète et de les comparer l'une à l'autre.

|  |
|--|
| On peut se servir d'un tableur pour faciliter le traitement des données. |
|--|

E) Inviter les élèves à résoudre des problèmes avec la formule  $F_g = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$ .

### En fin

1

Inviter les élèves à écrire une lettre que Newton aurait pu écrire à Kepler à propos de son travail.

OU

2

Inviter les élèves à résumer les trois lois de Kepler ainsi que la loi de la gravitation universelle dans leur carnet scientifique.

OU

3

Inviter les élèves à proposer comment on pourrait appliquer les techniques de proportionnalité aux problèmes basés sur la force gravitationnelle

### Stratégies d'évaluation suggérées

1

Revoir les diagrammes, le graphique et le tableau de données préparés par les élèves :

- Est-ce que les diagrammes sont bien tracés et étiquetés?
- Est-ce que l'élève respecte les critères établis pour la préparation d'un graphique (titre, axes étiquetés, unités de mesure, échelle appropriée, droite de meilleur ajustement)?
- Est-ce que l'élève a bien calculé les forces centripète et gravitationnelle? A-t-il présenté un nombre de chiffres significatifs raisonnable basé sur la précision des données de base? A-t-il intitulé chaque colonne du tableau de données avec des unités de mesure une seule fois en haut?

2

Inviter les élèves à formuler des questions avec leurs réponses pour la formule :  $F_g = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$

et à échanger ces questions.

3

Inviter les élèves à calculer le poids (force gravitationnelle) d'un objet près de la surface de la Terre et de comparer ce poids à la force gravitationnelle telle que calculée à l'aide de la loi de la gravitation universelle.

# L'énergie potentielle gravitationnelle

## Résultats d'apprentissage spécifiques

S4P-2-04 décrire l'énergie potentielle gravitationnelle comme l'aire entre la courbe et l'axe horizontale d'un graphique de la force en fonction de la distance de séparation et

résoudre des problèmes au moyen de l'équation  $E_g = -\frac{Gm_1m_2}{r}$  ;

S4P-2-05 résoudre des problèmes sur la vitesse de libération d'un engin spatial, entre autres la loi de la conservation de l'énergie, l'énergie de liaison;

S4P-0-2g Inférer et calculer des relations directes, des relations proportionnelles au carré et des relations inversement proportionnelles entre des variables à l'aide de modèles mathématiques;  
RAG : C3, C8

## Stratégies d'enseignement suggérées

### En tête

1

Proposer aux élèves d'examiner les transformations d'énergie lorsqu'on lance un objet à la verticale. Les questions suivantes peuvent servir de guide:

- *Décrivez le mouvement d'un objet qu'on lance à la verticale.* (L'objet monte en ralentissant à cause de la force gravitationnelle de la Terre. Il finit par s'arrêter à son point le plus haut puis retombe en accélérant vers la surface de la Terre.)
- *Quel type d'énergie a l'objet immédiatement après qu'on le libère?* (L'objet a une énergie cinétique.)
- *Qu'est-ce qui arrive à l'énergie à mesure que l'objet ralentit?* (L'énergie cinétique se transforme graduellement en énergie potentielle gravitationnelle.)
- *À son point le plus haut, l'objet a quel type d'énergie?* (À son point le plus haut, l'objet atteint un maximum d'énergie potentielle, tandis que son énergie cinétique est égale à zéro.)
- *Qu'arrive-t-il à l'énergie à mesure que l'objet tombe vers la Terre?* (L'énergie potentielle se transforme graduellement en énergie cinétique.)
- *L'énergie totale de l'objet varie-t-elle?* (À tous les points de sa trajectoire, l'énergie totale est constante et est égale à la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle gravitationnelle.)

Les concepts de travail et d'énergie potentielle gravitationnelle près de la surface de la terre ont été étudiés dans le regroupement précédent. Au regroupement 2, on veut étendre ce concept pour tout système de deux masses séparées d'une distance finie.

### En quête

1

A) Présenter aux élèves l'équation générale de l'énergie potentielle gravitationnelle (l'**annexe 3** présente des renseignements pour l'enseignant). Inviter les élèves à résoudre des problèmes

d'énergie potentielle gravitationnelle au moyen de la formule  $E_g = -\frac{Gm_1m_2}{R}$  (voir *Physique 12*, p.

287 et 288 ou *Principes fondamentaux de la physique : un cours avancé*, p. 390 et 391). Corriger ces problèmes en classe afin de vérifier la compréhension des élèves. Au besoin, réviser la matière ou la revoir en profondeur.

B) Expliquer aux élèves le concept de vitesse de libération (voir l'annexe 3). Les inviter à résoudre des problèmes sur la vitesse de libération (voir *Physique 12*, p. 293 et 294 ou *Principes fondamentaux de la physique : un cours avancé*, p. 396).

## En fin

1

Inviter les élèves à consacrer une page de leur carnet scientifique aux formules de physique et à

y inscrire les formules suivantes :  $W = \Delta E$ ,  $F_g = \frac{Gm_1m_2}{R^2}$ ,  $F_c = \frac{4\pi^2Rm}{T^2}$ ,  $F_g = mg$ ,  $g = \frac{Gm}{R^2}$ ,

$E_g = -\frac{Gm_1m_2}{R}$ . Indiquer aux élèves qu'ils devraient indiquer la signification et les unités de

mesure de chaque variable ainsi qu'une courte explication quant à l'usage de la formule, par exemple dans quels contextes elle s'applique.

## Stratégies d'évaluation suggérées

1

Inviter les élèves à expliquer le graphique de la force en fonction de la distance de séparation de l'annexe 3 sans utiliser des formules.

2

Inviter les élèves à résoudre des problèmes d'énergie potentielle gravitationnelle et de vitesse de libération.

3

Inviter les élèves à expliquer pourquoi il est si difficile de mettre un satellite en orbite. On peut évaluer la réponse écrite en se fondant sur les critères suivants :

- clarté de la réponse;
- exhaustivité de la réponse;
- formulation d'une réponse logique;
- utilisation des connaissances acquises dans le regroupement pour justifier la réponse.

4

Inviter les élèves à continuer le tableau de données amorcé au Bloc A en calculant l'énergie potentielle gravitationnelle qui existe entre chaque planète et le Soleil.

|  |
|--|
| On peut se servir d'un tableur pour faciliter le traitement des données. |
|--|

## La loi de la gravitation universelle et le poids

### Résultats d'apprentissage spécifiques

S4P-2-06 comparer la loi de la gravitation universelle avec le poids (mg) d'un objet à diverses distances de la surface de la Terre et décrire l'intensité du champ gravitationnel au

moyen de l'équation  $\vec{g} = \frac{Gm_{\text{terre}}}{r^2}$  ;

S4P-0-2g Inférer et calculer des relations directes, des relations proportionnelles au carré et des relations inversement proportionnelles entre des variables à l'aide de modèles mathématiques;

RAG : C3, C8

## Stratégies d'enseignement suggérées

### En tête

1

Activer les connaissances antérieures des élèves en leur posant les questions suivantes :

- Quelle est la différence entre la masse et le poids?
- Comment calcule-t-on la force gravitationnelle d'un objet près de la surface de la Terre? ( $F_g = mg$ )
- C'est quoi un champ gravitationnel?
- L'intensité du champ gravitationnel est-il pareil sur une montagne que dans une vallée? Expliquez votre réponse.
- L'intensité du champ gravitationnel est-il pareil aux pôles et à l'équateur? Expliquez votre réponse.

|  |
|--|
| Les élèves ont étudié la loi de la gravitation universelle au bloc A de ce regroupement. |
|--|

### En quête

1

A) Expliquer aux élèves la différence entre  $g$  et  $G$  (voir l'**annexe 4**). Leur démontrer comment résoudre des problèmes à l'aide de l'équation  $g = \frac{Gm_{\text{Terre}}}{r^2}$  et à l'aide des techniques de proportionnalité (voir *Physique 11*, p. 158-161).

*Exemple : L'intensité du champ gravitationnel d'une planète est de 3,6 N/kg à une certaine distance du centre de la planète. Quelle serait sa valeur à trois fois cette distance?*

L'intensité du champ gravitationnel est inversement proportionnel au carré de la distance qui sépare deux objets. Puisque la distance est trois fois plus grande, l'intensité du champ gravitationnel sera  $3^2$  fois plus petit, donc 9 fois plus petit.

$$3,6 \text{ N/kg} \div 9 = 0,4 \text{ N/kg}$$

OU

$$g_1 = 3,6 \text{ N/kg}, R_1 = 1, R_2 = 3$$

$$g \propto \frac{1}{R^2}$$

$$\frac{g_1}{g_2} = \frac{\frac{1}{(R_1)^2}}{\frac{1}{(R_2)^2}}$$

$$\frac{g_1}{g_2} = \frac{(R_2)^2}{(R_1)^2}$$

$$g_2 = g_1 \frac{(R_2)^2}{(R_1)^2} = 3,6 \text{ N/kg} \frac{(1)^2}{(3)^2} = 0,40 \text{ N/kg}$$

Donc, l'intensité du champ gravitationnel à trois fois la distance est de 0,40 N/kg.

## En fin

1

Inviter les élèves à revoir leurs réponses de la section « En tête ».

## Stratégies d'évaluation suggérées

1

Inviter les élèves à faire la distinction entre G et g en complétant un cadre de comparaison (voir *L'enseignement des sciences de la nature au secondaire*, p.10.15-10.17 et p. 10.24).

2

Inviter les élèves à résoudre des problèmes à l'aide de la formule  $g = \frac{Gm_{\text{Terre}}}{r^2}$  ainsi que des techniques de proportionnalité (voir *Physique 11*, p. 181 et 182 et *Physique 12*, p. 276 et 277).

## Les satellites

### Résultats d'apprentissage spécifiques

S4P-2-07 résumer l'expérience conceptuelle de Newton démontrant qu'un satellite artificiel pourrait être mis en orbite autour de la Terre;

S4P-2-08 appliquer la loi de la gravitation universelle et les équations de mouvement circulaire pour calculer les caractéristiques du mouvement d'un satellite, entre autres la période de l'orbite, la vitesse, l'altitude au dessus de la surface de la Terre, la masse du corps central, la position de satellites géostationnaires;

S4P-0-1c rattacher l'historique des idées scientifiques et de la technologie à la forme et à la fonction du savoir scientifique actuel;  
RAG : B1

L'intention de ce bloc d'enseignement est de stimuler l'imagination des élèves en étudiant un sujet d'actualité. Les satellites autour de la Terre, les sondes spatiales et l'exploration planétaire sont souvent dans les reportages faits par les médias.

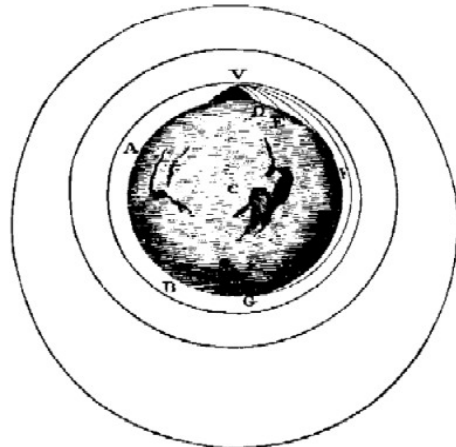
### Stratégies d'enseignement suggérées

#### En tête

1

Activer les connaissances antérieures des élèves en les invitant à compléter un cadre SVA ou à faire une chaîne de graffitis coopératifs (voir *L'enseignement des sciences de la nature au secondaire*, p. 3.16 et 3.17). Les questions suivantes pourraient servir de guide :

- *Qu'arrive-t-il si on augmente la vitesse d'un projectile lancé horizontalement?*
- *Est-ce qu'un projectile peut être mis en orbite?*
- *Le projectile ne retomberait-il pas sur la Terre?*
- *Un satellite se déplace à quelle vitesse?*
- *Un satellite retombe-t-il éventuellement à la surface de la Terre?*



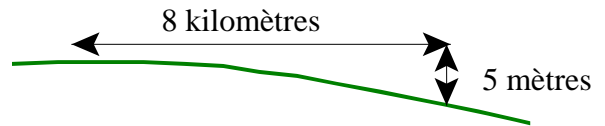
Les orbites partant de V et finissant à D, E, F et G appartiennent aux projectiles lancés avec des vitesses horizontales de plus en plus grandes. Newton reconnaissait que la résistance de l'air empêcherait les satellites près de la Terre de se déplacer suivant ces trajectoires idéales ou de poursuivre longtemps leur mouvement. Il signala que sur des orbites éloignées, les satellites pourraient se déplacer éternellement.

- Les satellites font leur orbite à quelle altitude?
- Y a-t-il de la gravité dans l'espace?
- Le mouvement d'un satellite est-il ralenti par le frottement?

## En quête

1

A) Présenter aux élèves l'expérience conceptuelle de Newton. Il est le premier à prédire qu'on pourrait mettre un satellite artificiel en orbite autour de la Terre. Newton a imaginé le sommet d'une haute montagne et s'est posé la question suivante : « Qu'arriverait-il si on montait un gros canon au sommet de cette montagne et on tirait des projectiles horizontalement? ». Newton savait que le champ gravitationnel de la Terre attirerait le projectile vers le sol, mais il se dit que si le projectile était tiré à une vitesse suffisamment élevée, il tomberait autour de la Terre (serait en orbite). Les satellites de la Terre font leur orbite à une altitude plus élevée que l'atmosphère, afin que leur mouvement ne soit pas affecté par la résistance de l'air. Les satellites sont des projectiles, car la seule force qui agit sur eux est la force gravitationnelle. Sans cette force, le satellite poursuivrait son mouvement sur une trajectoire en ligne droite et tangentielle à la Terre (première loi de Newton). En effet, un satellite tombe vers la Terre. Cependant, il n'atterrit jamais sur la Terre. La Terre n'est pas plate; elle est ronde et fait un arc d'environ 5 m vers le bas à tous les 8 km. Un satellite qui fait une orbite autour de la Terre doit donc voyager une distance horizontale de 8 km avant de tomber d'une distance verticale de 5 m. Inviter les élèves à résoudre le problème suivant :



Un projectile lancé horizontalement tomberait quelle distance dans sa première seconde de mouvement?

$$\Delta d_y = v_y \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2$$

Puisque la vitesse verticale initiale a une valeur de zéro,  $\Delta d_y = \frac{1}{2} a \Delta t^2$ .

$$\Delta d_y = \frac{1}{2} (10) (1)^2 = 5 \text{ m.}$$

Un projectile lancé avec une vitesse horizontale de 8000 m/s va tomber vers la Terre avec une trajectoire qui s'agence avec la courbure de la Terre. Le projectile « tombe » donc autour de la Terre, accélérant toujours vers la Terre à cause de son attraction gravitationnelle, mais n'atteignant jamais le sol. Un tel projectile devient un satellite en orbite.

Le site  
<http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/kap7/orbiter/orbit.htm>  
 présente une simulation  
 du lancement d'un  
 satellite.

B) Expliquer aux élèves que la plupart des satellites ont une orbite circulaire ou presque circulaire. La force gravitationnelle agit comme une force centripète, maintenant le satellite dans son orbite. On peut donc dire que :

$$\frac{G m_T m_s}{R^2} = \frac{m_s v_s^2}{R}$$

$m_T$  est la masse de la Terre

$m_s$  est la masse du satellite

$R$  est la séparation entre la Terre et le satellite (rayon de la Terre plus l'altitude du satellite à partir de la surface de la Terre). On peut aussi calculer

la période de l'orbite du satellite avec les équations  $a = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$  et  $\vec{v} = \frac{2\pi r}{T}$ .

Inviter les élèves à résoudre des problèmes de mouvement d'un satellite

(voir l'**annexe 5**). Corriger ces problèmes en classe afin d'évaluer la compréhension des élèves (le corrigé figure à l'**annexe 6**).

Un satellite en orbite géostationnaire demeure au même point par-dessus la surface de la Terre lorsque cette dernière subit sa rotation. La période d'un objet en orbite géostationnaire est donc 24 heures.

## En fin

1

Inviter les élèves à discuter de la question suivante :

- *Puisque Newton avait déterminé qu'il était possible de mettre un satellite en orbite dès le XVII<sup>e</sup> siècle, pourquoi cela a-t-il pris jusqu'à 1957 à en lancer?*

## Stratégies d'évaluation suggérées

1

Inviter les élèves à résoudre des problèmes semblables à ceux de l'annexe 5.

2

Inviter les élèves à rédiger un court texte au sujet de l'expérience conceptuelle de Newton, par exemple :

- une lettre de Newton à un collègue;
- un article rédigé par un journaliste;

## La microgravité

### Résultats d'apprentissage spécifiques

S4P-2-09 définir la microgravité comme un milieu où le poids apparent d'un corps est inférieur à son poids réel;

S4P-2-10 décrire des conditions dans lesquelles la microgravité peut se produire, *par exemple le saut à partir d'un plongeur, la chute libre dans un avion, le vaisseau spatial en orbite;*

### Stratégies d'enseignement suggérées

#### En tête

1

Poser les questions suivantes aux élèves :

- Avez-vous déjà été sur une montagne russe? Quelle sensation avez-vous lorsque le wagon arrive au haut d'une colline et se met à descendre rapidement? Pourquoi?
- Quelle sensation ressentez-vous lorsqu'un ascenseur se met à descendre?
- Pourquoi les astronautes flottent-ils dans la navette spatiale?

#### En quête

1

A) L'Internet représente une excellente ressource pour une exploration de la microgravité. Inviter les élèves à faire une recherche dans Internet sur la microgravité. Les sites Web, *Un guide des sciences en microgravité pour les étudiants de tous âges*, *Le voyage dans l'espace et les effets de l'apesanteur sur le corps humain* et *Sciences en microgravité* fournissent la plupart des renseignements. Les questions suivantes peuvent servir de guide:

- *Expliquez ce qu'est la microgravité.*
- *Décrivez des situations dans lesquelles la microgravité peut se produire.*
- *Quels sont les effets de la microgravité sur le corps humain?*
- *Pourquoi étudie-t-on la microgravité?*

Des renseignements pour l'enseignant au sujet de la microgravité figurent à l'**annexe 7**.

B) À l'aide des renseignements recueillis lors de leur recherche dans Internet, inviter les élèves à préparer une affiche qui représente la microgravité et ses applications.

## En fin

1

Inviter les élèves à compléter l'activité de l'**annexe 8**.

## Stratégies d'évaluation suggérées

1

Inviter les élèves à compléter un cadre de concept pour représenter la microgravité (voir *L'enseignement des sciences de la nature au secondaire*, p. 11.23-11.26 et p. 11.36).

2

Évaluer les affiches des élèves selon des critères tels que :

- L'information présentée est claire et bien organisée;
- Les applications de la microgravité sont bien expliquées et présentent les détails voulus;
- Les illustrations sont attrayantes et facilitent la compréhension de l'information écrite;
- Il n'y a aucune erreur grammaticale ni faute d'orthographe.

## La rentrée d'un objet dans l'atmosphère de la Terre

### Résultats d'apprentissage spécifiques

S4P-2-11 nommer des facteurs influant sur le retour d'un objet dans l'atmosphère terrestre, entre autres la force de frottement, les forces *g*;

S4P-0-3a analyser, selon diverses perspectives, des avantages et des inconvénients pour la société et l'environnement lorsqu'on applique des connaissances scientifiques ou on introduit une technologie particulière;

RAG : B1, B2

S4P-0-3c relever des enjeux d'ordre social liés aux sciences et à la technologie, en tenant compte des besoins humains et environnementaux et des considérations éthiques;

RAG : B3, B5

S4P-0-4e manifester un intérêt soutenu et plus éclairé dans les sciences et les questions d'ordre scientifique;

RAG : B4, B5

### Stratégies d'enseignement suggérées

#### En tête

1

Discuter avec les élèves d'un sujet d'actualité portant sur la rentrée dans l'atmosphère d'un vaisseau spatial, d'un satellite ou d'une sonde, par exemple l'accident lors du retour dans l'atmosphère de la navette Columbia en février 2003. Les questions suivantes peuvent servir de guide :

- Pourquoi la navette s'est-elle désintégrée lors de la rentrée?
- Quels sont des facteurs qui influent la rentrée dans l'atmosphère?

Le site Internet *Chronologie shuttle* ([http://www.capcomespace.net/dossiers/espace\\_US/shuttle/index.htm](http://www.capcomespace.net/dossiers/espace_US/shuttle/index.htm)) présente des renseignements sur l'accident de Columbia, y inclus des vidéos de la rentrée.

## En quête

1

Inviter les élèves à se renseigner sur le retour d'objets dans l'atmosphère terrestre (voir l'**annexe 9**) et de noter les concepts clés. Cela peut se faire dans des simples notes ou en utilisant une structure de carte conceptuelle.

## En fin

1

Inviter les élèves à identifier des modifications effectuées aux futures missions spatiales afin d'assurer un atterrissage réussi.

2

Inviter les élèves à discuter de la question suivante :

- *Que doit-on faire lorsqu'on veut laisser retomber sur la Terre un satellite ou une station spatiale?*

## Stratégies d'évaluation suggérées

1

Inviter les élèves à :

- raconter une histoire décrivant une rentrée non réussie;
- rédiger un témoignage de la part d'un astronaute qui craint la rentrée et qui justifie ses inquiétudes;
- rédiger une interview entre un journaliste et un ingénieur qui se vante des dispositifs de sécurité qui assurent la rentrée sécuritaire de son vaisseau spatial.

# L'exploration spatiale

## Résultats d'apprentissage spécifiques

S4P-2-12 Décrire de façon qualitative des défis technologiques reliés à l'exploration de l'espace, *par exemple la communication, la gravicélération et l'effet « lance-pierre », les orbites de transfert de Hohmann (orbites à énergie minimale);*

S4P-0-3b décrire des exemples d'évolution de la technologie à la suite de progrès dans le savoir scientifique, et des exemples d'évolution du savoir scientifique résultant d'innovations technologiques;  
RAG : A2, B2

S4P-0-4e manifester un intérêt soutenu et plus éclairé dans les sciences et les questions d'ordre scientifique;  
RAG : B4, B5

## Stratégies d'enseignement suggérées

### En tête

1

Inviter les élèves à faire un remue-méninge sur les défis technologiques reliés à l'exploration de l'espace. Les questions suivantes pourraient servir de guide :

Des renseignements pour l'enseignant sur les défis technologiques reliés à l'exploration spatiale figurent à l'**annexe 10**.

- *Comment peut-on communiquer avec une sonde spatiale qui est dans l'espace lointain?*
- *Quels seraient des défis si on envoyait des humains vers Mars?*
- *Comment peut-on envoyer un engin spatial sur une planète lointaine?*

## OU

Visionner des extraits de films populaires traitant de l'exploration spatiale, par exemple *Star Trek* ou *La guerre des étoiles*. Inviter les élèves à évaluer si les situations sont vraisemblables.

### En quête

1

Proposer aux élèves d'effectuer une recherche sur les défis liés à l'exploration spatiale et des nouvelles technologies qui pourraient permettre l'exploration de l'espace lointain. Élaborer des critères d'évaluation avec les élèves. Les critères devraient porter aussi bien sur le contenu que sur les éléments de la présentation, par exemple :

- une description des défis liés à l'exploration spatiale est incluse;
- des descriptions de technologies qui pourraient résoudre certains défis sont incluses;
- des schémas sont inclus et facilitent la compréhension de l'information écrite;
- l'information présentée est claire et bien organisée;
- un vocabulaire adéquat est utilisé
- il y a peu de fautes d'orthographe ou d'erreurs grammaticales.

Une animation représentant une orbite de transfert peut être accédée au site <http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/qtulloue/Meca/Planetes/transfert.html>

### En fin

1

Inviter les élèves à répondre aux questions suivantes dans leur carnet scientifique :

- *Est-ce que votre compréhension de l'exploration de l'espace lointain a changé?*
- *Est-ce que vous avez de nouvelles questions par rapport à l'exploration spatiale?*
- *Croyez-vous qu'il sera possible d'envoyer des humains vers d'autres planètes?*

### Stratégies d'évaluation suggérées

1

Évaluer le travail de recherche des élèves en fonction des critères établis avec eux.

# Les champs électriques

## Résultats d'apprentissage spécifiques

S4P-2-13 comparer les champs gravitationnels et électriques, et la loi du carré de la distance qui les lie;

S4P-2-14 énoncer la loi de Coulomb et résoudre des problèmes concernant plusieurs forces électriques agissant sur une charge, entre autres des forces en une et deux dimensions;

S4P-0-2c formuler des définitions opérationnelles de variables ou de concepts importants;  
RAG : A2, C8

S4P-0-2g Inférer et calculer des relations directes, des relations proportionnelles au carré et des relations inversement proportionnelles entre des variables à l'aide de modèles mathématiques;  
RAG : C3, C8

S4P-0-2h analyser des problèmes au moyen de vecteurs, entre autres l'addition et la soustraction de vecteurs à n'importe quel angle.  
RAG : C2, C3

## Stratégies d'enseignement suggérées

### En tête

1

Activer les connaissances antérieures des élèves en ce qui a trait à la définition quantitative de l'intensité du champ gravitationnel et du champ électrique.

### En quête

1

A) Proposer aux élèves de faire une activité pour déterminer la relation entre la force électrique et la distance entre les charges (voir *Physique 12*, p. 372 et 373). Demander aux élèves de préparer un rapport d'expérience.

B) Présenter aux élèves la loi de Coulomb (voir *Physique 12*, p. 327-331 ou *Principes fondamentaux de la physique: un cours avancé*, p. 579-586) en faisant le lien avec la loi de gravitation universelle. Inviter les élèves à mettre la formule en application en faisant la résolution de problèmes (voir *Physique 12*, p. 330 et 331 ou *Principes fondamentaux de la physique: un cours avancé*, p. 583 et 586). S'assurer de donner des problèmes incluant des forces agissant à n'importe quel angle. Revoir les problèmes en classe pour s'assurer que les élèves saisissent bien les concepts.

En secondaire 3, les élèves ont défini l'intensité du champ gravitationnel en termes quantitatifs

$(\vec{g} = \frac{\vec{F}_g}{m})$  et ont tracé des diagrammes du champ

gravitationnel. Les élèves ont aussi défini l'intensité du champ électrique en termes

quantitatifs  $(\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q})$  et ont tracé des

diagrammes de champs électriques.

La nature inversement proportionnelle du champ gravitationnel a été étudiée au bloc d'enseignement D.

Un exemple de problème sur la loi de Coulomb figure à l'annexe 11.

### En fin

1

Inviter les élèves à résoudre des problèmes sur la loi de Coulomb en utilisant la technique des notes explicatives (voir *L'enseignement des sciences de la nature au secondaire*, p. 13.14 et 13.15)

## Stratégies d'évaluation suggérées

1

Inviter les élèves à comparer les champs gravitationnel et électrique en complétant un cadre de comparaison (voir *L'enseignement des sciences de la nature au secondaire*, p. 10.15-10.18 et 10.24)

2

Évaluer le rapport d'expérience des élèves en portant une attention particulière à la formulation d'une hypothèse, à l'analyse des données et à la conclusion.

3

Inviter les élèves à résoudre des problèmes sur la loi de Coulomb.

## Le champ électrique entre deux plaques parallèles

### Résultats d'apprentissage spécifiques

S4P-2-15 tracer des diagrammes illustrant de quelle façon la distribution de charges sur deux plaques parallèles de charge opposée se traduit par un champ uniforme;

### Stratégies d'enseignement suggérées

#### En tête

1

Activer les connaissances antérieures des élèves en les invitant à tracer des diagrammes de champs électriques pour une charge d'essai positive dans les situations ci-dessous :

- a proximité d'une autre charge (positive ou négative)
- à proximité de deux charges de même signe
- entre deux plaques parallèles dont les charges sont de signes opposés.

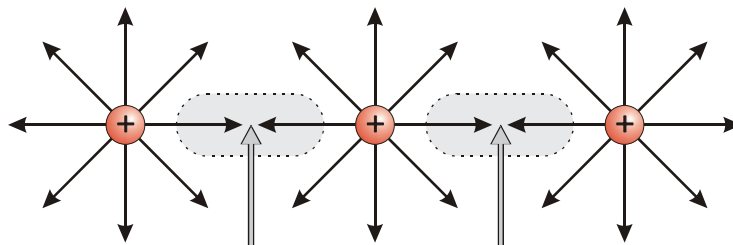
#### En quête

1

Expliquer aux élèves de quelle façon la distribution de charges sur deux plaques parallèles de charge opposée se traduit par un champ uniforme. Pour une plaque parallèle, imagine des charges positives placées dans un plan sur la plaque du haut. Chaque charge ponctuelle crée un champ électrique égal autour d'elle-même. Les charges voisines ont des champs ayant la même intensité mais une direction opposée, donc s'annulent. Dans les régions par-dessus et par-dessous le plan, toutes les composantes du champ qui sont parallèles au plan vont s'annuler.

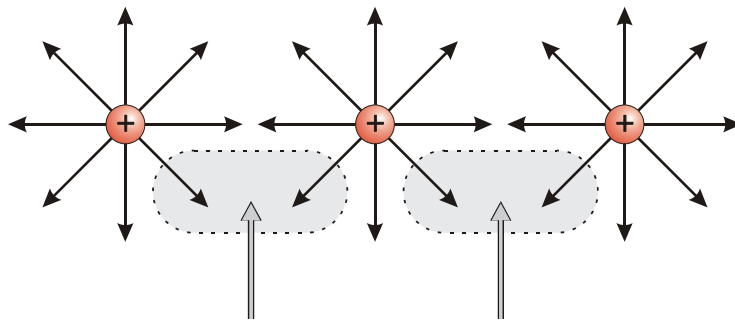
En physique secondaire 3, les élèves ont tracé des diagrammes de champ électrique entre deux plaques parallèles dont les charges sont de signes opposés. En secondaire 4, Les élèves déterminent de façon quantitative pourquoi le champ est uniforme. La nature vectorielle de la force électrique a été présentée au bloc I.

Le site internet *À la découverte des champs électriques* ([http://www.gel.ulaval.ca/~mbusque/elec/main\\_f.html](http://www.gel.ulaval.ca/~mbusque/elec/main_f.html)) permet de visualiser les effets des champs électriques.



Les lignes de champ horizontales s'annulent.

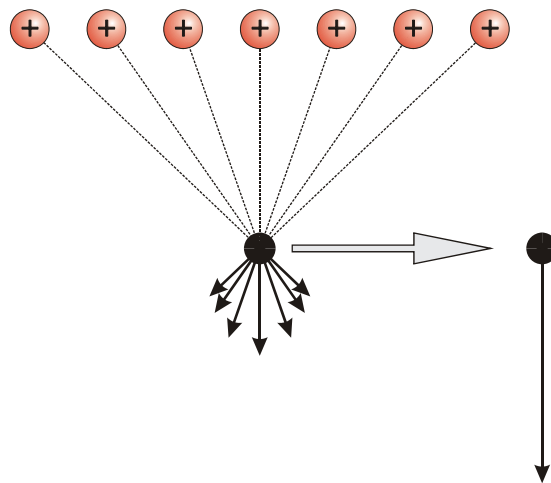
Les composantes du champ qui sont perpendiculaire au plan vont augmenter le champ électrique perpendiculaire au plan. Pour une plaque chargée positivement, le champ s'éloigne de la plaque. Pour une plaque chargée négativement, le champ se dirige vers la plaque.



Si on place négative une plaque champ entre augmentera et sera orienté de la plaque positive vers la plaque négative.

**Les composantes horizontales s'annulent et les composantes verticales s'additionnent.**

une plaque parallèlement à positive, le les deux plaques



**En fin**

### Stratégies d'évaluation suggérées

1

Inviter les élèves à dessiner des diagrammes de champ électrique pour deux plaques parallèles et à expliquer pourquoi le champ est uniforme.

## L'énergie potentielle électrique

### Résultats d'apprentissage spécifiques

S4P-2-16 dériver l'équation pour l'énergie potentielle électrique entre deux plaques parallèles de charge opposée ( $E_e = q\epsilon\Delta d$ );

S4P-2-17 décrire le potentiel électrique comme l'énergie potentielle électrique par unité de charge;

S4P-2-18 définir l'unité de potentiel électrique (volt);

S4P-2-19 définir la différence de potentiel électrique (tension) et décrire le champ électrique entre deux plaques parallèles de charge opposée en termes de la tension et de la séparation

entre les plaques  $\left( \varepsilon = \frac{\Delta V}{d} \right)$ ;

S4P-2-20 résoudre des problèmes sur des charges se déplaçant entre ou à travers des plaques parallèles;

## Stratégies d'enseignement suggérées

### En tête

1

Activer les connaissances antérieures des élèves sur les champs électriques et sur l'énergie potentielle gravitationnelle. Les questions suivantes peuvent servir de guide :

- *Comment l'énergie cinétique et l'énergie potentielle gravitationnelle changent-elles quand on soulève un objet?*
- *Comment l'énergie cinétique et l'énergie potentielle gravitationnelle changent-elles quand on laisse tomber un objet?*
- *Que signifie l'expression intensité du champ électrique?*
- *Quelle formule permet de calculer l'intensité d'un champ électrique?*

Dans le premier regroupement, les élèves ont vu que le travail effectué sur un objet est égal à la variation d'énergie potentielle.

### En quête

1

A) Amener les élèves à dériver l'équation pour l'énergie potentielle électrique. Les questions suivantes peuvent servir de guide:

- *Comment calcule-t-on le travail effectué sur un objet?  $W = \vec{F} \Delta \vec{d}$*
- *Comment calcule-t-on la force électrique?  $\vec{F} = q\vec{e}$*
- *À partir des formules de travail et de force électrique, comment pourrait-on calculer le travail effectué sur une charge électrique?  $W = q\vec{e} \Delta \vec{d}$*
- *Le travail effectué sur un objet est toujours égal à la variation d'énergie de l'objet ( $W = \Delta E$ ). Si on veut déplacer une charge à partir d'un point où son énergie initiale est égale à zéro, comment pourrait-on calculer l'énergie potentielle électrique emmagasinée dans la charge? ( $E_e = q\vec{e} \Delta \vec{d}$ )*

L'annexe 12 comprend des renseignements pour l'enseignant sur l'énergie potentielle électrique.

B) Expliquer aux élèves le concept de potentiel électrique (voir l'annexe 12) et les inviter à résoudre des problèmes sur l'énergie potentielle électrique et sur le mouvement de charges entre ou à travers des plaques chargées (voir l'annexe 13). Réviser les problèmes avec les élèves pour vérifier leur compréhension (le corrigé figure à l'annexe 14). Au besoin, réviser la matière ou la revoir en profondeur.

## En fin

1

Inviter les élèves à consolider leur compréhension des termes suivants au moyen du procédé tripartite (voir *L'enseignement des sciences de la nature au secondaire*, p. 10.9, 10.10 et 10.22 : *énergie potentielle électrique, potentiel électrique, différence de potentiel électrique*).

## Stratégies d'évaluation suggérées

1

Inviter les élèves à compléter un test semblable à celui de l'annexe 13.

2

Inviter les élèves à comparer l'énergie potentielle électrique et l'énergie potentielle gravitationnelle au moyen d'un cadre de comparaison (voir *L'enseignement des sciences de la nature au secondaire*, p. 10.15 à 10.18 et p. 10. 24).

# Les champs électriques et magnétiques

## Résultats d'apprentissage spécifiques

S4P-2-21 utiliser les règles de la main pour décrire les rapports directionnels entre les champs électriques et magnétiques et le déplacement de charges;

S4P-2-22 décrire des technologies qui utilisent des champs électriques et magnétiques, *par exemple les dispositifs électromagnétiques (solénoïde, moteur, cloche, relais), le tube cathodique, le spectromètre de masse, l'antenne;*

## Stratégies d'enseignement suggérées

### En tête

1

Activer les connaissances antérieures des élèves en ce qui concerne les règles de la main droite. Les questions suivantes pourraient servir de guide:

|   |
|---|
| Les élèves ont étudié le champ magnétique autour d'un fil conducteur et le champ magnétique d'un solénoïde en physique, secondaire 3. |
|---|

- *Tracez le champ magnétique entourant un fil conducteur si le courant circule de gauche à droite.*
- *Tracez le champ magnétique entourant un fil conducteur si le courant circule de droite à gauche.*

### En quête

1

- A) Présenter aux élèves la règle de la main droite pour déterminer l'orientation de la force magnétique pour une charge qui se déplace (voir *Physique 12*, p. 404-407).
- B) Inviter les élèves à effectuer une recherche sur une technologie qui utilise des champs électriques et magnétiques. Leur demander de partager l'information recueillie selon la méthode de leur choix (p. ex., exposé oral, brochure informative, affiche). Peu importe la méthode choisie, le travail des élèves devrait contenir les renseignements suivants :

- Explication du fonctionnement de la technologie
- L'utilité de la technologie

- Un diagramme ou dessin

## **En fin**

**1**

Inviter les élèves à inscrire les règles de la main droite pour les conducteurs rectilignes, les solénoïdes et pour déterminer l'orientation de la force magnétique.

## **Stratégies d'évaluation suggérées**

**1**

Déterminer des critères d'évaluation pour la recherche en collaboration avec les élèves. La liste de renseignements nécessaires pourrait être à la base des critères d'évaluation portant sur le « contenu ». Les critères additionnels peuvent comprendre des éléments portant sur l'efficacité de la présentation.

**2**

Inviter les élèves à utiliser les règles de la main pour décrire les rapports directionnels entre les champs électriques et magnétiques et le déplacement de charges (voir *Physique 11*, p. 591, 592, 601 et 602).

## **Annexe 1 : Le processus de prise de décisions**

Le processus de prise de décision est un moyen d'analyser des questions et de faire un choix parmi différentes mesures. Les questions sont souvent complexes et ne donnent pas lieu à une réponse unique. Elles peuvent aussi susciter de la controverse lorsqu'elles portent sur des valeurs individuelles et collectives. Par leur nature, les enjeux suscitent des opinions diverses. Chacun doit, individuellement, mettre en balance le bien et le mal, les coûts et les avantages, la justice et l'injustice, et parvenir à une interprétation équitable et tolérante. Certains de ces enjeux provoquent des désaccords sincères entre des gens pourtant raisonnables. Pour prendre une décision informée, les élèves doivent maîtriser les concepts scientifiques liés à la question et aussi être sensibilisés aux valeurs à l'origine d'une décision. Le processus comporte une série d'étapes, notamment :

- Cerner et clarifier la question
- Connaître les différents points de vue et/ou les personnes concernées par la question
- Évaluer d'un regard critique l'information disponible
- Déterminer les options possibles ou les positions adoptées sur le sujet
- Évaluer les répercussions liées aux options possibles ou aux positions adoptées sur le sujet
- Être sensibilisé aux valeurs pouvant orienter une décision
- Prendre une décision réfléchie et fournir des justifications
- Donner suite à une décision
- Réfléchir au processus

Les élèves ont pris connaissance du processus de prise de décisions dans les cours de sciences du secondaire 1. Si les élèves ne possèdent pas beaucoup d'expérience en matière de prise de décisions, l'enseignant peut aborder le processus avec plus d'encadrement, donnant ainsi aux élèves la chance d'utiliser cette approche dans un environnement structuré. On peut ainsi choisir de leur présenter un scénario précis ou une question particulière à étudier. Les élèves prendront éventuellement une part active dans le processus en choisissant leurs propres questions, en effectuant leurs propres recherches, en prenant leurs propres décisions et en donnant suite à ces décisions.

On peut aborder le processus de prise de décisions sous divers angles. Par exemple, les élèves peuvent jouer le rôle de différentes personnes concernées par une question, travailler en équipes pour discuter d'une question ou prendre une décision en se fondant sur leurs propres recherches et valeurs personnelles. On peut demander aux élèves de prendre position et de débattre d'une question ou les placer dans une situation les obligeant à en venir à un consensus. Peu importe la méthode utilisée, les questions suivantes peuvent orienter les élèves dans le processus de prise de décisions :

- Quelle est la question?
- Quelles sont les données scientifiques importantes nécessaires pour comprendre cette question? Où puis-je trouver ces renseignements?
- Qui a des intérêts dans cette affaire et pourquoi?
- Quelles sont les options possibles?
- Quel est le pour et le contre de chacune des options éventuelles?
- Quelle est ma décision? Quels critères ont mené à la prise de cette décision?

### **Évaluation**

Puisqu'il existe de multiples façons d'aborder une question, divers résultats ou événements culminants peuvent découler du processus de prise de décisions, par exemple, une assemblée locale, une table ronde, une conférence, un débat, une étude de cas, un exposé de principe, un exposé en classe, une discussion en classe, etc. Peu importe le résultat ou l'événement,

l'évaluation devrait mettre l'accent sur les compétences précisées dans le regroupement 0, ainsi que sur la compréhension et l'utilisation des concepts scientifiques.

#### Exemples de critères

Pour les jeux de rôles, comme les assemblées locales, les tables rondes ou les conférences, les critères d'évaluation devraient porter sur la capacité des élèves à entrer dans la peau de l'intervenant personifié. Ils pourraient comprendre les critères suivants :

- Les opinions sont clairement définies
- Des preuves à l'appui des arguments sont présentées
- Les réponses aux questions sont claires et conformes à l'opinion de l'intervenant
- L'exposé est clair et organisé
- L'opinion de l'intervenant est présentée avec précision
- Absence de parti pris personnel
- Le langage et l'attitude sont appropriés

Pour un travail demandant une décision personnelle, tel qu'un exposé de principe, des critères d'évaluation pourraient comprendre :

- La position est clairement définie
- Bonne compréhension des connaissances scientifiques impliquées
- Des preuves à l'appui des arguments sont présentées
- Les arguments opposés sont présentés ainsi que des preuves à l'appui de ces arguments
- Des raisons sont présentées expliquant pourquoi les arguments opposés n'ont pas été acceptés
- Les sources ont été citées dans un format acceptable

Pour un débat, des critères d'évaluation pourraient comprendre :

- L'introduction est organisée et reste concentrée sur le sujet
- Des preuves à l'appui des arguments sont présentées
- Les arguments sont clairs et convaincants
- Tous les membres de l'équipe participent de façon équitable et efficace
- Les éléments présentés dans l'observation finale sont directement liés au sujet

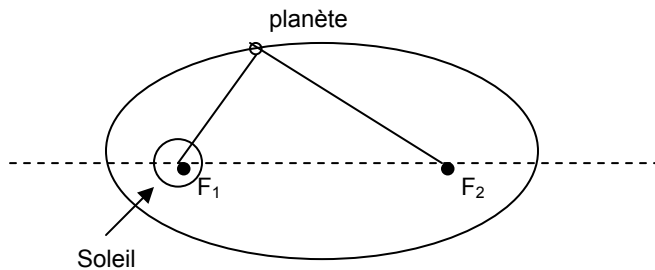
## ANNEXE 2 : De Kepler à Newton – Renseignements pour l'enseignant

Au 16<sup>e</sup> siècle, la plupart des gens croient à un modèle géocentrique du système solaire, selon le modèle de Ptolémée. En 1543, Nicolas Copernic remet en question le modèle de Ptolémée et propose que la Terre tourne autour du Soleil. Cependant, sa théorie ne permet pas de prédire avec plus de précision la position des planètes dans le ciel que le modèle géocentrique de Ptolémée.

Tycho Brahé (1546-1601) est passionné de l'astronomie et effectue une grande quantité d'observations scientifiques. Il ne propose cependant aucune nouvelle explication pour le mouvement des planètes. C'est Johannes Kepler (1571-1630) qui développe des explications pour les observations de Tycho Brahé. Johannes Kepler est embauché par Tycho Brahé qui lui donne l'orbite de Mars à calculer. Tycho meurt en 1601, un an après avoir embauché Kepler. Kepler continue ses travaux à l'aide des données de Tycho Brahé. Cela lui prend six ans et des milliers de pages de calculs avant de résoudre le problème de l'orbite de Mars! Il constate que l'erreur de ses premiers essais était de demeurer accroché au concept des orbites parfaitement circulaires. Il propose en 1609 un modèle dans lequel les planètes tournent autour du Soleil dans une orbite elliptique et non circulaire. Le modèle de Kepler n'est pas beaucoup plus précis que celui de Ptolémée, mais finit par être adopté par les scientifiques à cause de sa simplicité. Il prédit aussi bien que le modèle de Ptolémée, mais est beaucoup plus facile à utiliser. Les lois de Kepler sur le mouvement orbital sont encore utilisées aujourd'hui pour calculer, par exemple, la trajectoire des sondes spatiales.

Kepler publie ses deux premières lois en 1609, la loi des ellipses et la loi des aires égales. Dix ans plus tard, il publie une troisième loi, la loi des périodes. Voici les trois lois de Kepler :

**Première loi :** Chaque planète se déplace autour du Soleil dans une orbite elliptique, le Soleil occupant un des foyers de l'ellipse.

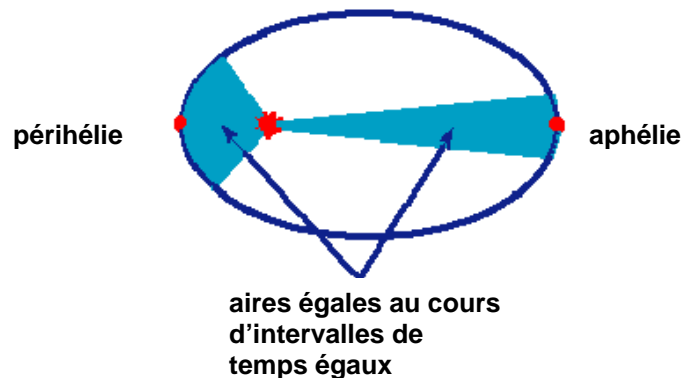


**Deuxième loi :** la droite reliant une planète au Soleil balaie des aires égales pendant des durées égales (chaque planète se déplace plus rapidement lorsqu'elle est plus proche du Soleil et moins rapidement lorsqu'elle est plus éloignée).

**Troisième loi :** le carré de la période orbitale d'une planète autour du Soleil est proportionnel au cube du rayon moyen de l'orbite.

$$(K_s = \frac{R^3}{T^2})$$

Les lois de Kepler permettent de décrire comment les planètes tournaient autour du Soleil, mais ne peuvent expliquer *pourquoi* elles



effectuent ce mouvement. C'est Newton qui donnera cette explication vers la fin du 17<sup>e</sup> siècle.

Newton veut découvrir ce qui cause le mouvement des corps célestes. Il porte son attention en premier lieu sur le mouvement de la Lune. La Lune décrit une orbite presque circulaire autour de la Terre. Si aucune force n'agissait sur elle, elle effectuerait un mouvement en ligne droite, à vitesse constante. Elle doit donc subir une accélération dirigée vers la Terre (accélération centripète) et il doit y avoir une force qui cause cette accélération. Mais quelle est la nature de cette force?

Selon la légende populaire, une pomme tombant d'un arbre sur la tête d'Isaac Newton aurait catalysé sa plus grande idée, celle de la force gravitationnelle. La pomme devait subir une accélération parce que sa vitesse initiale sur la branche avait une valeur de zéro et que cette vitesse augmentait le long de sa chute. Il devait donc y avoir une force exercée sur la pomme. Puisque cette force s'étendait à la cime d'un arbre, ne pourrait-elle pas s'étendre encore plus loin? Cette force ne pourrait-elle pas se rendre jusqu'à la Lune? Il conclut qu'on pourrait comparer le mouvement de la Lune à la chute d'une pomme. L'orbite lunaire serait donc la conséquence d'une force exercée par la Terre sur la Lune.

Newton calcule ensuite l'accélération de la Lune, essentiellement de la même façon que nous calculons l'accélération centripète.

$$a_c = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = \frac{4\pi^2 (3,8 \times 10^8 \text{ m})}{(27,3 \text{ jours})^2} = \frac{4\pi^2 (3,8 \times 10^8 \text{ m})}{(2,3 \times 10^6 \text{ s})^2} = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$$

Newton se pose ensuite la question suivante : Pourquoi l'accélération de la Lune est-elle tellement plus petite que l'accélération de la pomme à la surface de la Terre ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ) si c'est la même force qui cause leur mouvement? Cette force doit diminuer, mais quelle est la relation entre la force et la distance de séparation?

En utilisant les concepts du mouvement circulaire uniforme des planètes autour du Soleil (Kepler avait déterminé que ces orbites étaient elliptiques, mais les calculs pour les orbites circulaires sont plus simples.) et de la troisième loi de Kepler, Newton finit par déterminer cette relation. Voici son raisonnement :

L'équation pour l'accélération centripète d'un objet ayant un mouvement circulaire uniforme

est  $a_c = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$ . La force centripète pour cet objet est donc  $F = ma = \frac{m4\pi^2 R}{T^2}$ . La masse en

question est la masse de la planète. Newton cherche la relation entre la force et la distance de séparation ainsi que la masse. Il élimine donc la période (T) à l'aide de la troisième loi de Kepler

( $K = \frac{R^3}{T^2}$ , donc  $T^2 = \frac{R^3}{K}$ ). L'équation devient donc  $F = \frac{m4\pi^2 R}{T^2} \times \frac{K}{R^3} = (4\pi^2 K) \frac{m}{R^2}$ . Puisque

l'expression  $(4\pi^2 K)$  est une valeur constante, la force d'attraction gravitationnelle sur une planète est directement proportionnelle à la masse de la planète et inversement proportionnelle au carré de la distance qui la sépare du Soleil. Newton parvient aussi à démontrer que les trois lois de Kepler découlent de la loi de la force gravitationnelle.

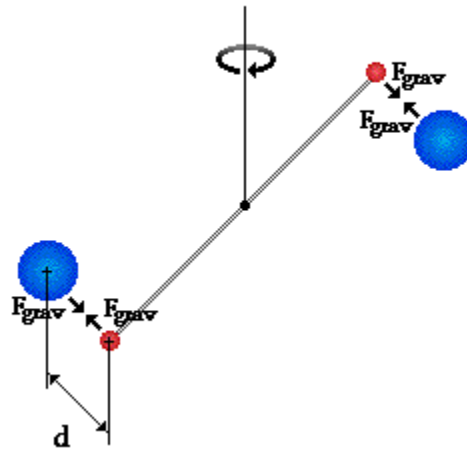
Newton finit par conclure que tous les objets dans l'Univers exercent une attraction gravitationnelle les uns sur les autres.

*Deux corps dans l'univers s'attirent l'un l'autre avec une force directement proportionnelle à la masse de chacun et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare.*

Sa loi de la gravitation universelle peut être exprimée de cette façon :  $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$ .

La valeur de la constante  $G$  a été calculée pour la première fois par Henry Cavendish à l'aide d'une balance de torsion. Cavendish fixe deux petites sphères aux bouts d'une tige suspendue à un fil mince. La force gravitationnelle exercée par deux grandes masses placées près des sphères les attire et le fil subit une torsion. L'angle de torsion était proportionnel à la force gravitationnelle exercée par les deux masses. Cavendish réussit donc à déterminer la force d'attraction entre les masses et donc la valeur de  $G$ . La valeur acceptée aujourd'hui est  $6,67259 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ . Cette valeur est très petite, indiquant que la force gravitationnelle entre deux masses est seulement appréciable pour des objets ayant une masse importante. Deux élèves exercent une force gravitationnelle l'un sur l'autre, mais cette force est trop petite pour être ressentie. Cependant, la force gravitationnelle entre la planète Terre et les élèves peut être ressentie.

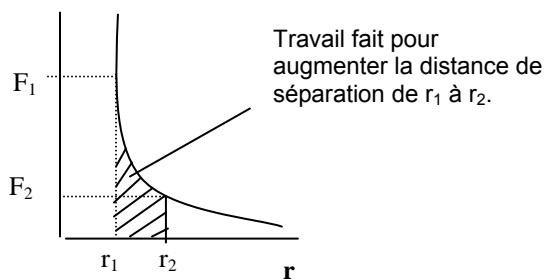
### balance de torsion de Cavendish



### ANNEXE 3 : L'énergie potentielle gravitationnelle, cas général – Renseignements pour l'enseignant

Près de la surface de la Terre, le travail effectué pour soulever un objet est emmagasiné sous forme d'énergie potentielle gravitationnelle. L'équation pour calculer l'énergie potentielle gravitationnelle ( $\Delta E_g = mg\Delta h$ ) n'est utile pour des objets près de la surface de la Terre, où on peut supposer que l'accélération gravitationnelle,  $g$ , est une valeur constante. Mais comment calculer l'énergie potentielle gravitationnelle pour un cas plus général, par exemple l'énergie potentielle gravitationnelle entre une planète et un satellite? Lorsque la distance entre deux masses varie grandement, la force gravitationnelle entre ces masses n'est pas constante. Elle est inversement proportionnelle au carré du rayon qui les sépare. Au bloc précédent, nous avons vu

que la force gravitationnelle universelle est donnée par l'équation  $\frac{Gm_1m_2}{r^2}$ . Le graphique suivante démontre cette relation. Pour passer de  $r_1$  à  $r_2$ , il faut faire un travail qui surmonte la force d'attraction entre les deux objets. Ce travail fait que l'énergie potentielle gravitationnelle du système augmente.



L'aire sous la courbe du graphique ci-dessus est égale au travail effectué pour séparer les deux objets, tout comme l'aire sous la courbe d'un graphique de la force en fonction de la distance, étudié au premier regroupement. La bande rayée représente le travail nécessaire pour séparer deux objets de  $r_1$  à  $r_2$ . Pour calculer l'aire sous la courbe de façon précise, il serait nécessaire d'utiliser des formules de calcul, mais ceci dépasse les attentes du cours de Physique 40S. On peut calculer sa valeur avec  $-\frac{GMm}{r}$ .

Au fur et à mesure que la distance de séparation augmente, l'énergie potentielle gravitationnelle augmente. L'énergie potentielle gravitationnelle a une valeur de zéro lorsque la distance de séparation est infinie. Puisqu'on a donné de l'énergie pour arriver à une valeur de zéro, la valeur initiale de l'énergie potentielle gravitationnelle devait avoir une valeur négative. Le travail effectué pour séparer les masses est égal à la variation d'énergie potentielle gravitationnelle.

Les élèves ont souvent de la difficulté à comprendre que l'énergie potentielle initiale a une valeur négative. Ce signe négatif indique qu'il y a une force d'attraction entre les deux masses et qu'il faut de l'énergie pour arriver à un potentiel de zéro. On appelle souvent ce type de relation d'énergie potentielle un « puits de potentiel ».

#### Libération du champ gravitationnel de la Terre

Inviter les élèves à considérer la question suivante :

- Avec combien d'énergie doit-on lancer une fusée pour qu'elle puisse échapper à l'attraction gravitationnelle de la Terre?

À la surface de la Terre, une fusée possède une énergie potentielle gravitationnelle de  $-\frac{GMm}{r}$ .

À une distance infinie, la fusée posséderait une énergie potentielle gravitationnelle nulle. Il faut donc lui fournir une énergie de  $+\frac{GMm}{r_T}$  pour qu'elle s'échappe du champ gravitationnel de la

Terre. Le montant d'énergie nécessaire pour surmonter les effets du champ gravitationnel de la Terre se nomme **énergie de liaison**. Si on veut lancer une fusée de la surface de la Terre avec assez d'énergie pour qu'elle puisse juste s'échapper du champ gravitationnel de la Terre, on doit lui donner une énergie cinétique égale à l'énergie potentielle gravitationnelle ( $E_c = +\frac{GMm}{r_T}$ ), donc

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{r}.$$

La **vitesse de libération** est la vitesse vectorielle minimum qu'un objet doit avoir pour surmonter les effets du champ gravitationnel de la Terre. On doit donner à l'objet assez d'énergie cinétique pour surmonter l'énergie de liaison de la Terre. Pour calculer la vitesse de libération, on

obtient  $v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$ .

Près de la surface de la Terre, la vitesse de libération a une valeur d'environ 11 km/s. La vitesse de libération est indépendante de la masse de l'objet. Cependant, une fusée très lourde aurait besoin de plus de carburant pour atteindre cette vitesse qu'une fusée plus légère.

## ANNEXE 4 : Le champ gravitationnel – Renseignements pour l'enseignant

La force gravitationnelle sur un objet près de la surface de la Terre est calculée avec l'équation  $F_g = mg$ .

Le concept de constante du champ gravitationnel porte souvent à confusion. L'intensité d'un champ gravitationnel ne consiste pas en une force mais plutôt une force par unité de masse. L'intensité du champ gravitationnel près de la surface de la Terre est de 9,8 N/kg et se dirige vers le centre de la Terre. Ceci veut dire que chaque kilogramme de masse près de la Terre subit une force de 9,8 N. Ce champ est constant à condition que l'on soit près de la surface de la Terre. À mesure qu'on s'éloigne de la surface de la Terre, la force gravitationnelle diminue donc la constante ( $g$ ) va changer. On peut comparer la loi de la gravitation universelle avec le poids d'un objet à différentes distances de la surface de la Terre afin de déterminer la valeur de  $g$  n'importe où dans l'espace.

$$F_g = F_G$$
$$mg = \frac{Gm_1m_{\text{Terre}}}{r^2}$$
$$g = \frac{Gm_{\text{Terre}}}{r^2}$$

Cette équation est valable non seulement pour des objets à la surface de la Terre mais aussi pour des objets au-dessus de la surface de la Terre. Pour des objets plus haut que la surface de la Terre,  $r$  représente la distance entre l'objet et le centre de la Terre. Cette même équation peut être utilisée pour d'autres planètes et étoiles en utilisant leur masse au lieu de celle de la Terre.

Rappel :  $g$  est une constante locale,  $G$  est une constante universelle.

## ANNEXE 5: Exercice – Les satellites

1. Calcule la période d'un satellite mis en orbite autour de la Terre à une altitude de 500 km.
2. Un satellite de télécommunication est en orbite géostationnaire autour de la Terre.  
Calcule :
  - a. l'altitude du satellite;
  - b. la vitesse du satellite.
3. Un satellite d'une masse de  $2,00 \times 10^4$  kg est placé en orbite à une altitude de  $6,00 \times 10^5$  m de la surface de Jupiter.
  - a. Calcule la force d'attraction gravitationnelle entre le satellite et Jupiter.
  - b. Calcule la vitesse du satellite.
  - c. Calcule la valeur de  $g$  à l'altitude du satellite.
  - d. Une des lunes de Jupiter, Europe, a une période de  $3,07 \times 10^5$  s. Calcule le rayon de son orbite.
  - e. Un satellite est placé en orbite autour d'Europe à une altitude de 100,0 km de sa surface. Sa période est  $7,58 \times 10^3$  s. Quelle est la masse d'Europe?

## **ANNEXE 6 : Les satellites – Corrigé**

À développer

## ANNEXE 7 : La microgravité – Renseignements pour l’enseignant

La gravité est une force qui contrôle tout mouvement partout dans l’univers. Elle nous tient sur la Terre, elle fait tourner la Lune et les satellites artificiels autour de la Terre et elle fait tourner la Terre autour du Soleil. Les élèves croient souvent qu’il n’y a aucune force gravitationnelle à l’extérieur de l’atmosphère terrestre (en espace) puisque les astronautes « flottent » dans leur navette spatiale. L’altitude typique d’une navette spatiale est d’environ 500 km au dessus de la surface terrestre. On peut facilement calculer la valeur de la constante du champ gravitationnel (g) à cette altitude.

$$mg = \frac{GMm}{R^2}$$

$$g = \frac{GM}{R^2}$$

$$g = \frac{6,67 \times 10^{-11} (5,98 \times 10^{24})}{(6,38 \times 10^6)^2}$$

$$g = 8,7 \text{ N/kg}$$

L’intensité du champ gravitationnel à cette altitude a 89% de l’intensité du champ à la surface de la Terre. Il n’y a certainement pas une absence de force gravitationnelle!

La **microgravité** se manifeste lorsque le poids apparent d’un objet est petit comparé à son poids actuel. Il n’y a aucune sensation de poids. Tout objet en chute libre est en condition de microgravité. L’astronaute est en chute libre quand il se retrouve en orbite autour de la Terre. Il flotte dans le vaisseau spatial, car il tombe en même temps que celui-ci. Si on laisse tomber une pomme près de la surface de la Terre, elle tombe vers le sol. Si on laisse tomber une pomme dans un vaisseau spatial qui orbite la Terre, la pomme tombe aussi, mais elle semble flotter car le vaisseau tombe à la même vitesse que la pomme. Cependant, la pomme et le vaisseau spatial ne tombent pas vers le Terre, mais autour de la Terre, tel que décrit dans le RAS précédent.

Le phénomène de flottaison causée par la chute libre est aussi possible sur la Terre. Prenons l’exemple d’une personne dans un ascenseur. La force que le plancher de l’ascenseur exerce sur la personne est le poids apparent. Lorsque l’ascenseur est immobile, la force gravitationnelle est exercée vers le bas, et la force exercée par l’ascenseur sur la personne (force normale) agit vers le haut. La somme de ces deux forces donne une force nette égale à zéro. Elle ne subit aucune variation de vitesse et ne bouge pas. Quand l’ascenseur monte, la force nette n’est pas égale à zéro. Puisque l’ascenseur accélère vers le haut, il y a une force nette vers le haut. La personne a donc la sensation d’être plus pesante car une plus grande force est exercée sur ses pieds. Si une personne était à l’intérieur d’un ascenseur et que le câble cédait, elle tomberait vers le bas à la même vitesse que celle de l’ascenseur. Il n’y aurait aucune force exercée par l’ascenseur sur la personne donc celle-ci aurait l’impression de flotter.

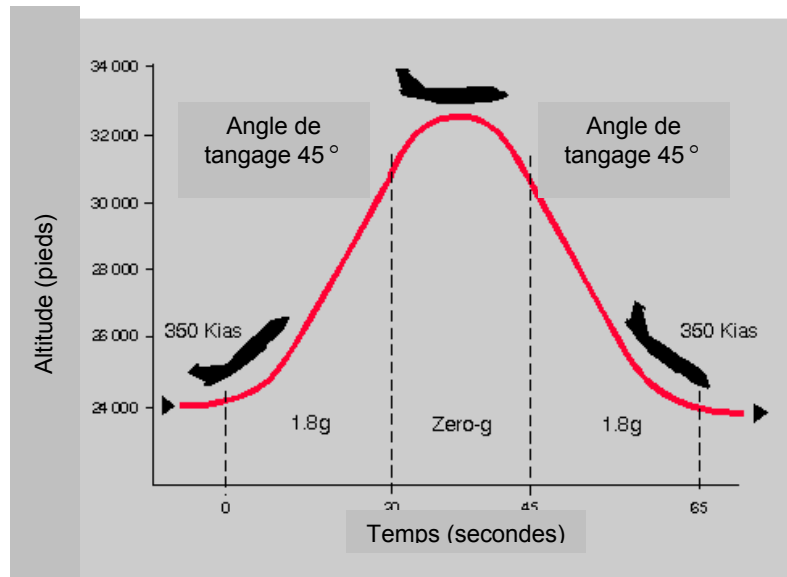
On obtient l’état de microgravité en plaçant des objets en chute libre. Littéralement, la chute libre signifie que le mouvement d’un objet vers le bas est libre, c’est-à-dire que rien ne s’oppose à sa chute. Sur Terre, le sol annule ce mouvement. Lorsqu’un parachutiste saute, sa chute est contrariée par la résistance de l’air sur son corps. La résistance de l’air n’empêche pas une chute, mais elle la ralentit. Cette résistance s’exerce même en orbite. L’air y est quand même présent, mais en très faible quantité. Le degré d’inhibition de la pesanteur, ou la qualité de l’état de microgravité obtenu, est fonction du degré avec lequel les forces qui s’opposent à une chute sont éliminées. Si ces forces étaient éliminées complètement, vous seriez en état d’impesanteur parfaite. Dans le cas de la chute libre ou de la microgravité, les forces de résistance sont infimes.

## Comment reproduire la microgravité

La microgravité peut être reproduite de plusieurs différentes façons. Premièrement, on pourrait s'aventurer dans l'espace lointain afin que la force gravitationnelle de la Terre soit effectivement nulle. Cependant, il faudrait voyager des millions de kilomètres pour accomplir ceci. Il est aussi possible de reproduire la microgravité avec la chute libre. On peut connaître des conditions de microgravité pour de très courts intervalles de temps en sautant sur un tremplin ou sur des manèges dans les parcs d'attractions.

Les tours d'impesanteur sont utilisées pour créer des conditions de microgravité pour de plus longues périodes de temps. Le Centre Lewis de la Nasa a une tour d'impesanteur de 132 mètres. Un état de microgravité peut être maintenu pour environ 5 secondes. Le plus long état de microgravité peut être obtenu au Japon dans un puits de mine d'une profondeur de 490 mètres.

On peut recréer des conditions de chute libre de courte durée à bord d'avions en vol parabolique. Durant l'arc ascendant de la parabole décrite par l'avion, on règle la poussée des moteurs de sorte à annuler la portance. L'appareil est alors en chute libre puisque rien ne s'oppose à la force de pesanteur. L'avion est en chute libre lorsqu'il atteint le sommet de la parabole et pendant une partie de l'arc descendant. On peut ainsi obtenir des conditions de microgravité d'environ 0,02 g pendant 15 à 20 secondes. L'effet est semblable à celui sur une montagne russe. On surnomme l'avion qui crée cet état un « vomit comet ».



L'avion doit premièrement atteindre une altitude de 30 000 pieds (environ 10 000 m) avec une vitesse Mach 1 (300 m/s). L'avion descend ensuite en suivant une courbe parabolique, monte à nouveau, et peut compléter plusieurs paraboles. Les gens dans la cabine sont en chute libre pour environ 23 secondes durant chaque descente, suivie d'une accélération de 2 g en manœuvre de ressource. Un vol typique peut durer plusieurs heures et parvient à réaliser quelque 40 paraboles pour permettre l'équipage de mener des expériences.

Dans le film *Apollo 13* (1995), les réalisateurs ont eu la permission d'utiliser l'avion KC-135 de la NASA pour filmer la séquence « anti-gravité » dans laquelle les acteurs semblent flotter dans la cabine.

La station spatiale internationale orbite autour de la Terre et offre des conditions de microgravité de grande qualité pendant des périodes pratiquement illimitées. Les installations de la Station consistent en des modules d'habitation et en des modules de laboratoire.

## ANNEXE 8 – Exercice de pointage

### Matériel

Ce qu'il faut pour chaque groupe

- *Cible, élève 3*
- Des marqueurs
- Un simulateur 2 g
- Un chronomètre ou une minuterie
- *Fiche de consignation – exercice de pointage, élève 4*

### Que faire?

- Travaillez par équipe de quatre : un lecteur, un chronomètreur, un rapporteur et un pointeur. Le chronométrage commence quand le lecteur donne le premier nombre de la série et se termine quand la main du pointeur revient à la position de départ après avoir touché le dernier nombre.

- Le rapporteur consigne les nombres qui ont été touchés à mesure qu'ils ont été énoncés.

- À la position de départ, le pointeur doit garder l'avant-bras parallèle au plancher, le coude le long du corps.

- Le lecteur énonce à haute voix une série de nombres, en faisant une pause entre chacun, jusqu'à ce que le pointeur touche la cible et ramène son bras à la position de départ.

**ESSAI 1 125, 82, 142, 65, 113, 96, 172, 143, 160, 72**

- Reprenez l'activité, avec le simulateur 2 g fixé à l'avant-bras.

**ESSAI 2 65, 143, 113, 82, 160, 125, 172, 142, 96, 72**

- Enlevez le simulateur 2 g et répétez immédiatement l'activité.

**ESSAI 3 72, 113, 160, 96, 125, 65, 143, 82, 142, 172**

- En groupe, analyser la fiche de consignation et tirez des conclusions.

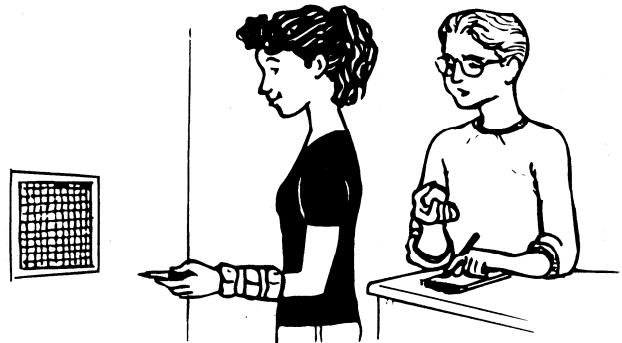
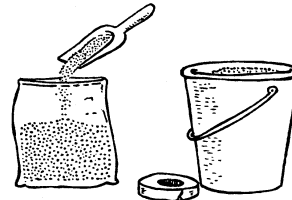
### Discussion

- Quelle influence la présence ou l'absence de poids sur votre bras a-t-elle eu sur votre précision de pointage?

- Les résultats de l'essai 3 étaient-ils les mêmes que ceux de l'essai 1? Pourquoi?

#### Comment fabriquer un simulateur 2 g

- Remplissez un sac auto-scellant avec 2 ou 3 kg de sable humide.
- Scellez le sac en évacuant le plus d'air possible.
- Répartissez le sable de manière uniforme dans le sac.



|     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  |
| 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  |
| 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 45  |
| 46  | 47  | 48  | 49  | 50  | 51  | 52  | 53  | 54  | 55  | 56  | 57  | 58  | 59  | 60  |
| 61  | 62  | 63  | 64  | 65  | 66  | 67  | 68  | 69  | 70  | 71  | 72  | 73  | 74  | 75  |
| 76  | 77  | 78  | 79  | 80  | 81  | 82  | 83  | 84  | 85  | 86  | 87  | 88  | 89  | 90  |
| 91  | 92  | 93  | 94  | 95  | 96  | 97  | 98  | 99  | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 |
| 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 |
| 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 |
| 136 | 137 | 138 | 139 | 140 | 141 | 142 | 143 | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 |
| 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 | 161 | 162 | 163 | 164 | 165 |
| 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 |
| 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 | 191 | 192 | 193 | 194 | 195 |
| 196 | 197 | 198 | 199 | 200 | 201 | 202 | 203 | 204 | 205 | 206 | 207 | 208 | 209 | 210 |
| 211 | 212 | 213 | 214 | 215 | 216 | 217 | 218 | 219 | 220 | 221 | 222 | 223 | 224 | 225 |

Le rapporteur indique au tableau les nombres que le pointeur a touchés à chaque essai.

***Essai 1 - Sans le simulateur 2 g***

| <b>Nombres annoncés</b> | <b>Nombres touchés</b> |
|-------------------------|------------------------|
| 125                     |                        |
| 82                      |                        |
| 142                     |                        |
| 65                      |                        |
| 113                     |                        |
| 96                      |                        |
| 172                     |                        |
| 143                     |                        |
| 160                     |                        |
| 72                      |                        |

***Essai 2 - Avec le simulateur 2 g***

| <b>Nombres annoncés</b> | <b>Nombres touchés</b> |
|-------------------------|------------------------|
| 65                      |                        |
| 143                     |                        |
| 113                     |                        |
| 82                      |                        |
| 160                     |                        |
| 125                     |                        |
| 172                     |                        |
| 142                     |                        |
| 96                      |                        |
| 72                      |                        |

***Essai 3 - Sans le simulateur 2 g***

| <b>Nombres annoncés</b> | <b>Nombres touchés</b> |
|-------------------------|------------------------|
| 72                      |                        |
| 113                     |                        |
| 160                     |                        |
| 96                      |                        |
| 125                     |                        |
| 65                      |                        |
| 143                     |                        |
| 82                      |                        |
| 142                     |                        |
| 172                     |                        |

## **ANNEXE 9 : La rentrée dans l'atmosphère – Renseignements pour l'élève**

Quand un vaisseau spatial veut retourner vers la Terre, il doit premièrement ralentir. Une navette spatiale, telle que la *Discovery*, orbite la Terre à une vitesse d'environ 8000 m/s. Des rétrofusées la font ralentir et descendre à une orbite plus basse et éventuellement rentrer dans l'atmosphère terrestre. À mesure que le vaisseau spatial s'approche de la Terre, la densité de l'atmosphère terrestre augmente. Plusieurs problèmes peuvent subvenir lors de la rentrée dans l'atmosphère :

- Les astronautes doivent être protégés contre la chaleur extrêmement élevée produite lors de la rentrée dans l'atmosphère. Un bouclier thermique formé de briques en céramiques avec une conductivité de chaleur extrêmement petite protège les occupants du vaisseau. La chaleur créée par l'objet n'est pas seulement due au frottement, mais aussi à l'onde de pression créée devant l'objet qui se déplace à une vitesse élevée dans l'atmosphère. À mesure que la pression augmente, la température augmente aussi. La température peut atteindre plus de 2000 °C.
- Si l'angle de pénétration est trop plat, le vaisseau va « rebondir » sur les couches denses de l'atmosphère et sera propulsé à nouveau dans l'espace.
- Si l'angle est trop aigu, la vitesse ne sera pas assez réduite et le frottement de l'air contre le vaisseau causerait tellement de chaleur que le vaisseau brûlerait malgré le bouclier thermique. Les forces g seraient aussi trop élevées pour les astronautes.
- La chaleur extrême cause aussi l'ionisation des molécules de gaz autour du vaisseau spatial. Toute communication avec le sol est donc impossible pour une dizaine de minutes.

Un vaisseau spatial doit utiliser le frottement sur les couches de l'atmosphère pour ralentir et diminuer assez sa vitesse pour atterrir en douceur (une navette doit passer de 8000 m/s à environ 100 m/s). En théorie, un vaisseau pourrait utiliser ses rétrofusées pour ralentir et éviter la chaleur extrême de la rentrée dans l'atmosphère. En réalité, cela n'est pas possible car il faudrait un montant énorme de carburant pour accomplir cette manœuvre. Ce carburant devrait être placé dans le vaisseau au décollage, ce qui augmenterait trop son poids. Il faut donc effectuer des calculs précis pour déterminer comment ralentir au maximum le vaisseau sans créer un réchauffement trop important mais aussi maintenir la stabilité du vaisseau.

## ANNEXE 10 : Défis technologiques reliés à l'exploration spatiale – Renseignements pour l'enseignant

L'énergie nécessaire pour qu'un vaisseau spatial surmonte l'attraction gravitationnelle de la Terre provient de la propulsion chimique du propulseur-fusée. Cependant, les fusées à propulsion chimique ont des limites si l'on veut envoyer un vaisseau spatial au-delà de la Lune. Même pour se rendre à la planète Mars, la prochaine destination logique dans l'espace, un vaisseau spatial nécessiterait tellement de carburant qu'il faudrait en produire de grandes quantités sur la planète-même pour assurer le retour à la Terre. Les scientifiques doivent donc trouver des moyens alternatifs de propulsion.

Sans dépense d'énergie supplémentaire, une sonde peut modifier sa trajectoire, sa vitesse et même son inclinaison par rapport au *plan de l'écliptique*. Elle utilise pour cela un principe directement lié aux lois de la *gravitation universelle* qu'on appelle *l'assistance gravitationnelle* ou *l'effet lance-pierre*.

Lorsque l'engin passe à proximité d'une planète, il entre dans sa zone d'influence. L'attraction qu'il subit a pour conséquence de le faire "tomber" vers l'astre : sa trajectoire se courbe et sa vitesse augmente. La sonde contourne la planète et s'en éloigne en perdant autant de vitesse qu'elle en a gagné à l'arrivée. La manœuvre n'est pas nulle pour autant : la planète, en se déplaçant autour du Soleil, a communiqué une partie de sa vitesse à la sonde.

La modification de vitesse et la déviation de la trajectoire de l'engin dépendent de la masse de l'astre survolé, de l'altitude du survol et de la vitesse relative à laquelle la manœuvre s'effectue. Si le survol s'effectue dans le sens de déplacement de la planète autour du Soleil, la sonde gagne de la vitesse. Si le survol s'effectue dans le sens inverse, la sonde perd de la vitesse. La trajectoire est à l'évidence calculée très précisément à l'avance afin que l'engin survole les planètes qu'il rencontre sans s'y écraser.

Cette technique est utilisée dans la plupart des missions planétaires. A titre d'exemple, sans l'assistance gravitationnelle de Jupiter, la sonde VOYAGER n'aurait jamais pu rencontrer Saturne puis Uranus et Neptune. La sonde GALILEO a quant à elle utilisé l'assistance gravitationnelle de Io, satellite de Jupiter, pour décélérer et pouvoir ainsi s'insérer en orbite jovienne. Jusqu'ici, une dizaine de sondes interplanétaires ont ainsi utilisé l'assistance gravitationnelle, ce qui leur a permis d'atteindre leurs objectifs plus rapidement et d'économiser du carburant.

### Les orbites de transfert de Hohmann

Pour passer d'une orbite circulaire à une autre, un engin spatial doit activer ses fusées afin de modifier l'intensité ou la direction de sa vitesse vectorielle. Si la vitesse vectorielle de l'engin spatial augmente, le rayon de son orbite augmente aussi. L'activation des fusées nécessite du carburant donc le trajet qui nécessite le plus petit montant de carburant est critique dans toute manœuvre spatiale. Un transfert de Hohmann est une façon de passer d'une orbite circulaire à une autre dans un même plan en économisant du carburant. Pour passer d'une orbite plus basse à une orbite plus haute, les fusées de l'engin spatial sont activées afin d'augmenter la vitesse vectorielle. Lorsque l'orbite désirée est atteinte, les fusées sont à nouveau activées afin de ralentir l'engin spatial pour qu'il puisse avoir une orbite stable. Walter Hohmann a découvert en 1925 que la trajectoire la plus efficace pour transférer un objet entre deux planètes est une ellipse dont l'une des extrémités touche la première planète et l'autre la deuxième planète.

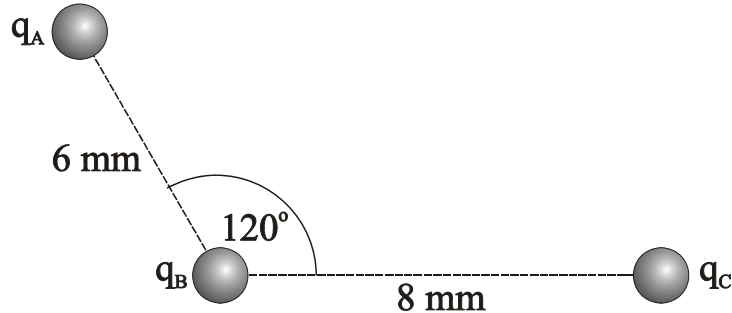
Lorsque vous vous déplacez sur la Terre, vous suivez en général une trajectoire qui vous amène droit vers votre destination, une destination qui demeure dans la même position relative vis à vis de votre point de départ. Ce n'est pas du tout le cas pour les sondes interplanétaires. La trajectoire que l'on imprime à un vaisseau spatial pointe dans une direction qui est totalement inoccupée au moment du départ. Ce n'est qu'au terme du voyage que le point d'arrivée sera occupé par la planète que l'on désire atteindre. C'est cette mobilité de la cible à atteindre et la

ronde perpétuelle des planètes autour du soleil qui explique que les lancements ne peuvent avoir lieu qu'à l'intérieur de périodes bien déterminées dans le temps. On désigne ces périodes propices aux lancements sous le nom de fenêtre de tir.

## ANNEXE 11 : Résolution de problèmes sur la loi de Coulomb – Renseignements pour l'enseignant

Trois charges sont placées tel que l'indique le diagramme suivant. Calcule la force nette qui agit sur la sphère B.

$$\begin{aligned} q_A &= -4,0 \text{ nC} \\ q_B &= -10,0 \text{ nC} \\ q_C &= 6,0 \text{ nC} \end{aligned}$$



Il faut premièrement reconnaître que la force exercée par la charge A sur la charge C n'a aucun effet sur la force exercée sur la charge B. Nous pouvons aussi ignorer la force exercée par la charge C sur la charge A.

La prochaine étape serait de faire un diagramme pour démontrer la direction des forces sur la charge B. La force entre A et B est une force de répulsion (voir la figure 1). La force entre A et B est une force d'attraction (voir la figure 2). Il faut ensuite calculer les composantes de  $\vec{F}_{AB}$  (voir la figure 3).

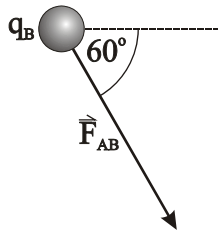


figure 1

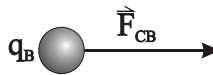


figure 2

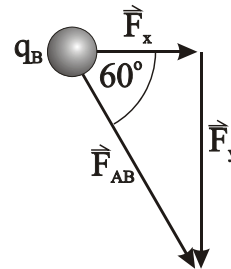


figure 3

On peut maintenant calculer les forces.

$$\vec{F}_{AB} = \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2)(4,0 \times 10^{-9} \text{ C})(10 \times 10^{-9} \text{ C})}{(6,0 \times 10^{-3} \text{ m})^2}$$

$$\vec{F}_{AB} = 1,00 \times 10^{-2} \text{ N } 60^\circ \text{ sous l'horizontale}$$

Les deux composantes pour  $\vec{F}_{AB}$  sont :

$$\vec{F}_{AB_x} = (\cos 60^\circ)(1,00 \times 10^{-2} \text{ N}) = +5,0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$\vec{F}_{AB_y} = (\sin 60^\circ)(1,00 \times 10^{-2} \text{ N}) = -8,7 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$\vec{F}_{CB} = \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2)(6,0 \times 10^{-9} \text{ C})(10 \times 10^{-9} \text{ C})}{(8,0 \times 10^{-3} \text{ m})^2}$$

$$\vec{F}_{CB} = +8,4 \times 10^{-3} \text{ N} \quad (\text{Le vecteur } \vec{F}_{CB} \text{ a seulement une composante horizontale.})$$

On peut maintenant calculer la somme vectorielle de ces trois composantes et cela nous donne une force nette de  $1,6 \times 10^{-2} \text{ N}$   $33^\circ$  sous l'horizontale .

## ANNEXE 12 : L'énergie potentielle électrique

Si on place une charge positive entre deux plaques parallèles de charge opposée, elle est attirée vers la plaque négative. Déplacer la charge vers la plaque positive est comme soulever un objet; il faut effectuer un travail sur cette charge (appliquer une force sur une certaine distance). On calcule ce travail à l'aide de l'équation  $W = \vec{F}\Delta\vec{d}$ . Puisque la force exercée sur une charge électrique est donnée par  $\vec{F} = q\vec{\epsilon}$ , on obtient  $W = q\vec{\epsilon}\Delta\vec{d}$  où  $\vec{\epsilon}$  représente le champ électrique (certains textes utilisent le symbole  $\vec{E}$  pour représenter le champ électrique). Le travail effectué sur un objet est toujours égal à la variation d'énergie de l'objet ( $W = \Delta E$ ). Dans ce cas, le travail effectué sur la charge est égal à **l'énergie potentielle électrique** emmagasinée par la charge. On peut comparer ceci à l'énergie potentielle gravitationnelle emmagasinée par un objet lorsqu'on le soulève. Si on déplace une charge d'un point où l'énergie initiale est égale à zéro, l'énergie potentielle électrique entre les plaques est égale à  $E_e = q\vec{\epsilon}\Delta\vec{d}$ . Si une force externe déplace la charge contre la force électrique, le travail effectué aura une valeur positive et l'énergie potentielle va augmenter. Si le champ électrique déplace la charge, le travail aura une valeur négative et l'énergie potentielle électrique va diminuer.

Le concept de **potentiel électrique** facilite les calculs de travail et d'énergie dans un champ électrique. On ne considère pas seulement l'énergie potentielle électrique d'une charge quelconque (charge  $a$ ), mais aussi celle d'une charge unitaire positive qui se retrouve dans le champ de la charge  $a$ . Le potentiel électrique ( $V$ ) se définit comme l'énergie potentielle électrique par unité de charge positive et peut être calculé avec l'équation  $V = \frac{E_e}{q}$ . Il représente le montant

de travail nécessaire pour déplacer la charge unitaire positive d'un point situé à l'infini (où le champ est égal à zéro) jusqu'à un point quelconque dans le champ de la charge  $a$ . Habituellement, on veut calculer le travail nécessaire pour déplacer une charge d'un point à un autre dans un champ plutôt que de l'infini jusqu'à un point précis. On utilise donc la **différence de potentiel électrique** ( $\Delta V$ ) dans nos calculs.

Le langage d'énergie peut facilement porter à confusion. Voici un résumé des termes importants:

- Énergie potentielle électrique ( $E_e$ ) – l'énergie entre deux charges
- Énergie potentielle ( $V$ ) – l'énergie potentielle électrique par unité de charge
- Différence de potentiel électrique ( $\Delta V$ ) – la différence du potentiel électrique entre deux points (par exemple, dans un circuit électrique)

Puisque le potentiel électrique est l'énergie potentielle électrique par unité de charge, on le mesure en joules/coulomb ou volt. Une valeur de 1 joule par coulomb est appelée le **volt**.

Pour dériver l'expression du champ entre des plaques parallèles, on combine les

équations  $E_e = q\vec{\epsilon}\Delta\vec{d}$  et  $V = \frac{E_e}{q}$ .

$$E_e = q\vec{\epsilon}\Delta\vec{d}$$

$$\frac{E_e}{q} = \vec{\epsilon}\Delta\vec{d}$$

$$V = \vec{\epsilon}\Delta\vec{d}$$

$$\vec{\epsilon} = \frac{V}{\Delta\vec{d}}$$

### ANNEXE 13: Exercice – L'énergie potentielle électrique

1. L'intensité du champ électrique entre deux plaques parallèles est de  $13\,000\text{ N/C}$ . Calcule l'énergie potentielle électrique si on déplace une charge de  $5,6 \times 10^{-6}\text{ C}$  d'une distance de  $0,50\text{ m}$ .
2. Deux plaques parallèles sont séparées d'une distance de  $15\text{ cm}$ . La différence de potentiel entre les plaques est de  $75\text{ V}$ . Calcule l'intensité du champ électrique entre les plaques.
3. La distance entre deux plaques parallèles est de  $0,05\text{ m}$ . Un électron ( $m = 9,1 \times 10^{-31}\text{ kg}$ ) est au repos à la surface de la plaque négative. Calcule la vitesse à laquelle il atteindra la plaque positive si on applique un potentiel de  $55\text{ V}$  entre les plaques.
4. Deux plaques parallèles sont séparées d'une distance de  $0,006\text{ m}$ . Le potentiel entre les plaques est de  $655\text{ V}$ . Si une charge de  $5,0 \times 10^{-9}\text{ C}$  se déplace d'une plaque à l'autre, quelle est la valeur de l'énergie transférée à la charge?
5. Deux plaques parallèles sont séparées d'une distance de  $0,20\text{ m}$ . Une charge placée entre les plaques subit une force de  $0,46\text{ N}$ . Le champ électrique entre les plaques a une valeur de  $1,9 \times 10^3\text{ N/C}$ . Calcule l'intensité de la charge.
6. Le champ électrique entre deux plaques parallèles a une valeur de  $2,8 \times 10^5\text{ N/C}$ . Si la distance entre les plaques est de  $0,50\text{ cm}$ ,
  - a. quelle est la différence de potentiel entre les deux plaques?
  - b. quel est le travail nécessaire pour déplacer une charge de  $4,6 \times 10^{-4}\text{ C}$  d'une plaque à l'autre?
7. Une particule de  $6,70 \times 10^{-27}\text{ kg}$  avec une charge négative de  $3,2 \times 10^{-19}\text{ C}$  est envoyée entre deux plaques parallèles. Le champ entre les plaques a une valeur de  $8 \times 10^3\text{ N/C}$  et la particule fait un angle de  $90^\circ$  avec le champ. La distance entre les plaques est de  $0,020\text{ m}$ . La vitesse initiale de la particule est de  $6 \times 10^6\text{ m/s}$ . Si la charge est envoyée juste par-dessus la plaque négative, quelle distance va-t-elle parcourir avant d'entrer en collision avec la plaque positive?
8. Deux plaques parallèles de charges opposées ont toutes deux une longueur de  $0,007\text{ m}$ . Le champ électrique entre les plaques a une valeur de  $111\text{ N/C}$ . Un électron est tiré entre les deux plaques avec une vitesse de  $1,1 \times 10^6\text{ m/s}$ . Quelle distance vers le haut aura-t-il parcouru lorsqu'il atteint le bout des plaques?

## **ANNEXE 14: L'énergie potentielle électrique – corrigé**

À développer