

Version professeur

Physique-chimie – Seconde Bac Pro**Livret d'activités****Chapitre 5****Mouvement et trajectoire**

Édition : 28 septembre 2026 – Naïm Azzouz

Méthode — Mode d'emploi

Lire la situation et les documents, chercher puis justifier la réponse au problème. Choisir les activités selon la progression et le matériel disponible ; les consignes de manipulation restent à respecter. Les réponses détaillées figurent directement sous chaque question et dans les tableaux du sujet élève. Les conseils de conduite suivent chaque activité.

Sommaire

Activité	Sujet corrigé	Conseils
Activité 1 – Le passager et le quai	2	3
Activité 2 – Mesurer la vitesse d'un mobile	4	5
Activité 3 – Qui arrive en premier au ballon ?	6	7
Activité 4 – Galilée : ralentir pour mesurer	8	9
Activité 5 – À quelle fréquence tourne la roue ?	11	12
Activité 6 – Éolienne : deux points d'une pale	13	16
Activité 7 – Roue de voiture	17	19
Activité 8 – Voyage vers Proxima b (approfondissement)	20	22
Activité 9 – Des muons venus du ciel (approfondissement)	23	24

Les numéros de pages de la version prof diffèrent de ceux de la version élève. Les titres, données, questions, figures et capacités sont conservés. Les réponses sont repérées en bleu et par le mot « Réponse ».

Activité 1 – Le passager et le quai

Découverte / reprise de C1 – 25 minutes indicatives – Adaptation de l'activité 11 du site

Nom : Classe : Date :

Capacités : C1 – Délimiter le système, choisir un référentiel et comparer repos et mouvement ; C2b – Calculer une distance avec une relation fournie.

Prérequis : lire un schéma et multiplier. **Matériel** : fiche et stylo ; simulation projetée ou consultée en binôme si disponible.

Énoncé — Deux témoins

Lina reste assise dans un train qui traverse une gare en ligne droite. Son voisin dit : « Lina ne bouge pas. » Une personne sur le quai répond : « Si, elle avance ! »

Problème : Lina peut-elle être à la fois au repos et en mouvement ?

Avant d'observer : compléter avec une prévision et une justification.

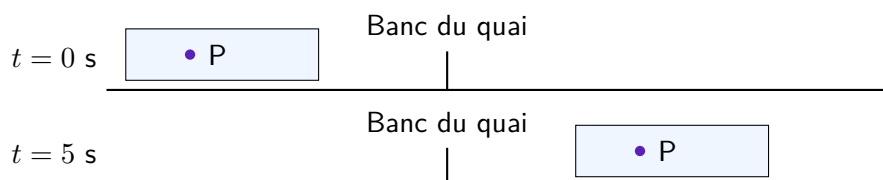
Par rapport à...	Repos ou mouvement ?	Pourquoi ?
Le wagon	Au repos	Sa position dans le wagon reste la même.
Le quai	En mouvement	Sa position par rapport au quai change.

Méthode — Observer

Régler la vitesse à 72 km/h, lancer, comparer les deux vues à 0 s puis à 5 s. Afficher les positions successives.

Ouvrir la simulation

Sans écran : utiliser les deux instantanés ci-dessous, qui représentent le même modèle à vitesse constante. P représente Lina.



Le train avance par rapport au banc fixe ; P reste à la même place dans le wagon. Dessin non à l'échelle.

1. Quel est le système étudié ? Quels sont les deux référentiels comparés ?

Le système est Lina, repérée par le point P. Référentiels : celui du train et celui du quai, lié au sol.

2. La position de P change-t-elle par rapport au wagon ? En déduire l'état de Lina dans ce référentiel.

La position de P ne change pas par rapport au wagon : Lina est au repos dans le référentiel du train.

3. La position de P change-t-elle par rapport au quai ? Nommer sa trajectoire dans le modèle.

Sa position change par rapport au quai : elle est en mouvement dans le référentiel terrestre. Dans le modèle, le train avance en ligne droite : trajectoire rectiligne.

Activité 1 – Le passager et le quai

Calculer puis formuler la relativité du mouvement

Rappel de cours — Pour la question 4

À vitesse constante, $d = v \times \Delta t$. Avec v en m/s et Δt en secondes, d est en mètres. La simulation donne 72 km/h=20,0 m/s ; la conversion n'est pas à redémontrer ici.

4. Quelle distance le train parcourt-il par rapport au quai en 5,0 s à 20,0 m/s ? Écrire le calcul et, si possible, vérifier dans la simulation.

La conversion étant fournie, on utilise directement 20,0 m/s :

$$d = v\Delta t = 20,0 \times 5,0 = 100 \text{ m.}$$

La distance est mesurée dans le référentiel du quai. Par rapport au wagon, Lina ne se déplace pas.

5. Le voisin et la personne sur le quai se contredisent-ils vraiment ? Expliquer en nommant les deux référentiels. Revenir sur la prévision de la première page.

Les deux témoins n'utilisent pas le même référentiel. Lina est au repos par rapport au wagon et en mouvement par rapport au quai. Les deux descriptions sont compatibles.

6. Rédiger une phrase complète commençant par : « Pour savoir si un objet est au repos ou en mouvement... »

Exemple : « Pour savoir si un objet est au repos ou en mouvement, il faut préciser le référentiel puis regarder si sa position change dans ce référentiel. » Accepter toute formulation équivalente qui distingue objet et référence.

À retenir

Un objet peut être au repos dans un référentiel et en mouvement dans un autre. Une description scientifique précise **le système étudié et le référentiel choisi**.

Je vérifie ma compréhension : je sais nommer l'objet étudié, l'objet de référence et justifier mes réponses par la position.

Méthode — Mise en commun

Durée indicative : 5 min de prévision, 8 min d'observation, 7 min de réponses, 5 min de bilan. Le schéma papier rend l'activité autonome en cas d'absence de connexion. La simulation sert à confronter les points de vue ; elle n'est pas une mesure expérimentale réelle.

Erreur fréquente

« Il est assis donc il est immobile » oublie le référentiel. Demander systématiquement « par rapport à quoi ? ». Ne pas confondre système (Lina) et point qui le représente (P).

Activité 2 – Mesurer la vitesse d'un mobile

Manipulation réelle – 30 minutes indicatives – C2b, avec réinvestissement de C1

Nom : Classe : Date :

Repère professeur. Les nombres du corrigé sont un exemple fictif de calcul, à remplacer par les mesures réelles du binôme.

Capacités : C2b – Déterminer expérimentalement une vitesse moyenne lors d'un déplacement rectiligne ; C1 – Définir le point suivi et le référentiel.

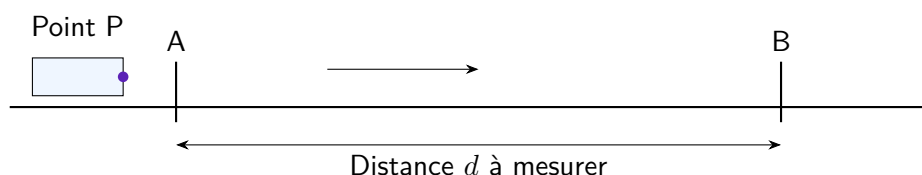
Prérequis : $v_{\text{moy}} = d/\Delta t$, lecture d'une règle et d'un chronomètre.

Énoncé — Une mesure plutôt qu'une impression

Un petit mobile se déplace lentement en ligne droite. **Comment mesurer sa vitesse moyenne entre deux repères et apprécier la régularité des résultats ?**

Matériel : petit mobile pédagogique lent ou voiture-jouet guidée, piste droite dégagée, mètre, ruban adhésif et chronomètre. Binôme : un élève observe les passages, l'autre chronomètre ; échanger les rôles.

Précautions : travailler au sol dans un espace réservé ou sur une piste avec butée. Ne rien lancer ; éviter le bord d'une table. Le professeur vérifie l'installation et adapte la longueur au mobile disponible.



P est un point repéré sur le mobile. Il est suivi lors de son passage en A puis en B ; le lancement se fait avant A.

1. Indiquer le système, le point suivi et le référentiel choisi.

Système : le petit mobile ; point suivi : le point repéré P ; référentiel terrestre lié à la piste ou au sol.

2. Placer A et B, mesurer leur distance et écrire le résultat avec son unité. Convertir en mètres si nécessaire.

La valeur dépend de la piste. Exemple fictif utilisé dans ce corrigé : $d = 200 \text{ cm} = 200/100 = 2,00 \text{ m}$.

Conserver la mesure réelle du binôme.

3. Proposer le début et la fin du chronométrage. Comment garder le même déplacement de référence pour tous les essais ? Faire valider avant manipulation.

Démarrer au passage de P en A et arrêter à son passage en B. Conserver la même piste, les mêmes repères et le même point suivi. Le lancement se fait avant A ; il ne définit pas l'origine du chronométrage.

Méthode — Réaliser

Placer le mobile avant A. Démarrer au passage de P en A, arrêter au passage de P en B. Recommencer trois fois sans modifier la piste ni les réglages du mobile. Noter les résultats réellement observés sur la page suivante. Ne pas remplacer une mesure inhabituelle sans l'expliquer.

Activité 2 – Mesurer la vitesse d'un mobile

Mesures réelles du binôme – aucun résultat imposé

4. Compléter avec les mesures, puis calculer chaque vitesse moyenne en m/s.

Essai	Distance d (m)	Durée Δt (s)	v_{moy} (m/s)
1	2,00	3,8	0,53
2	2,00	4,0	0,50
3	2,00	4,2	0,48

Écrire ici les trois calculs :

Pour cet exemple fictif : $v_1 = 2,00/3,8 \simeq 0,53 \text{ m/s}$; $v_2 = 2,00/4,0 = 0,50 \text{ m/s}$; $v_3 = 2,00/4,2 \simeq 0,48 \text{ m/s}$. Dans chaque quotient, on divise la distance en mètres par la durée en secondes. Vérifier avec les mesures du binôme.

5. Les trois résultats sont-ils identiques ? Proposer une cause possible des différences et une amélioration de la mesure.

Non : dans cet exemple, les valeurs vont de 0,48 à 0,53 m/s. Écarts possibles : temps de réaction, passage de P mal repéré, réglages ou déplacement du mobile différents. Améliorations : repères plus nets, point suivi unique, durée mesurée plus longue si la piste le permet, capteurs ou vidéo. Une différence réelle de vitesse entre les essais n'est pas forcément une erreur de chronomètre.

6. Pour les trois essais réunis, calculer la vitesse moyenne globale avec

$$v_{\text{globale}} = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3}.$$

On ne compte ni le retour du mobile ni le temps de préparation. Écrire un résultat avec une précision raisonnable, puis le comparer aux trois résultats précédents.

Pour l'exemple : $v_{\text{globale}} = (2 + 2 + 2)/(3,8 + 4,0 + 4,2) = 6/12 = 0,50 \text{ m/s}$. Cette moyenne globale est comprise entre les trois vitesses. Ne pas remplacer cette relation par la moyenne arithmétique des vitesses, qui n'est pas généralement équivalente lorsque les durées diffèrent.

7. Ces mesures suffisent-elles pour prouver que la vitesse était constante pendant chaque trajet ? Justifier.

Non. Les valeurs sont des moyennes sur des trajets complets ; elles ne renseignent pas sur les variations à l'intérieur de chaque trajet.

8. **Bilan.** Répondre au problème de départ en citant le protocole, une valeur mesurée et une limite de la méthode.

Exemple de bilan à adapter : « Dans le référentiel du sol, nous avons chronométré P de A à B, distants de 2,00 m. Pour les trois essais réunis, nous trouvons 0,50 m/s. Le déclenchement manuel et les différences entre essais limitent la précision ; nous ne démontrons pas un mouvement uniforme. »

À retenir

Une vitesse moyenne se détermine avec une distance et la durée correspondante. Des essais répétés renseignent sur la variabilité. Ils ne prouvent pas à eux seuls une vitesse constante à chaque instant.

Méthode — Validation expérimentale

Vérifier la distance, l'association des passages au point suivi, le protocole effectif, les unités et la discussion des écarts. Faire réaliser la manipulation : remplir le tableau avec les données de l'exemple ne valide pas la capacité expérimentale. Prévoir environ 8 min de préparation, 12 min de mesures, 10 min d'exploitation et de bilan.

Activité 3 – Qui arrive en premier au ballon ?

Transfert – 25 minutes indicatives – Adaptation de l'activité 16 du site

Nom : Classe : Date :

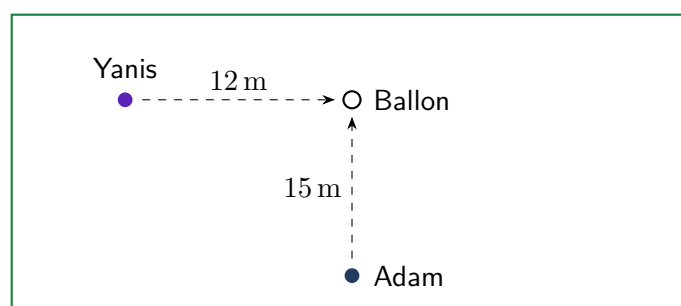
Capacité : C2b – Calculer des durées de trajet, comparer des temps d'arrivée et discuter un modèle.

Prérequis : relation entre vitesse, distance et durée. **Matériel :** fiche, stylo ; calculatrice possible. Travail sur papier, sans course à réaliser.

Énoncé — Une situation de football

Un ballon est immobile. Au début de l'étude, Yanis et Adam sont **déjà en mouvement** vers lui. On les observe depuis le sol. Chaque joueur court en ligne droite, à vitesse supposée constante. Le ballon reste immobile jusqu'à l'arrivée du premier joueur.

Problème : le joueur le plus proche est-il forcément le premier à atteindre le ballon ?



Vue de dessus du terrain, non à l'échelle. Les pointillés donnent les trajets vers la position initiale du ballon.

Joueur	Distance au ballon	Vitesse supposée constante
Yanis	12 m	4 m/s
Adam	15 m	6 m/s

Données fictives : il ne s'agit pas de mesures d'un match. Les durées sont comptées à partir du même instant.

1. Prévoir. Sans calcul, quel joueur penses-tu voir arriver en premier ? Donner un argument. Cette prévision sera vérifiée ensuite.

Deux prévisions peuvent être recevables si elles sont justifiées : Yanis est plus près, Adam court plus vite. La question demande une hypothèse, pas un verdict sans calcul.

Rappel de cours — Calculer une durée

À partir de $v = d/\Delta t$, on obtient $\Delta t = d/v$. Avec d en mètres et v en m/s, la durée est en secondes.

Activité 3 – Qui arrive en premier au ballon ?

Comparer les durées, puis préciser les limites

2. Calculer la durée nécessaire à Yanis pour atteindre la **position initiale** du ballon. Écrire le calcul et le résultat en secondes.

Pour Yanis : $\Delta t = d/v = 12/4 = 3 \text{ s}$ pour atteindre la position initiale du ballon.

3. Calculer de la même façon la durée nécessaire à Adam.

Pour Adam : $\Delta t = 15/6 = 2,5 \text{ s}$.

4. Qui atteint le ballon en premier dans ce modèle ? Comparer les deux durées et calculer leur différence. Revenir sur la prévision.

$2,5 < 3$: Adam arrive en premier, bien qu'il soit plus éloigné au départ. Son temps est plus court de $3 - 2,5 = 0,5 \text{ s}$. La prévision est confirmée ou corrigée en s'appuyant sur ces deux temps. Le joueur le plus proche n'arrive donc pas toujours en premier.

5. Dans un match, un joueur peut accélérer ou ralentir. Quelle hypothèse du modèle n'est plus respectée ? Peut-on garantir le même ordre d'arrivée ? Expliquer.

Si un joueur accélère ou ralentit, l'hypothèse de vitesse constante n'est plus respectée. Les durées réelles peuvent changer : on ne peut pas garantir le même ordre d'arrivée. Il faudrait connaître leurs déplacements réels ou leurs vitesses moyennes sur les trajets considérés.

À retenir

Pour prévoir le premier arrivé à une même position, comparer les durées depuis **le même instant**. La distance seule et la vitesse seule ne suffisent pas. La conclusion dépend des hypothèses retenues.

Méthode — Conduite et rôle

Environ 5 min de lecture/prévision, 12 min de calculs et comparaison, 8 min de discussion et bilan. Cette activité est une possibilité de transfert après C2b, en complément ou en remplacement d'un temps d'entraînement, pas une cinquième séance imposée.

Faire distinguer : même instant de départ de l'étude, joueurs déjà en mouvement, ballon immobile jusqu'au premier contact, comparaison à une même position.

Erreur fréquente

Le temps de Yanis vers la position initiale reste calculable même si Adam atteint le ballon avant lui. Cela ne signifie pas que le ballon restera à cette position après l'arrivée d'Adam. Ne pas présenter le calcul comme une prédiction certaine d'un match réel.

Activité 4 – Galilée : ralentir pour mesurer

Histoire des sciences – 20 minutes indicatives – Adaptation de l'activité 15 du site

Nom : Classe : Date :

Capacités : C1 – Choisir un référentiel et une trajectoire ; C2a – Identifier un mouvement accéléré ; C2b – Comparer des vitesses moyennes. **Outil O2** : positions successives et tableau.

Prérequis : soustraire des positions ; calculer une vitesse moyenne. **Matériel** : fiche, stylo, calculatrice possible. Activité documentaire, pas une expérience réelle.

Énoncé — Mesurer sans chronomètre électronique

Au XVII^e siècle, Galilée étudie la chute des corps. Dans ses *Discours concernant deux sciences nouvelles* (1638), il décrit une bille roulant dans une rainure droite et lisse, sur un support incliné. Une faible pente rend la descente plus lente qu'une chute verticale.

Pour comparer les durées, il recueille l'eau d'un mince jet pendant la descente, puis la pèse. Il répète les essais. Si le débit du jet reste constant, la masse d'eau recueillie est proportionnelle à la durée.

Problème : comment rendre un mouvement plus facile à mesurer pour savoir si sa vitesse augmente ?

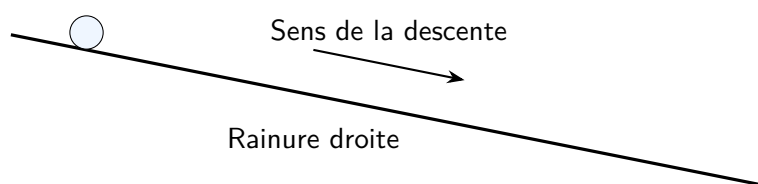


Schéma de principe redessiné, avec une inclinaison exagérée ; ce n'est pas un dessin historique.

Texte adapté du récit publié en 1638, reproduit en traduction anglaise par le Galileo Project, Rice University.

1a. Quel avantage présente une faible pente pour étudier le mouvement ?

Une faible pente allonge la durée de la descente par rapport à une chute verticale : les durées et les distances deviennent plus faciles à mesurer et à comparer. Cela ne signifie pas une vitesse constante.

1b. À débit identique, on recueille deux fois plus d'eau lors d'un second essai. Que peut-on dire de sa durée ?

Deux fois plus d'eau à débit identique correspond à une durée deux fois plus longue, si la collecte couvre exactement chaque descente.

2. On suit le centre de la bille. Choisir un référentiel adapté et décrire sa trajectoire dans la rainure droite.

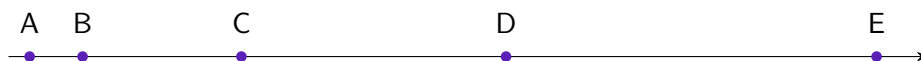
Le référentiel terrestre lié au support est adapté. Le centre de la bille suit une trajectoire rectiligne parallèle à la rainure. La bille tourne aussi sur elle-même, mais on suit son centre, pas un point de sa surface.

Activité 4 – Galilée : ralentir pour mesurer

Données simulées pour s'entraîner aujourd'hui

Une bille est lâchée sans vitesse initiale. Les données suivantes sont **simulées pour l'activité** ; elles ne sont pas les mesures de Galilée.

Position	A	B	C	D	E
Instant (s)	0	0,5	1,0	1,5	2,0
Distance depuis A (cm)	0	5	20	45	80



Positions du centre le long de la rainure, remise à l'horizontale pour la lecture. Utiliser le tableau, sans mesurer sur le dessin.

3a. Calculer les distances entre deux positions consécutives.

Intervalle	A–B	B–C	C–D	D–E
Distance (cm)	$5 - 0 = 5$	$20 - 5 = 15$	$45 - 20 = 25$	$80 - 45 = 35$

3b. Calculer la vitesse moyenne entre A et B, puis entre D et E, en cm/s. Aide : vitesse moyenne = distance parcourue / durée.

Chaque intervalle dure 0,5 s. Entre A et B : $v_{\text{moy}} = 5/0,5 = 10 \text{ cm/s}$. Entre D et E : $v_{\text{moy}} = 35/0,5 = 70 \text{ cm/s}$. Ce sont des moyennes sur des intervalles, pas des vitesses instantanées en A ou E.

4a. Le mouvement représenté est-il uniforme, accéléré ou ralenti ? Justifier en utilisant les distances et les durées.

Les distances 5, 15, 25 et 35 cm augmentent pendant des durées toutes égales à 0,5 s : le modèle représente un mouvement accéléré. Les données ont été construites selon un modèle rectiligne uniformément accéléré, mais aucune formule d'accélération n'est exigée.

4b. Pourquoi répéter les essais plutôt que se contenter d'une mesure ? Est-ce suffisant pour supprimer toute erreur ?

Répéter permet de voir si les résultats sont proches et de repérer un essai inhabituel. Cela ne supprime pas une erreur commune aux essais, par exemple un débit mal maîtrisé ou une collecte déclenchée systématiquement trop tôt.

À retenir

Une expérience peut être aménagée pour rendre une mesure possible. Pour étudier l'évolution de la vitesse, on compare des déplacements pendant des durées égales, dans un référentiel précisé.

Remarque — Sources et limites

Le document historique est une paraphrase du récit de 1638 reproduit en traduction anglaise par le Galileo Project, Rice University, consulté le 12 septembre 2026. On distingue ce récit des mesures simulées de la seconde page. La fiche n'est ni une reconstitution exacte ni une validation expérimentale réelle du modèle.

Méthode — Conduite

5 min de lecture et échange, 4 min pour les questions 1 et 2, 7 min pour les données, 4 min de bilan. Si nécessaire, faire BC ensemble pour distinguer position depuis A et distance sur un intervalle.

Activité 5 – À quelle fréquence tourne la roue ?

Manipulation réelle – 35 minutes indicatives – C3 et réinvestissement de C1

Nom : Classe : Date :

Repère professeur. Les nombres du corrigé sont un exemple fictif de calcul, à remplacer par les mesures réelles du binôme.

Capacités : C3 – Déterminer expérimentalement une fréquence de rotation, calculer une période et relier fréquence, diamètre et vitesse linéaire. C1 – Définir le point et le référentiel.

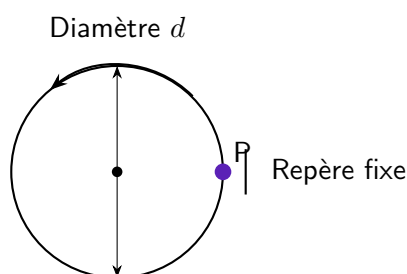
Prérequis : durée, division, cercle et diamètre ; rappel des relations fournies.

Énoncé — Compter pour mesurer

Une petite roue pédagogique tourne lentement sur un axe fixe. **Comment déterminer sa fréquence de rotation sans compter les tours pendant une minute entière ?**

Matériel : petite roue légère ou disque pédagogique sans dents ni arêtes coupantes, support stable, repère contrasté, règle et chronomètre. Pas de scie, perceuse, ventilateur ni machine d'atelier.

Organisation : le professeur installe le dispositif et le met en rotation lente ; les élèves observent à distance sans toucher. Placer les repères et mesurer seulement à l'arrêt. Attendre l'arrêt complet avant tout réglage ; éloigner mains, cheveux et vêtements des parties mobiles.



Le point P est sur le bord de la roue ; sa trajectoire est observée depuis la salle. Le diamètre doit passer par le centre (mesure à effectuer à l'arrêt).

1. Définir le système, le point suivi et le référentiel. Quelle trajectoire décrit P dans ce référentiel ?

Système : roue ; point suivi : P au bord ; référentiel terrestre lié à la salle. P décrit un cercle autour de l'axe fixe.

2. Mesurer le diamètre à l'arrêt et l'exprimer en mètres.

Le diamètre est mesuré de bord à bord en passant par le centre, roue arrêtée. Exemple : 20 cm = 0,20 m.

3. Décrire un protocole pour chronométrer dix tours complets. Indiquer le nombre compté au passage initial et au passage final. Faire valider.

Démarrer au passage de P devant le repère fixe en comptant zéro. Compter les retours 1 à 10, puis arrêter au retour numéro 10 : dix tours complets. Le comptage reste dans le même sens.

Rappel de cours

Pour N_{tours} tours comptés en Δt secondes : $n = N_{\text{tours}}/\Delta t$ en tr/s et $T = \Delta t/N_{\text{tours}}$ en secondes par tour. Si la rotation varie, ce sont des valeurs moyennes sur le comptage.

Activité 5 – À quelle fréquence tourne la roue ?

Mesurer, calculer et interpréter

4. Réaliser trois comptages de dix tours, dans le même sens. Si la roue s'arrête avant dix tours, recommencer avec le professeur. Compléter les résultats effectivement mesurés.

Essai	Durée de 10 tours (s)	$n = 10/\Delta t$ (tr/s)	$T = \Delta t/10$ (s)
1	19,8	0,505	1,98
2	20,0	0,500	2,00
3	20,2	0,495	2,02

Écrire au moins un calcul de n et un calcul de T :

Exemple fictif, essai 2 : $n = 10/20,0 = 0,50$ tr/s et $T = 20,0/10 = 2,00$ s. Pour les essais 1 et 3, remplacer 20,0 par leur durée. Le tableau arrondit n au millième pour rendre les écarts visibles ; ne pas interpréter cet affichage comme une précision certifiée.

5. Les fréquences sont-elles proches ? Proposer deux causes possibles des écarts. Si la roue ralentit pendant le comptage, que représente la fréquence calculée ?

Dans cet exemple, les fréquences sont proches de 0,50 tr/s, avec un écart maximal voisin de 0,01 tr/s. Causes possibles : temps de réaction, erreur de comptage, lancement ou ralentissement réellement différents. Si la roue ralentit, $N/\Delta t$ est la fréquence moyenne sur les dix tours, pas une fréquence constante ni la fréquence initiale.

6. Pourquoi un comptage sur dix tours est-il généralement préférable au chronométrage d'un seul tour ?

Pour une erreur de déclenchement similaire, une durée totale plus longue réduit son influence relative. Il faut cependant pouvoir compter tous les tours et discuter les variations éventuelles.

Rappel de cours — La vitesse du point P

Pour le point P au bord, dans le référentiel de la salle : $v = \pi d n$, avec d en mètres et n en tr/s. Si n est une fréquence moyenne, on obtient ici la vitesse moyenne de P sur le comptage, sans changement de sens.

7. Choisir un essai, rappeler son numéro et calculer la vitesse moyenne de P en m/s. Que changerait un diamètre deux fois plus grand, à même fréquence ?

Exemple avec l'essai 2 et $d = 0,20$ m : $v = \pi \times 0,20 \times 0,50 \simeq 0,31$ m/s. À même fréquence, doubler le diamètre double la distance parcourue par tour et donc la vitesse.

8. **Bilan.** Expliquer ce que signifient concrètement la fréquence et la période trouvées pour cet essai.

Pour cet exemple, $n = 0,50$ tr/s signifie en moyenne un demi-tour par seconde ; $T = 2,00$ s signifie en moyenne deux secondes pour un tour. Le diamètre n'intervient pas dans le comptage de la fréquence.

À retenir

La fréquence compte des tours **par seconde** ; la période mesure des secondes **par tour**. Une rotation peu rapide en tours par seconde peut donner une grande vitesse linéaire si le diamètre est grand.

Méthode — Évaluer la manipulation

Contrôler la mesure du diamètre, le comptage zéro/dix, le déclenchement, les unités, la distinction moyenne/valeur constante et l'interprétation. Prévoir 10 min de préparation, 10 min de comptages et 15 min d'exploitation. Un QCM réussi ne remplace pas cette observation des gestes.

Activité 6 – Éolienne : deux points d'une pale ont-ils la même vitesse ?

Révision de C1, C2b et C3 – 35 à 40 minutes

Nom : Classe : Date :

Durée : 35 à 40 min. En binôme ; calculatrice.

C1 — Choisir un référentiel et décrire une trajectoire ; **C2b** — Calculer une vitesse moyenne

; **C3** — Étudier un mouvement de rotation.

Ouvrir l'animation

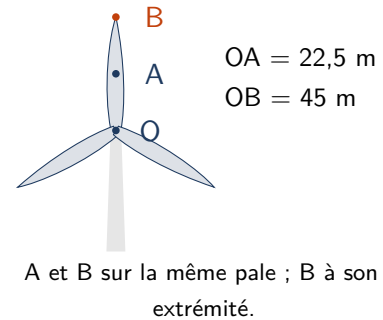
Deux affirmations à discuter

« Tous les points de la pale tournent ensemble : ils ont donc la même vitesse. »

« Pourtant, le bout de la pale parcourt une plus grande distance ! »

On étudie la **Vestas V90 de 3 MW**, dont le rotor mesure **90 m de diamètre**. L'animation reprend son régime nominal, à retrouver par chronométrage. On modélise la rotation comme uniforme, autour d'un axe fixe. A est choisi à mi-distance entre O et l'extrémité B.

Source : dossier technique du projet Kibby, tableau 2-4, p. 2-33. Les dimensions sont documentées ; l'animation n'est pas un enregistrement réel.



1. Mon hypothèse ■ 3 min

Avant de lancer l'animation, prévois : A et B mettent-ils la même durée pour faire un tour ? Ont-ils la même vitesse ? Justifie ton idée.

Exemple d'hypothèse : A et B restent sur la même pale rigide ; ils devraient donc faire un tour ensemble. B paraît aller plus vite car il parcourt un cercle plus grand. Accepter aussi une autre prévision argumentée : elle sera confrontée aux mesures.

2. Décrire les trajectoires ■ C1 ■ 4 min

Lance **Lecture**. Choisis un objet fixe servant de référence pour observer le mouvement. Nomme le référentiel correspondant. Décris les trajectoires de A et B (forme, centre et rayon). Tu peux ensuite afficher les trajectoires pour vérifier.

On choisit le sol ou le mât fixe : c'est le référentiel terrestre. O est immobile. A décrit un cercle de centre O et de rayon 22,5 m ; B un cercle de centre O et de rayon 45 m. Leurs trajectoires sont circulaires, mais distinctes.

3. Chronométrer trois tours ■ C3 ■ 8 min

a. Propose un protocole. Quel point vas-tu suivre ? Où commenceras-tu et arrêteras-tu le chronométrage ? Comment répartir les rôles dans le binôme ?

Un élève suit A et annonce ses passages sous le repère ; l'autre déclenche le chrono. Au passage initial, démarrer et compter **zéro**. Compter 1, 2, puis 3 aux retours de la même pale et arrêter à 3. Refaire en suivant B et en échangeant les rôles. Ne pas compter les trois pales successives.

Avant de mesurer : fais valider le protocole. Suis la pale portant A et B, pas les trois pales. Départ sous le repère : compte **zéro** ; à chaque retour de cette pale, 1, 2, puis 3 : arrête le chrono.

Repère professeur. Valeurs du modèle indiquées dans le tableau ; accepter des temps manuels proches. Pour les calculs de référence, conserver $\Delta t = 180/16,1$ s sans arrondir.

b. Réalise deux essais en échangeant les rôles (« Remettre à zéro » entre les essais ; « Pause » fige tout, « Lecture » reprend).

Essai	Point suivi	Tours complets	Durée mesurée (s)
1	A	3	$\simeq 11,18$
2	B	3	$\simeq 11,18$

Les durées sont-elles proches ? Si elles diffèrent un peu, propose une explication.

Les durées doivent être proches : A et B reviennent ensemble devant le repère. Quelques dixièmes de seconde d'écart peuvent venir du déclenchement manuel. La référence du modèle vaut $\Delta t = 180/16,1 \simeq 11,18 \text{ s}$; ce n'est pas une mesure sur une éolienne réelle.

Activité 6 – Éolienne : deux points d'une pale ont-ils la même vitesse ?

Calculer et conclure

Durée retenue (mesure fiable ou moyenne des deux essais) : $\Delta t = \simeq 11,18$ s.

4. Durée d'un tour et nombre de tours par seconde ■ C3 ■ 5 min

a. La période T est la durée d'un tour complet. À partir de ta mesure de trois tours, calcule T . Explique l'opération choisie.

On partage la durée totale par les trois tours : $T = \Delta t / 3$. Avec la référence non arrondie, $T = (180/16,1)/3 = 60/16,1 \simeq 3,73$ s. Un tour dure donc environ 3,73 s.

b. La fréquence n est le nombre de tours effectués en une seconde. Calcule n , puis le nombre de tours en une minute.

On divise le nombre de tours par leur durée : $n = 3/\Delta t = 16,1/60 \simeq 0,268$ tr/s. En une minute : $60n = 16,1$ tours, soit **16,1 tr/min**. Utiliser la durée retenue par le binôme et conserver les valeurs non arrondies.

Aides, dans l'ordre et si besoin : 1. Comment partager la durée totale pour passer de trois tours à un tour ? 2. Trois tours en Δt secondes : combien en une seconde ? 3. $T = \Delta t / 3$ et $n = 3 / \Delta t$; une minute contient 60 s.

A et B ont-ils la même période et la même fréquence ? Justifie par l'observation.

Oui : A et B passent ensemble au repère à chaque tour. Ils ont donc la même période T et la même fréquence n , malgré des rayons différents.

5 et 6. Distance d'un tour et vitesse ■ C2b et C3 ■ 8 min

Longueur d'un tour : $L = 2\pi R$. Vitesse moyenne : $v = \text{distance} / \text{durée}$, avec la distance et la durée d'un tour. Arrondis L à 0,1 m et v au dixième (calculs sans arrondi).

Point	R (m)	Calcul de L	L (m)	T (s)	Calcul de v	v (m/s)
A	22,5	$2\pi \times 22,5 = 45\pi$	141,4	$\simeq 3,73$	$45\pi / (60/16,1)$	37,9
B	45	$2\pi \times 45 = 90\pi$	282,7	$\simeq 3,73$	$90\pi / (60/16,1)$	75,9

7. Répondre au problème ■ 7 min

a. Combien de fois la vitesse de B vaut-elle celle de A ?

$L_B/L_A = 90\pi/(45\pi) = 2$ et $v_B/v_A = 2$ avant arrondi : B va deux fois plus vite que A.

b. Les deux affirmations du début sont-elles vraies ou fausses ? Une phrase pour chacune.

Première affirmation (« tous les points tournent ensemble : ils ont la même vitesse ») : fausse, elle confond fréquence de rotation et vitesse en m/s. Seconde (« le bout de la pale parcourt une plus grande distance ») : vraie.

c. Qu'est-ce qui est identique pour A et B, et qu'est-ce qui diffère ? Ton hypothèse de la question 1 était-elle juste ?

Identiques : la durée d'un tour et la fréquence de rotation. Différents : la distance parcourue par tour et la vitesse. Confirmer ou corriger l'hypothèse avec ces résultats.

À retenir

Deux points d'une même pale rigide ont la même période et la même fréquence de rotation. Plus un point est éloigné de l'axe, plus sa distance par tour et sa vitesse linéaire sont grandes : ici, $v_B = 2v_A$.

Repère professeur. Après la mise en commun, on peut relier les écritures : $v = L/T = 2\pi R/T$; puisque $n = 1/T$, on obtient $v = 2\pi Rn$. Ne pas donner cette dernière formule avant la recherche.

Conduite de séance

Temps	Intervention du professeur
0–3 min	Lire les deux affirmations, recueillir une hypothèse individuelle.
3–7 min	Nommer le référentiel ; observer, puis activer les trajectoires.
7–15 min	Faire proposer le protocole ; vérifier le comptage zéro, 1, 2, 3. Deux essais par binôme, puis choisir la durée.
15–20 min	Introduire le sens de période et fréquence. Donner les aides dans l'ordre, si besoin.
20–28 min	Calculer les circonférences, puis les vitesses. Vérifier que chaque distance correspond à la durée employée.
28–35 min	Comparer les arguments, revenir sur l'hypothèse et lire ensemble l'encadré « À retenir ».
35–40 min	Marge de temps : reprise des mesures si nécessaire.

Points de vigilance et aides orales

- **Trois pales ne font pas trois tours.** Suivre A ou B ; compter zéro au départ évite de mesurer seulement deux tours.
- **Rayon, pas diamètre.** OA et OB sont des rayons. La distance parcourue en un tour est une circonférence, pas le rayon ni le déplacement (nul après un tour).
- **Mesure manuelle.** Un écart de quelques dixièmes de seconde est attendu ; par exemple 10,7 à 11,7 s peut être recevable, sans en faire une tolérance métrologique certifiée. Au-delà, discuter puis refaire. Trois tours réduisent le poids relatif du temps de réaction par rapport à un seul tour.
- **Uniformité.** La valeur de la vitesse de chaque point reste constante ; la direction du mouvement change. La vitesse demandée est la distance parcourue divisée par la durée, et non un déplacement vectoriel divisé par la durée.

Utilisation et portée du modèle

Ouvrir l'animation en ligne dans un navigateur avec une connexion Internet (ou ouvrir le fichier HTML téléchargé pour un usage hors ligne). Au vidéoprojecteur, un élève compte, un autre chronomètre, la classe vérifie. Le chrono peut être armé à l'arrêt ; il ne compte que lorsque la rotation joue. Arrêter le chrono laisse tourner l'éolienne. Pause ou changement d'onglet fige tout ; Lecture reprend. Recommencer remet aussi les aides visuelles à zéro.

Le temps et l'angle proviennent d'une même horloge monotone : une baisse de fluidité ne ralentit pas le modèle. Des images manquantes peuvent néanmoins gêner le comptage : refaire l'essai. Il s'agit d'une **mesure sur animation**, non d'une détermination expérimentale sur un dispositif réel. Le modèle impose une pale rigide et une rotation uniforme ; il ne simule ni aérodynamique, ni vent, ni production électrique.

Activité 7 – Roue de voiture : des tours à la vitesse du véhicule

Révision de C1, C2b et C3 – 35 à 40 minutes

Nom : Classe : Date :

Durée : 35 à 40 min. En binôme ; calculatrice, fiche et animation facultative.

C1 — Choisir un référentiel et décrire une trajectoire ; **C2b** — Calculer une vitesse moyenne

; **C3** — Étudier un mouvement de rotation.

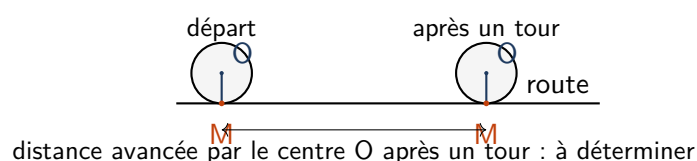
Ouvrir l'animation



La mission. Un système numérique compte les tours d'une roue de voiture. Peut-on en déduire la vitesse de la voiture ? Si l'on change le diamètre de la roue, faut-il modifier le calcul du système ?

Données réelles. Le catalogue Continental 2025 donne une **circonférence de roulement de 1 930 mm** pour le pneu **205/55 R16**. C'est la distance avancée par tour, à la vitesse de référence de **60 km/h**. On étudie un déplacement rectiligne uniforme, sans patinage ni dérapage.

Source : Continental, Tyre Databook 2025, p. 9 et 44 : valeurs techniques publiées, pas un relevé sur une voiture. Dessin : modèle géométrique.



Deux positions de la même roue ; M est une marque sur le pneu. Schéma sans échelle.

1. Prévoir et choisir le référentiel ■ C1 ■ 6 min

a. Dans le modèle rigide sans glissement, explique pourquoi un tour fait avancer d'une circonférence, et non d'un rayon ou d'un diamètre.

Sans glissement, le contour de la roue se déroule sur la route. Après un tour complet, une longueur égale à toute la circonférence a été parcourue ; le centre avance donc de cette même longueur. Un rayon ou un diamètre ne représente qu'une partie de cette longueur.

b. Dans le référentiel lié à la carrosserie (sans tourner avec la roue), décris le mouvement de O et la trajectoire de M.

Dans le référentiel de la carrosserie, O reste à la même place : il est au repos. M tourne autour de O et décrit un cercle dont le rayon est celui de la roue du modèle.

c. Dans le référentiel terrestre lié à la route, O est-il immobile ? Quelle est sa trajectoire ? M décrit-il encore un cercle autour d'un centre fixe ? Explique.

Par rapport à la route, O avance en ligne droite : il est en mouvement rectiligne. M tourne tout en avançant avec O ; il décrit des arches, pas un cercle autour d'un centre fixe. Le nom « cycloïde » n'est pas exigé.

Pour vérifier : fais rouler un disque sur une feuille sans glisser, ou utilise **l'animation** ; sa durée à l'écran ne sert pas à mesurer la période.

2. Des kilomètres aux tours ■ C2b et C3 ■ 7 min

On reprend les données Continental du pneu 205/55 R16 : circonférence de roulement $C = 1\,930$ mm, vitesse de référence 60 km/h, constante. **a.** Convertis C en mètres. Quelle distance d une voiture roulant à 60 km/h parcourt-elle en une minute ? Donne la réponse en mètres.

$C = 1\,930/1\,000 = 1,930$ m. En une heure, la voiture parcourt 60 000 m ; une minute vaut $1/60$ h. Donc $d = 60\,000/60 = 1\,000$ m.

b. Dédus le nombre de tours N_{tours} effectués en cette minute (aide : $N_{\text{tours}} = d/C$). Garde la valeur non arrondie.

Chaque tour fait avancer de 1,930 m. Ainsi $N_{\text{tours}} = d/C = 1000/1,930 \simeq 518,135$ tours. Garder le quotient en mémoire. Une fraction de tour est normale : la minute ne s'arrête pas forcément après un tour complet.

3. Retrouver période et fréquence ■ C3 ■ 6 min

a. Les tours de la question précédente ont lieu en 60 s. Calcule la durée T d'un tour. Arrondis au millième de seconde.

La durée d'un tour vaut $T = 60/N_{\text{tours}} = 60 \times 1,930/1000 = 0,1158 \text{ s} \simeq 0,116 \text{ s}$. On partage les 60 s entre tous les tours effectués.

b. Calcule la fréquence n en tours par seconde, puis en tours par minute. Arrondis respectivement au centième et à l'unité.

$n = N_{\text{tours}}/60 = 1000/(1,930 \times 60) \simeq 8,64 \text{ tr/s}$. En tours par minute, $60n \simeq 518 \text{ tr/min}$. La fréquence indique un nombre de tours par unité de temps ; la période est une durée.

4. Comparer deux dimensions de pneu ■ C3 ■ 6 min

Continental donne **2075 mm par tour** pour un pneu **225/55 R17** (p. 45). On impose la **même fréquence** que pour le 205/55 R16, avec des circonférences de roulement constantes.

a. **Avant de calculer** : le véhicule va-t-il moins vite, aussi vite ou plus vite avec la plus grande roue ? Pourquoi ?

Le véhicule ira plus vite. Il effectue autant de tours pendant la même durée, mais avance davantage à chaque tour puisque la circonférence de roulement est plus grande.

b. Complète le tableau en conservant les valeurs non arrondies dans les calculs.

Grandeur	205/55 R16	225/55 R17
Distance par tour (m)	1,930	2,075
Fréquence (tr/s)	$\simeq 8,64$	$\simeq 8,64$
Distance en dix tours (m)	19,30	20,75
Vitesse du véhicule (km/h), au dixième	60,0	64,5

Repère professeur. Avec n non arrondi : $v = 1,930n \times 3,6 = 60,0 \text{ km/h}$ et $v' = 2,075n \times 3,6 \simeq 64,5 \text{ km/h}$. Les deux roues ont la même durée pour dix tours, soit 1,158 s.

c. Pourquoi le système de calcul de vitesse doit-il connaître la circonférence de roulement ? Précise l'hypothèse qui permet de convertir les tours en distance.

Le capteur compte des tours, pas des mètres. Le système doit utiliser $d = N_{\text{tours}} C$, puis $v = d/\Delta t$, avec la bonne circonférence de roulement. Cela suppose le roulement sans patinage ni dérapage ; la circonférence est supposée constante dans la comparaison.

À retenir

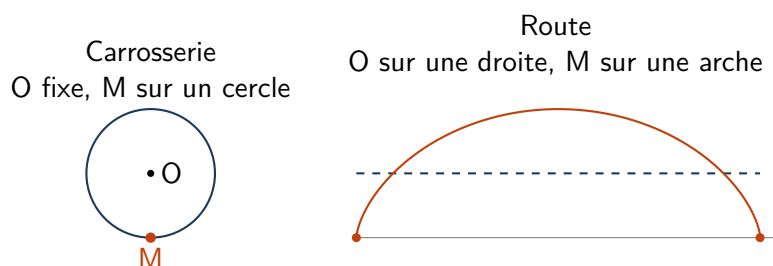
Sans glissement, N_{tours} tours font avancer le véhicule de $d = N_{\text{tours}} C$; alors $v = d/\Delta t = Cn$. À même fréquence, une circonférence plus grande donne une vitesse du véhicule plus grande. Cette vitesse n'est pas celle de tous les points du pneu par rapport à la route.

5. Prolongement facultatif ■ 4 min

Avec le pneu 225/55 R17, on veut rouler à la même vitesse de 60 km/h. Prévois si la fréquence doit augmenter ou diminuer, puis calcule-la. Que deviendrait le calcul de distance si la roue patinait ?

La fréquence doit diminuer : chaque tour fait avancer davantage. À 60 km/h ($\simeq 16,67 \text{ m/s}$), $n' = 16,67/2,075 \simeq 8,03 \text{ tr/s}$, soit environ 482 tr/min. Si la roue patine, $N_{\text{tours}} C$ ne donne plus l'avancement réel.

Deux référentiels : figure de correction



À gauche, la marque M tourne autour du centre O fixe dans la carrosserie. À droite, O avance horizontalement (pointillés bleus) tandis que M décrit une arche (orange) entre deux contacts avec la route. Les dessins représentent le même mouvement vu depuis deux référentiels.

Repère professeur. Après la mise en commun : $v = Cn$. Pour une roue idéale rigide, $C = \pi D$, donc $v = \pi Dn$. Pour un pneu déformable, utiliser la circonférence de roulement documentée.

Organisation et étayage

Temps	Travail et vigilance
0–6 min	Hypothèse et référentiels. Faire rouler un disque marqué ou utiliser l'animation. Ne pas exiger le nom cycloïde.
6–13 min	Lire les données constructeur ; calculer la distance en une minute, puis le nombre de tours.
13–19 min	Calculer période et fréquence ; distinguer leurs unités.
19–25 min	Comparer les circonférences de roulement à fréquence identique ; le tableau redonne les 60 km/h de référence (dix tours), sans arrondir trop tôt.
25–30 min	Mise en commun : opposer axe fixe et centre mobile ; lire l'encadré « À retenir ».
30–34 min	Facultatif : même vitesse avec une plus grande circonférence, puis limites en cas de patinage.

Animation et limites du modèle

L'animation en ligne illustre un tour dans deux référentiels ; elle n'est ni à l'échelle réelle ni en temps réel. **Ne pas la chronométrer.** Elle utilise une roue idéale rigide ; la donnée constructeur C tient compte du roulement du pneu.

Les valeurs Continental sont des **références techniques par dimension**, pas les mesures d'un exemplaire précis. Le catalogue définit C à 60 km/h et indique des tolérances. Ne pas confondre diamètre maximal, rayon statique sous charge et circonférence de roulement. La comparaison entre dimensions ne constitue pas une proposition de montage sur un même véhicule.

Critères de réussite : référentiel nommé ; unités correctes ; distinction entre donnée publiée, hypothèse et résultat calculé ; conservation des valeurs non arrondies ; conclusion argumentée.

Activité 8 – Voyage vers Proxima b

Approfondissement – 30 minutes indicatives – Adaptation de l'activité 17 du site

Nom : Classe : Date :

Capacités : C1 – Choisir un référentiel et expliquer qu'une description du mouvement dépend de ce choix ; C2b – Calculer une durée à partir d'une distance et d'une vitesse. **Outil O1 :** convertir une vitesse.

Prérequis : activité 1 (le passager et le quai) ; relation $v = d/t$. **Matériel :** calculatrice. Approfondissement hors programme : toutes les relations nouvelles sont fournies.

Énoncé — Destination Proxima b

Proxima b est une planète qui tourne autour de Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche du Soleil. Elle se trouve à **4,24 années-lumière** de la Terre. Un vaisseau **fictif** part de la Terre et vole en ligne droite vers Proxima b à vitesse constante : $v = 0,8c$, c'est-à-dire 80 % de la vitesse de la lumière.

Problème : combien de temps dure le voyage ?

Méthode — Pour t'aider

- Vitesse de la lumière : $c \approx 300\,000\text{ km/s}$.
- Une **année-lumière (al)** est la distance parcourue par la lumière en un an. La lumière va donc à **1 al par an** et le vaisseau à **0,8 al par an**.
- La sonde la plus rapide jamais lancée, Parker Solar Probe, a atteint environ 690 000 km/h.

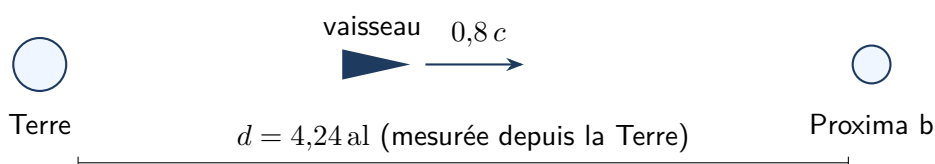


Schéma sans échelle ; les astres sont très agrandis.

Sources : NASA, catalogue des exoplanètes (Proxima Centauri b) et mission Parker Solar Probe ; valeurs arrondies.

1. On compare le référentiel terrestre et le référentiel du vaisseau. Dans chacun des deux référentiels, l'équipage est-il au repos ou en mouvement ? Proxima b est-elle au repos ou en mouvement ?

Dans le référentiel terrestre, l'équipage est en mouvement (il s'éloigne de la Terre à $0,8c$) et Proxima b est considérée comme immobile. Dans le référentiel du vaisseau, l'équipage est au repos ; ce sont la Terre et Proxima b qui se déplacent, à $0,8c$. Comme pour le passager du train, repos et mouvement dépendent du référentiel.

2a. Exprimer la vitesse du vaisseau ($0,8c$) en km/s, puis en km/h ($1\text{ km/s} = 3600\text{ km/h}$).

$v = 0,8 \times 300\,000 = 240\,000\text{ km/s}$, soit $240\,000 \times 3600 = 864\,000\,000\text{ km/h}$.

2b. Comparer les vitesses en km/h : combien de fois la vitesse du vaisseau est-elle plus grande que celle de Parker Solar Probe ?

$864\,000\,000 / 690\,000 \approx 1250$: le vaisseau irait environ 1250 fois plus vite que la sonde la plus rapide jamais construite. Il reste de la science-fiction.

3. Dans le référentiel terrestre, calculer la durée du voyage avec $t = d/v$, où $d = 4,24\text{ al}$ et $v = 0,8\text{ al/an}$. Le résultat est en années.

$t = d/v = 4,24 / 0,8 = 5,3\text{ ans}$ pour les personnes restées sur Terre.

Activité 8 – Voyage vers Proxima b

Le voyage vu depuis le vaisseau

Rappel de cours — Ce qu'a découvert Einstein

Dans le chapitre, la trajectoire dépend du référentiel, mais pas la distance entre deux lieux ni la durée d'un trajet. En 1905, Albert Einstein montre, avec la **relativité restreinte**, que ce n'est plus vrai à très grande vitesse.

Dans le référentiel du vaisseau, la **distance Terre–Proxima b mesurée** est plus courte : $d' = k \times d$, où d est la distance mesurée depuis la Terre et k un coefficient qui dépend de la vitesse. Cet effet ne concerne que la direction du mouvement ; il a été vérifié par de nombreuses expériences.

Vitesse du vaisseau	TGV (300 km/h)	0,5 c	0,8 c	0,99 c
Coefficient k	presque exactement 1	0,87	0,60	0,14

4a. Calculer la distance d' Terre–Proxima b mesurée dans le référentiel du vaisseau.

$d' = k \times d = 0,60 \times 4,24 \approx 2,54$ al.

4b. Dans le référentiel du vaisseau, Proxima b se rapproche à 0,8 al par an. Calculer la durée t' du voyage pour l'équipage avec $t' = d'/v$.

$t' = d'/v = 2,54/0,8 \approx 3,2$ ans : à l'arrivée, l'équipage a vieilli d'environ 3 ans et 2 mois, contre 5,3 ans écoulés sur Terre.

5a. Les personnes sur Terre et l'équipage trouvent des distances et des durées différentes. L'un des deux groupes s'est-il trompé ? Répondre par oui ou non, puis expliquer en une phrase.

Personne ne s'est trompé : chacun mesure dans son propre référentiel et retrouve la même vitesse, $4,24/5,3 = 0,8$ al/an et $2,54/3,2 \approx 0,8$ al/an.

5b. Regarder la valeur de k pour le TGV dans le tableau : pourquoi ne remarque-t-on pas cet effet dans un TGV ?

Pour un TGV, $k = 0,999\,999\,999\,999\,96$: il ne diffère de 1 qu'au 14^e chiffre après la virgule, une différence impossible à percevoir. L'effet ne devient important qu'à des vitesses proches de celle de la lumière.

6. Un second vaisseau vole à 0,99 c . Pour son équipage, la distance vaut $0,14 \times 4,24 \approx 0,59$ al et le voyage dure environ 7 mois. Un élève conclut : « Il parcourt 4,24 al en 7 mois : il va plus vite que la lumière ! » Le nombre 4,24 al est mesuré depuis la Terre ; le nombre 7 mois est mesuré à bord. Expliquer en une ou deux phrases pourquoi on ne peut pas les utiliser ensemble.

L'élève mélange la distance mesurée depuis la Terre (4,24 al) et la durée mesurée à bord (7 mois). Dans chaque référentiel, la vitesse vaut 0,99 al/an : $0,59/0,6$ à bord, $4,24/4,3$ depuis la Terre. Elle reste inférieure à c .

7. En deux ou trois phrases, donner la durée du voyage vers Proxima b dans le référentiel terrestre, puis dans le référentiel du vaisseau. Employer le mot *référentiel*.

La réponse dépend du référentiel. Dans le référentiel terrestre, le vaisseau parcourt 4,24 al à 0,8 c et le voyage dure 5,3 ans. Dans le référentiel du vaisseau, la distance mesurée n'est que de 2,54 al et le voyage dure environ 3,2 ans pour l'équipage.

À retenir

Une distance, une durée ou une vitesse doivent toujours être associées à un référentiel. Aux vitesses de la vie courante, distances et durées sont les mêmes dans tous les référentiels. Près de la vitesse de la lumière, elles en dépendent aussi, mais aucun objet n'atteint cette vitesse.

Remarque — Sources et limites

Distance de Proxima b : NASA, catalogue des exoplanètes (4,24 al). Parker Solar Probe : NASA, environ 692 000 km/h le 24 décembre 2024, arrondi. Le vaisseau est une expérience de pensée. $k = \sqrt{1 - v^2/c^2}$; on a aussi $t' = k \times t$. Accélération et retour ignorés (pas de paradoxe des jumeaux).

Méthode — Conduite

Hors programme : seuls $v = d/t$, le référentiel et les conversions sont exigibles. Dire « distance mesurée dans le référentiel du vaisseau », jamais « le vaisseau rétrécit ». L'activité 9 apporte la validation expérimentale.

Activité 9 – Des muons venus du ciel

Approfondissement – 30 minutes indicatives – Adaptation de l'activité 18 du site

Nom : Classe : Date :

Capacités : C1 – Choisir un référentiel et comparer deux descriptions d'un même mouvement ; C2b – Calculer une distance à partir d'une vitesse et d'une durée. **Outil O1 :** convertir des km en m et des μs en s.

Prérequis : relation $d = v \times t$; activité 8 conseillée. **Matériel :** calculatrice. Approfondissement hors programme : toutes les relations nouvelles sont fournies.

Énoncé — Une particule qui ne devrait pas arriver

Des particules venues de l'espace, les **rayons cosmiques**, heurtent en permanence la haute atmosphère. Ces chocs créent d'autres particules, dont les **muons**. Un muon est instable : il finit par se désintégrer.

Problème : comment des muons créés si haut peuvent-ils atteindre le sol ?

- Altitude de création retenue dans le modèle : $h = 10 \text{ km}$.
- Mouvement : vers le sol, en ligne droite, à vitesse constante $v = 0,999 c$, soit environ $300\,000\,000 \text{ m/s}$.
- Durée de vie moyenne d'un muon au repos : $2,2 \mu\text{s}$, avec $1 \mu\text{s} = 0,000\,001 \text{ s}$.
- **Observation :** au niveau du sol, des détecteurs comptent environ **un muon par minute sur chaque centimètre carré** ; une centaine traversent une main chaque minute.

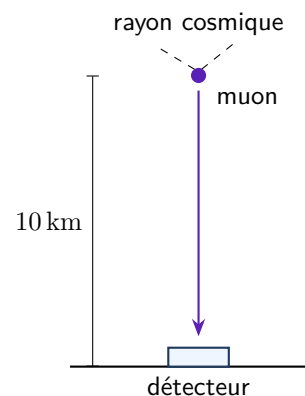


Schéma sans échelle.

Sources : Particle Data Group, *Review of Particle Physics* (durée de vie, flux au sol ; valeurs arrondies). Altitude et vitesse : valeurs typiques choisies pour le modèle.

1. Quel est le système étudié ? Dans le référentiel terrestre, quelle est sa trajectoire dans ce modèle ?

Le système étudié est le muon. Dans le référentiel terrestre, il descend en ligne droite vers le sol : sa trajectoire est rectiligne (verticale) et son mouvement rectiligne uniforme, puisque sa vitesse est supposée constante.

2. Sans tenir compte de la relativité, calculer la distance parcourue par un muon pendant $2,2 \mu\text{s}$ (sa durée de vie moyenne au repos), avec $d = v \times t$. Donner le résultat en mètres.

$t = 2,2 \mu\text{s} = 0,000\,002\,2 \text{ s}$; $d = v \times t = 300\,000\,000 \times 0,000\,002\,2 = 660 \text{ m}$.

3a. Comparer la distance trouvée à la question 2 avec l'altitude de création (10 km).

660 m, c'est beaucoup moins que $10 \text{ km} = 10\,000 \text{ m}$.

3b. D'après cette prévision, les muons devraient-ils atteindre le sol ?

Non : ils devraient se désintégrer bien avant d'arriver au sol.

3c. Cette prévision est-elle en accord avec l'observation ?

Non : les détecteurs comptent énormément de muons au sol. La prévision classique est contredite par l'observation.

Activité 9 – Des muons venus du ciel

L'explication d'Einstein

Rappel de cours — Relativité restreinte

La **relativité restreinte** (Albert Einstein, 1905) montre qu'à des vitesses proches de celle de la lumière, les distances et les durées mesurées dépendent du référentiel. Pour un muon à $0,999c$, le coefficient vaut $k \approx 0,045$.

- **Dans le référentiel du muon**, le muon est immobile et c'est le sol qui monte vers lui. L'épaisseur d'atmosphère qu'il mesure vaut $k \times h$.
- **Dans le référentiel terrestre**, la durée de vie du muon en mouvement est plus longue que $2,2 \mu\text{s}$: elle vaut $2,2 \mu\text{s} \div k$.

4. Dans le référentiel du muon, le sol se rapproche à $0,999c$ pendant $2,2 \mu\text{s}$, soit 660 m . Calculer l'épaisseur d'atmosphère mesurée dans ce référentiel. Est-elle plus petite ou plus grande que ces 660 m ?

$k \times h = 0,045 \times 10\,000 = 450 \text{ m}$, moins que 660 m : dans son référentiel, le muon voit le sol arriver avant de se désintégrer.

5a. Calculer la durée de vie moyenne du muon mesurée dans le référentiel terrestre.

$2,2 \div 0,045 \approx 49 \mu\text{s}$, soit $0,000\,049 \text{ s}$.

5b. Calculer la distance qu'il parcourt pendant cette durée. Atteint-il le sol ?

$d = v \times t = 300\,000\,000 \times 0,000\,049 \approx 14\,700 \text{ m}$, soit $14,7 \text{ km}$, plus que 10 km : le muon atteint le sol.

6. Dans le référentiel du muon, on dit « la distance est plus courte » ; dans le référentiel terrestre, « la durée de vie est plus longue ». Ces deux explications se contredisent-elles ? Répondre par oui ou non, puis justifier.

Non, elles ne se contredisent pas : les deux sont justes. Chacune décrit le phénomène dans un référentiel différent, et elles aboutissent à la même conclusion observable : le muon atteint le détecteur. Qu'un muon arrive ou non au sol ne dépend pas du référentiel ; seules les distances et les durées mesurées en dépendent.

7. En deux ou trois phrases, expliquer pourquoi les muons sont une preuve expérimentale de la relativité restreinte. Employer les mots *prévision*, *observation* et *référentiel*.

Sans relativité, la prévision indique que les muons parcourent seulement 660 m et ne devraient pas atteindre le sol. L'observation montre pourtant qu'ils y arrivent en grand nombre. La relativité restreinte explique cet écart : selon le référentiel choisi, c'est la distance à parcourir qui est plus courte ou la durée de vie qui est plus longue.

À retenir

Une théorie scientifique se juge en comparant ses prévisions aux observations. Aux vitesses proches de celle de la lumière, les distances et les durées mesurées dépendent du référentiel : c'est ce qui permet aux muons d'atteindre le sol.

Remarque — Sources et limites

Durée de vie ($2,197 \mu\text{s}$) et flux au sol (environ $1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$) : Particle Data Group, *Review of Particle Physics*. Altitude et vitesse : valeurs typiques du modèle (création entre 10 et 20 km). La durée de vie est une moyenne ; expérience historique : Frisch et Smith, *Am. J. Phys.* 31, 342 (1963).

Méthode — Conduite

Hors programme : les deux effets sont fournis. Mettre en commun le constat d'écart après la question 3, avant de lire le document d'Einstein.