

# Mécanique des solides et des planètes

## Présentation des miniprojets

### **Projet n°1 : Du pendule simple au pendule inversible de**

#### **Kater**

Dans ce projet, tel le professeur Tournesol, vous ferez osciller des pendules. On examinera ensuite des objets oscillant autour d'un axe fixe, et on cherchera le rôle de la position du centre d'inertie et du moment d'inertie. D'ailleurs c'est quoi ces choses et comment ça se calcule? Pourrez-vous prédire correctement, à partir d'exemples de calcul que vous trouverez dans le cours ou dans les travaux dirigés, la période d'oscillation d'objets de votre choix? Peut-être souhaitez-vous rechercher des pendules physiques dans des objets de la vie courante, comme l'horloge des grands-parents ou le métronome mécanique. On s'est intéressé depuis le dix-septième siècle à la mesure de la gravité. Qui a effectué la première observation (avec quel pendule? au cours de quel voyage?) que la gravité  $g$  dépend de la position sur la Terre? Pour des mesures précises, le navigateur Kater (qui c'est celui-là?) inventa le pendule inversible qui porte son nom, instrument que vous manipulerez et dont vous découvrirez les astuces en exploitant un théorème du cours. Quelle précision obtenez vous sur  $g$ ?



Pistes de travail et suggestions :

1. Faire osciller un **pendule simple**. Faire le bilan des paramètres qu'on peut faire varier et proposer une expression de la période avec des arguments dimensionnels. Que peut-on mesurer? Faire varier les différents paramètres et vérifier expérimentalement l'expression de la période.
2. Faire le bilan des incertitudes sur les différentes grandeurs. Comment la période dépend-elle des erreurs sur les différents paramètres? Inversement, à partir des incertitudes que vous estimez sur les grandeurs que vous mesurez, avec quelle précision pouvez-vous déterminer la valeur de l'accélération de la pesanteur en un lieu?
3. Vous pouvez aussi essayer des pendules simples pas si simples que cela. N'est-ce pas par exemple l'occasion de faire osciller un très long pendule dans une tour du campus ? Que se passe-t-il quand on augmente l'amplitude des oscillations ?
4. Fabriquer divers **pendules physiques** et mesurer la période. Quels sont maintenant les différents paramètres? Essayer de faire osciller des objets simples dont vous savez calculer le moment d'inertie et comparer vos résultats avec vos calculs. Pour des objets plus complexes, imaginer une méthode expérimentale de mesure du moment d'inertie. Par exemple en ajoutant des masses ponctuelles en certains endroits ?
5. Jouer avec le **pendule de Kater** et affiner la mesure de la période. Comment cette période varie-t-elle quand on déplace le curseur ?
6. Quelle est l'astuce du pendule inversible ? Sur quelle expression du cours cette astuce repose-t-elle ? Faire la dérivation de la formule de Kater.
7. Pouvez-vous espérer observer la variation de l'accélération de la pesanteur avec la hauteur dans une tour du campus ou vous faudrait-il aller en haut de la tour Montparnasse? Si vous allez en mission au pôle Nord, connaissant la précision à laquelle vous êtes parvenu pour la mesure de  $g$ , allez-vous observer une différence significative avec votre mesure à Jussieu?
8. Quel a été l'impact de l'invention de Kater? A quoi ça sert de mesurer  $g$  aujourd'hui?

# Mécanique des solides et des planètes

## Présentation des miniprojets

### Projet n°2 : Initiation à la physique du gyroscope



Dans ce projet, vous apprendrez à manipuler le gyroscope, surprenant jouet ou instrument à faire tourner la tête! Vous explorerez successivement le mouvement du gyroscope dans vos mains, autour d'un axe fixe ou mobile, et autour d'un point fixe. Comment ça marche? Comment analyser ce mouvement, comment mesurer la vitesse de rotation? Vous apprendrez à faire la démonstration du mouvement gyroscopique et à la quantifier. Quelles sont les notions auxquelles il faut faire appel pour comprendre le mouvement du gyroscope? Pouvez-vous utiliser le gyroscope pour faire la description des trois mouvements de rotation fondamentaux d'Euler et la démonstration de principes de la mécanique Newtonienne? A quoi servent les gyroscopes dans les sous-marins et les engins spatiaux?



Pistes de travail et suggestions :

1. Comparer quelques **gyroscopes**. Quels sont les degrés de liberté? Quelles sont les forces qui s'appliquent au gyroscope dans les différentes configurations que vous envisagez?
2. Lancer le gyroscope, conserver son axe fixe, et essayer de mesurer des vitesses de rotation. Quelles vitesses de rotation pouvez-vous imprimer à l'instrument? Cette vitesse varie-t-elle avec le temps? Pourquoi? Comment pouvez-vous caractériser cet effet?
3. Estimer le moment d'inertie de quelques gyroscopes autour de leur axe de rotation. Quel autre moment d'inertie faut-il considérer?
4. Lancer un gyroscope et le prendre entre deux doigts. Essayer d'imprimer un mouvement de rotation. Que se passe-t-il? Essayer d'abord avec un gyroscope léger puis ensuite avec le gyroscope de précision. Attention à ce que le gyroscope ne vous échappe pas des mains, prendre des précautions! Est-ce que la position relative entre l'axe de rotation et l'axe défini par les deux points de contacts a une importance? Répertorier les différentes **réactions** observées pour différents mouvements de rotation appliqués en changeant les points de préhension. Quelles explications pouvez-vous proposer?
5. Lancer le gyroscope et essayer de lui imprimer un mouvement de translation. Que se passe-t-il?
6. Poser le gyroscope sur un point fixe. Que se passe-t-il? Et si vous lancez le gyroscope dans le sens inverse? Décrire qualitativement les mouvements observés. Etablir une relation entre la vitesse de précession et la vitesse de rotation propre. Quel est l'effet de l'angle par rapport à la verticale? Que se passe-t-il si le point de contact n'est pas sur l'axe de rotation?
7. Suspendre le gyroscope à un point fixe. Que se passe-t-il?
8. Etudier quelques montages exotiques: le gyroscope posé sur une ficelle tendue entre deux points sur un support tournant, ou le gyroscope lié à deux autres axes mobiles avec un contrepoids (figures ci-dessus). Faire le bilan des différents degrés de liberté, et imaginer quelques mouvements démonstratifs, proposer des explications.
9. Sur la base de ces expériences, quelles analogies pouvez-vous proposer pour les planètes? Quelles applications pratiques? Qu'est-ce qu'un *powerball*? Comment un gyroscope est-il utilisé en navigation? Pouvez-vous faire un lien entre un gyroscope et une roue de bicyclette?

# Mécanique des solides et des planètes

## Présentation des miniprojets

### Projet n°3 : Etude du plan incliné



Dans ce projet, tel Galilée, vous explorerez les fondements de la mécanique grâce au plan incliné, le plus riche des objets simples, pas si simple que ça?



Vous reviendrez d'abord sur le mouvement uniformément accéléré d'un point, et sur l'expression de la vitesse acquise en fonction de la hauteur dévalée. Vous aborderez ensuite le mouvement de roulement sur le plan incliné en comparant cerceau, cylindre et sphère. Comment décrire et comparer ces différents mouvements? Qui du cylindre, du cerceau ou de la sphère arrive en bas le plus vite? Et du cylindre de bois par rapport au cylindre de métal? Que se passe-t-il au point de contact? Quand y a-t-il roulement et quand y a-t-il glissement? Comment interpréter les résultats des expériences de roulement sans glissement? Pouvez-vous prédire comment le mouvement d'un objet, par exemple un cylindre, est modifié si on ajoute des masses en des points précis? Le rayon des roues joue-t-il un rôle? Les mesures confirment-elles vos prédictions?



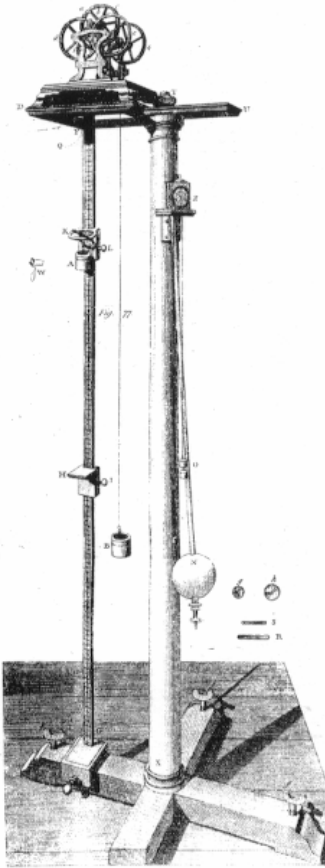
Pistes de travail et suggestions :

1. Documentez-vous sur le plan incliné et les **expériences de Galilée**. Comment Galilée faisait-il ses mesures? Lesquelles pouvez-vous reproduire?
2. Revenez sur les principes de base. Quels sont les différents mouvements que vous pouvez considérer sur le plan incliné? Quel est le rôle de la friction? Comparez un mouvement de glissement sans frottement et un mouvement de roulement sans glissement. Lequel vous semble le plus facile à réaliser expérimentalement?
3. Faire le bilan des différents paramètres dont vous disposez dans une expérience de plan incliné. Quelles sont les incertitudes? Réfléchissez à un programme expérimental: que souhaitez-vous mesurer (**vitesse? temps? flèche de chute?**), quels paramètres souhaitez-vous changer, quelles sont les incertitudes, que souhaitez-vous montrer? Quel dispositif choisissez-vous?
4. Pour un objet donné, réalisez quelques expériences détaillées en changeant les différents paramètres. Déterminez la meilleure configuration. Que se passe-t-il si l'angle du plan incliné est trop grand ou trop petit?
5. Pour une forme donnée, comparez l'effet de la répartition de la masse : par exemple cylindre homogène versus cerceau (cylindre creux). Quel est l'effet de la nature du cylindre? Son rayon? Pour ces comparaisons, choisissez l'observable qui vous semble la plus pertinente.
6. Quel est l'effet de la nature du point de contact: comparer par exemple cylindre et sphère? Le rayon joue-t-il un rôle?
7. Pouvez-vous étudier des objets plus compliqués? Pouvez-vous imaginer une méthode pour analyser l'effet du moment d'inertie du solide? Pouvez-vous imaginer une expérience déroutante dont les résultats seraient contraires au gros bon sens?

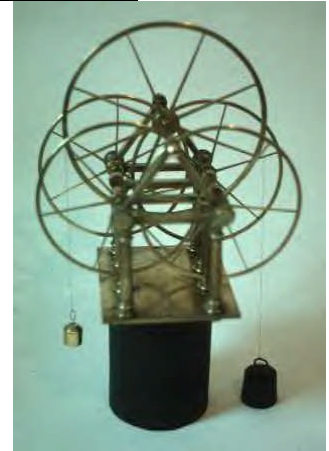
# Mécanique des solides et des planètes

## Présentation des miniprojets

### Projet n°4 : Variations autour de la chute libre



Dans ce projet, vous reviendrez sur la chute libre. Vous reproduirez les fameuses expériences de Galilée sur la chute de deux corps de nature différente et vous les discuterez. Vous pourrez entreprendre des mesures précises sur la chute libre, avec des instruments variés. Vous réfléchirez à une machine qui permet de ralentir le mouvement pour permettre de mieux le mesurer, grâce à des roues (machine d'Atwood). Vous pourrez réaliser votre propre prototype de machine et



aussi étudier la chute libre d'objets divers. Que se passe-t-il pendant la chute libre d'un solide? Quelle différence avec un point matériel? Pouvez-vous prédire la position à l'arrivée au sol? Il sera déconseillé de faire des expériences avec des chats mais vous pourrez utiliser des objets astucieusement choisis. L'utilisation d'objets roulants comme des cerceaux, cylindres et sphères pourra donner lieu à des travaux quantitatifs si vous pouvez définir proprement l'état initial. Celui-ci pourra par exemple être défini à partir d'une rampe de lancement calibrée comme le plan incliné. Vous concevrez alors des méthodes de mesure pour définir le point de chute et l'état de l'objet à l'arrivée. Pouvez-vous vérifier quantitativement les lois de la mécanique du solide à partir de vos mesures?

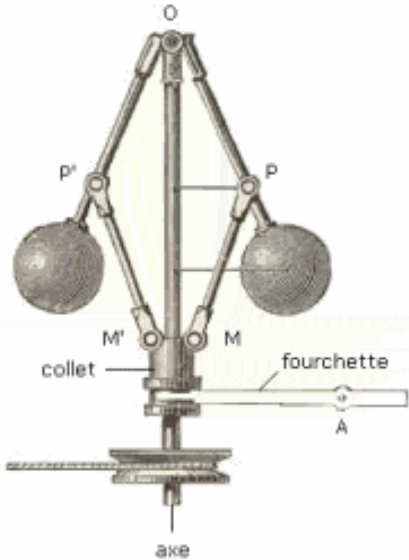
Pistes de travail et suggestions :

1. Analyser la situation de la chute libre d'un point matériel. Comment décrire le mouvement? Faire le bilan des différents paramètres et proposer des expressions théoriques sur de simples arguments dimensionnels.
2. Quelles sont les observables possibles avec les dispositifs dont vous disposez et que vous pouvez imaginer? Quelles précisions pouvez-vous obtenir? Ce bilan étant fait, **établir un programme expérimental** et des objectifs.
3. Réaliser des expériences détaillées en étudiant l'effet des différents paramètres. Obtenez-vous une bonne mesure de  $g$  avec vos expériences de chute libre?
4. Quel est le rôle de la friction dans l'air? Etablir les équations du mouvement en **présence de friction** et imaginer des situations où cet effet peut être mis en évidence. Pouvez-vous pour cela effectuer des expériences de chute libre dans une tour de Jussieu? Qui tombe le plus vite, le cube ou la sphère de même masse? Quel est l'effet des cannelures sur une balle de golf? Quel serait l'intérêt de faire des expériences de rebond?
5. Si vous ne pouviez disposer de mesure précise de temps (ou si votre chronomètre de précision tombe en panne ou est momentanément utilisé par d'autres), que pouvez-vous imaginer pour **ralentir le mouvement**? Quelles sont les différentes options possibles et pouvez-vous construire une d'entre elles? Comment les thèmes abordés dans ce projet se rapprochent-ils d'autres projets traités par d'autres équipes?
6. Comparer la chute libre d'un point matériel et la chute libre d'un solide. Que se passe-t-il dans la chute libre d'un objet déformable? Pouvez-vous imaginer des expériences surprenantes?
7. Comment marche un ascenseur? Pouvez-vous proposer des expériences de chute libre dans un ascenseur?

# Mécanique des solides et des planètes

## Présentation des miniprojets

### Projet n°5 : De la rotation d'objets déformables



Dans ce projet, vous étudierez ce qui se passe pendant la rotation d'objets déformables, situation assez fréquente en mécanique ou dans l'univers.



Vous commencerez par étudier la rotation de sphères souples, et vous ferez la relation avec la forme de la Terre ainsi que d'autres planètes. Vous aborderez aussi cette discussion avec des machines telles que le régulateur de Watt. Vous construirez un dispositif sur ce principe en ajoutant des instruments de mesure des forces comme des dynamomètres. Vous ferez le bilan des forces pendant la rotation et vous exploiterez la conservation du moment cinétique. Il faudra alors apprendre à calculer le moment cinétique dans quelques situations que vous explorerez expérimentalement. Les résultats sont-ils conformes à vos attentes? Quelles applications pouvez-vous imaginer pour la manipulation d'engins spatiaux? Pouvez-vous illustrer de telles situations?

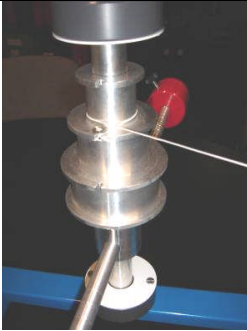
Pistes de travail et suggestions :

1. Revoir les principes du mouvement de rotation. Quelles sont les équations qui le régissent? Quelles sont les **quantités conservées**? Quelles sont les forces à prendre en compte? De quoi dépendent-elles? Pouvez-vous les illustrer avec des expériences simples? Revoir la notion de **moment cinétique** et de moment d'inertie. Comment les phénomènes considérés dépendent-ils de la vitesse de rotation?
2. Faire le bilan des paramètres à prendre en compte pour une expérience de rotation. Pouvez-vous les modifier? les mesurer? Avec quelle précision?
3. Envisager quelques situations simples, comme le patineur qui tourne sur lui-même. Quels effets pourriez-vous observer dans cette situation? Pouvez-vous les montrer dans une vidéo? Pouvez-vous proposer quelques nombres correspondant à ces situations?
4. Quelles expériences démonstratives pouvez-vous envisager avec un objet déformable (mécano ou bassine d'eau, pendule) sur un support en rotation? Décrire qualitativement les effets observés et les interpréter avec les théorèmes de la mécanique. Envisager ensuite quelques situations plus quantitatives.
5. Dans quelle mesure un objet déformable peut-il **stabiliser une rotation**? Pouvez-vous effectuer une démonstration de cet effet?
6. Etudier la déformation en rotation d'une sphère souple ou un ballon rempli de liquide. Faire le lien entre cette expérience et la forme des planètes. Faire une étude bibliographique sur la forme de quelques planètes, ainsi qu'une étude historique sur la **forme de la Terre**. Qui a fourni la première explication? Quelles furent les premières mesures de la forme de la Terre? Est-ce un problème complètement compris aujourd'hui? Quelles sont les conséquences de la forme de la Terre?

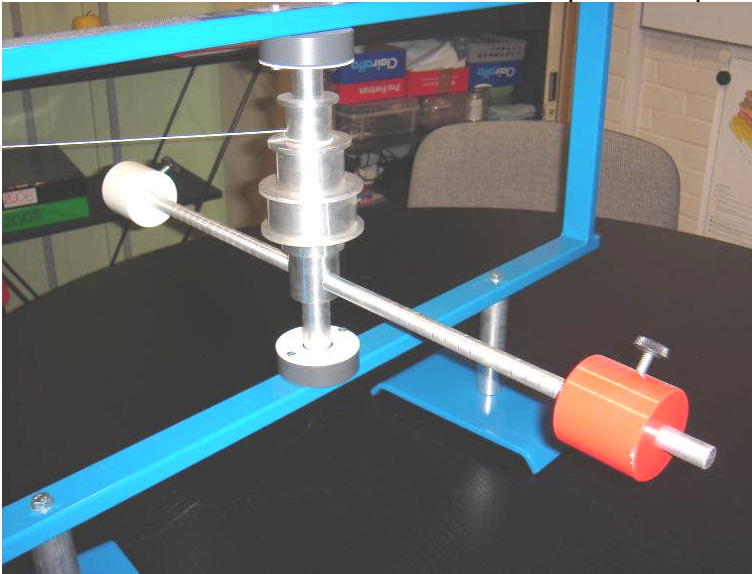
# Mécanique des solides et des planètes

## Présentation des miniprojets

### Projet n°6 : Etude du mouvement de rotation uniformément accéléré



Dans ce projet, on étudiera le comportement physique d'une machine d'Atwood particulière. Qu'est-ce qu'une machine d'Atwood? Comment transformer un mouvement rectiligne uniformément accéléré en mouvement de rotation uniformément accéléré? On en profitera pour revoir les équations du mouvement rectiligne uniformément accéléré et on déduira les équations du mouvement de rotation uniformément accéléré. Quelles prédictions pouvez-vous tester avec le dispositif disponible?



Pistes de travail et suggestions :

1. Faire le bilan des différentes **pièces mobiles** de la machine. Quelles sont les quantités qui vont définir le mouvement? Quelles sont les quantités que vous pouvez mesurer et quels sont les paramètres que vous pouvez faire varier?
2. Essayer de faire des expériences qualitatives avec la machine. Quel est le rôle des forces de friction? Trouver (débroussailler) les configurations dans lesquelles l'effet de la friction est acceptable et les résultats des expériences seront exploitables.
3. Etablir le **moment d'inertie** des pièces tournant autour de l'axe vertical. Comparer avec les résultats d'un calcul. Quelles variations de ces paramètres pouvez-vous obtenir avec le dispositif disponible? Pouvez-vous imaginer une méthode de mesure des moments d'inertie?
4. Quels mouvements pouvez-vous mettre en œuvre avec cette machine? Que pouvez-vous mesurer au cours du mouvement? Des durées de rotation? Des durées de parcours vertical? Des vitesses de rotation? Avec quelle incertitude? Quelles accélérations pouvez-vous obtenir avec ce dispositif? Etablir un **programme expérimental** en exploitant les différents rayons possibles en variant les positions des masses mobiles. Quels sont les objectifs de ce programme? Etudier les équations du mouvement? Vérifier les propriétés des moments d'inertie?
5. Réaliser votre programme expérimental de façon soignée. Quelles conclusions obtenez-vous? Quelles sont les limitations de cette machine?
6. Pouvez-vous modifier le dispositif pour obtenir des oscillations?

# Mécanique des solides et des planètes

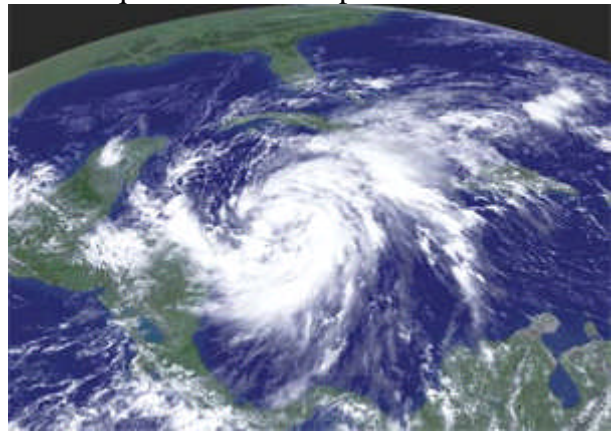
## Présentation des miniprojets

### **Projet n°7 : Mouvement dans un système en rotation: manège et plateau tournant**



Vous pourrez tester votre compréhension en mettant au point des expériences avec des billes que vous ferez rouler sur une surface, par exemple un saladier, en rotation sur votre plateau tournant. Pouvez-vous faire des prédictions qualitatives sur le mouvement et les illustrer expérimentalement? Pouvez-vous retrouver quantitativement l'effet de la vitesse de rotation? Pouvez-vous faire le lien avec des situations en météorologie ou en océanographie? En planétologie?

En sciences de la Terre, il est particulièrement important de comprendre ce qui se passe dans un repère en rotation. A l'aide d'un plateau tournant que vous pourrez par exemple confectionner à l'aide d'un vieux tourne-disque ou un petit tour de potier, vous mettrez en évidence qualitativement les caractéristiques du mouvement, et vous démontrerez l'effet des forces d'inertie d'entraînement, de Coriolis et d'Euler. Ça sera le moment de vérifier les expressions théoriques de ces concepts!



Pistes de travail et suggestions :

1. Effectuer le bilan des forces dans un repère tournant. Qu'est-ce que la **force de Coriolis**? Quelles sont les autres **forces d'inertie** ou pseudo-forces? Comment ces forces dépendent-elles de la vitesse rotation? Pouvez-vous proposer des démonstrations ou des situations en sciences de la Terre illustrant ces diverses forces? Quelles expériences célèbres ont pu mettre en évidence la force de Coriolis?
2. Réaliser quelques expériences exploratoires sur un plateau tournant, par exemple en faisant rouler des billes ou des cylindres. Quel est le rôle des forces de friction? Si un cylindre est placé verticalement sur un plateau tournant, quelle est la condition de sa stabilité? Pouvez-vous le vérifier avec des cylindres de différentes tailles? Comment pouvez-vous mettre en évidence l'effet de la vitesse de rotation? Quels effets observez-vous au démarrage du plateau tournant? Quels sont les effets des changements de la vitesse de rotation du plateau?
3. Etablir un programme expérimental quantitatif et le réaliser. Quels sont les objectifs? Quels sont les résultats obtenus et quelles sont les limitations de votre dispositif?
4. Allez visiter le **plateau tournant** du Palais de la Découverte. Pouvez-vous décrire certains phénomènes que vous y avez observés?
5. Analyser le problème de la bille roulant sur une surface en rotation (saladier). Pouvez-vous faire le lien entre sa position d'équilibre et la vitesse de rotation? Le rayon de la bille joue-t-il un rôle? Que se passe-t-il quand on change la vitesse initiale de la bille?
6. Pensez-vous que la déviation vers l'est due à la rotation de la Terre est observable dans une expérience de chute libre dans une tour de Jussieu?