

ORCHESTRATEUR

Physique - Comprendre les modèles, résoudre et discuter

Un guide approfondi, disponible hors ligne

Lire, comprendre, retrouver un chapitre

LAFAYETTE DIGITAL PRODUCTS

Sommaire

Le sommaire est cliquable. Les signets du PDF donnent accès aux chapitres et aux sections. Le lien en bas de chaque page permet de revenir ici.

Chapitre 1 - Mesurer, modéliser et discuter une incertitude 7

Chapitre 2 - Cinématique : décrire un mouvement sans confondre ses grandeurs 16

Chapitre 3 - Dynamique : relier un bilan de forces à une accélération 25

Chapitre 4 - Énergie et travail : choisir une frontière et suivre les transferts 35

Chapitre 5 - Gravitation et orbites : comprendre un mouvement de chute permanent 45

Chapitre 6 - Fluides : pression, débit et limites des modèles d'écoulement 55

Chapitre 7 - Électricité : charge, énergie et évolution d'un circuit RC 65

Chapitre 8 - Thermodynamique : distinguer un état et les transferts qui le modifient 76

Chapitre 9 - Ondes : propagation, fréquence, intensité et décalage Doppler 89

Chapitre 10 - Optique : diffraction, interférences, images et lunette 99

Chapitre 11 - Photons, niveaux d'énergie et conversion de la lumière 110

Chapitre 12 - Construire, éprouver et présenter une résolution physique 123

Annexes - Problèmes transversaux et réponses argumentées 134

Physique - Comprendre les modèles, résoudre et discuter

Un guide long pour un travail actif

Ce guide est conçu pour approfondir la physique au niveau de la spécialité de Terminale générale, en reprenant les outils préalables nécessaires. Il ne couvre pas toute la chimie du programme de physique-chimie et ne constitue pas une liste officielle de sujets d'examen. Les références institutionnelles fixent un cadre ; les explications, situations fictives, démonstrations et exercices sont une rédaction originale LFDP. Codex, assistant d'intelligence artificielle d'OpenAI, a contribué à la rédaction. Les quelques compléments dépassant les attendus centraux sont identifiés comme tels dans le texte.

L'objectif est de savoir passer d'une situation à un modèle, du modèle à des relations, puis des relations à une conclusion défendable. Une valeur numérique correcte sans hypothèses claires peut répondre à la mauvaise question. Une explication sans calcul peut rester trop vague lorsque les données permettent une estimation. Les chapitres articulent donc idées, arguments, illustrations et contrôles, afin que les formules ne soient ni des recettes isolées ni un obstacle à la compréhension.

Les exemples de corps, de sources et de dispositifs sont pédagogiques. Ils ne décrivent pas les performances garanties d'un produit, ne prescrivent pas une construction et ne remplacent pas un protocole expérimental encadré. Les valeurs arrondies de g, les matériaux fictifs et les simplifications sont indiqués. Pour une expérience réelle, les consignes de l'établissement, l'encadrement et les caractéristiques du dispositif restent indispensables.

Organisation et chemins de lecture

Le premier chapitre installe les grandeurs, les unités et la mesure. Les chapitres deux à cinq développent le mouvement, les interactions, l'énergie et la gravitation. Le sixième traite des fluides ; le septième des circuits électriques et de l'évolution RC ; le huitième de thermodynamique. Les chapitres neuf à onze relient ondes, optique et photons. Le dernier rassemble les méthodes de résolution et de discussion. Les annexes proposent des problèmes supplémentaires, avec des réponses commentées et des distinctions qui traversent plusieurs thèmes.

Pour une première lecture, suivez cet ordre, car les raisonnements de mouvement et d'énergie réapparaissent ensuite. Pour une révision ciblée, commencez par la question que vous ne savez pas traiter, puis revenez à la définition ou au modèle dont dépend sa réponse. Chaque chapitre est organisé en sections brèves afin de retrouver rapidement une explication sur téléphone ou dans une version imprimée. Cette organisation documentaire ne garantit pas le fonctionnement d'un lecteur logiciel particulier.

Une séance de travail peut comporter trois étapes : lire une section sans chercher à tout mémoriser ; fermer le texte et expliquer l'idée en quelques phrases ; résoudre un exercice en annonçant les hypothèses avant de comparer avec la correction. Si votre réponse diffère, cherchez d'abord le point où le raisonnement diverge. Modifier seulement le résultat final ne transforme pas une erreur en apprentissage.

Conventions et usage des corrections

Les équations emploient des symboles définis dans leur contexte. Le signe d'une force, d'une vitesse ou d'un échange d'énergie dépend de la convention annoncée. Une lettre peut désigner une grandeur différente dans deux chapitres ; la définition locale prime. Les puissances de dix et les préfixes doivent être convertis avant l'application numérique. Le point milieu dans une unité, comme J·s, exprime un produit ; un exposant négatif exprime un inverse.

Une correction est un exemple de démarche, pas l'unique rédaction acceptable. D'autres voies peuvent être équivalentes si elles utilisent des hypothèses cohérentes et répondent à la même question. En revanche, deux valeurs voisines ne suffisent pas à établir l'équivalence de deux modèles. Les contrôles de dimension, de signe, d'ordre de grandeur et de conditions initiales doivent accompagner le calcul.

Ce document reste pédagogique et hors ligne. Il ne fournit ni alerte, ni diagnostic, ni validation d'un dispositif réel. La longueur du manuscrit, son registre de sources et son comptage sont des éléments de traçabilité ; ils ne constituent pas une certification scolaire ou technique.

Chapitre 1 - Mesurer, modéliser et discuter une incertitude

Objectifs : distinguer grandeur et unité, choisir un système et un modèle, lire une mesure et expliquer une limite. Les chapitres suivants développent les mécanismes annoncés par ces premières situations.

Repère historique - 1960 : nommer un système commun de mesure

En 1960, la onzième Conférence générale des poids et mesures a donné au système fondé sur les unités de base alors retenues le nom de Système international d'unités et l'abréviation SI. Ce repère institutionnel montre qu'une unité n'est pas une préférence individuelle : elle appartient à une organisation commune des mesures. Le raisonnement dimensionnel du chapitre exploite cette cohérence ; il ne dépend pas du pays où un résultat est écrit. L'adoption d'un langage commun n'élimine pourtant ni l'incertitude d'une mesure particulière ni les limites du modèle employé.

Référence du fait historique, consultée le 11 octobre 2026 : BIPM, résolution 12 de la 11e CGPM, 1960, https://www.bipm.org/fr/committees/cg/cgpm/11-1960/resolution-12. Analyse pédagogique LFDP, sans citation verbatim ni image reproduite.

1. Partir d'une question qui peut être examinée

« Cet objet va vite » exprime une impression ; « sa position augmente de deux mètres en une seconde dans ce référentiel » décrit un résultat contrôlable. La physique ne commence donc pas par choisir une formule, mais par préciser le système étudié, la grandeur recherchée et les conditions d'observation. Étudier un chariot suppose de décider si l'on inclut sa charge, de définir une origine des positions et d'indiquer comment le temps est mesuré.

Une expérience et un modèle répondent à des besoins différents. L'expérience fournit des observations situées ; le modèle organise des relations permettant de les expliquer ou de prévoir d'autres résultats. Un modèle de point matériel peut être utile pour le déplacement d'un chariot sans décrire la rotation de ses roues. Cette simplification n'est pas une faute si elle est annoncée et adaptée à la question. Elle devient trompeuse lorsqu'on lui demande ce qu'elle a volontairement laissé de côté.

Pour préparer une résolution, écrivez quatre lignes : système, référentiel, hypothèses, inconnue. Elles empêchent souvent plus d'erreurs qu'une longue liste de formules. Si l'inconnue est une énergie, obtenir seulement une vitesse ne constitue pas encore la réponse.

2. Une grandeur n'est ni son nombre ni son unité

Une longueur de 1,20 m et une longueur de 120 cm sont identiques. Le nombre change lorsque l'unité change, tandis que la grandeur reste la même. Le Système international permet de relier les mesures ; le mètre, la seconde et le kilogramme servent ici de repères. Il faut distinguer masse, exprimée en kilogrammes, et poids, force exprimée en newtons.

Les dimensions constituent un contrôle indépendant du calcul numérique. Dans une relation de la forme distance = vitesse ×

durée, le produit (m/s) × s donne bien des mètres. Une expression additionnant une longueur et un temps est dépourvue de sens dans ce cadre. Une expression peut toutefois avoir les bonnes dimensions et rester physiquement fausse : l'analyse dimensionnelle élimine des erreurs, elle ne démontre pas une loi.

Convertissons 72 km/h : 72 × 1000 / 3600 = 20 m/s. Oublier cette conversion avant de calculer une énergie cinétique multiplie l'erreur, puisque la vitesse sera élevée au carré. Conservez les unités dans les étapes intermédiaires : elles montrent où un raisonnement a changé de nature.

3. Mesure, dispersion et incertitude

Un affichage de 1,20 m ne signifie pas que la longueur est exactement connue. Résolution de l'appareil, choix des points de départ et d'arrivée, étalonnage et lecture peuvent intervenir. Répéter une mesure renseigne sur sa dispersion ; cela ne révèle pas automatiquement un biais commun à toutes les mesures. Un instrument décalé peut fournir des résultats très proches entre eux, mais tous décalés.

Supposons deux résultats : 1,20 m et 1,21 m. Sans information sur leurs incertitudes, on ne peut pas conclure que les objets ont des longueurs différentes. Si l'exercice indique des marges de comparaison de 0,02 m, leurs domaines de valeurs plausibles se recouvrent. Cette observation invite à la prudence ; elle ne prouve pas non plus l'égalité exacte des grandeurs. Une marge illustrative ne doit pas être transformée en intervalle de confiance statistique sans méthode justifiant cette interprétation.

La précision des chiffres doit suivre celle des données. Écrire une accélération avec dix décimales parce que la calculatrice les affiche ne produit pas dix décimales d'information. Gardez assez

de chiffres pendant le calcul, puis arrondissez la réponse finale en expliquant la précision retenue.

4. Décrire le mouvement avant d'en chercher la cause

La position dépend du référentiel. Une personne assise dans un train est immobile par rapport au siège et mobile par rapport au quai. Choisir le référentiel terrestre pour un exercice proche du sol est souvent commode ; le considérer galiléen reste une approximation, à discuter selon l'échelle et la précision recherchées.

En mouvement rectiligne, la vitesse moyenne est le déplacement divisé par la durée : $v_{moy} = \Delta x / \Delta t$. Le déplacement est orienté ; il ne se confond pas avec la distance totale parcourue. Un aller-retour peut donner un déplacement nul malgré une distance non nulle. La vitesse instantanée est la dérivée de la position : $v(t) = x'(t)$. L'accélération décrit la variation de la vitesse : $a(t) = v'(t)$.

Considérons $x(t) = 0{,}40\,t^2 + 0{,}20\,t$, avec x en mètres et t en secondes. Les coefficients portent les unités nécessaires. On trouve $v(t) = 0{,}80\,t + 0{,}20$, puis $a(t) = 0{,}80$ m/s². À $t = 2$ s, $x = 2{,}00$ m et $v = 1{,}80$ m/s. L'accélération constante ne signifie pas vitesse constante ; elle indique que la vitesse change régulièrement.

5. Un bilan de forces appartient à un système

Pour un système de masse constante dans un référentiel galiléen, la deuxième loi de Newton s'écrit sous forme vectorielle : somme des forces extérieures = m × a. Sur un axe choisi, on projette cette relation avec des signes cohérents. On additionne les forces exercées sur le système, pas celles qu'il exerce sur son environnement.

Un chariot de masse 2,0 kg subit une traction horizontale de 3,0 N et un frottement opposé de 1,0 N. La résultante horizontale est 2,0 N ; l'accélération vaut donc 1,0 m/s² dans le sens de la traction. Si traction et frottement étaient égaux, l'accélération serait nulle. Le chariot pourrait pourtant continuer à avancer à vitesse constante. « Il avance, donc la résultante est positive » est une conclusion incorrecte.

Les forces réciproques d'une interaction agissent sur deux systèmes différents. Elles ne s'annulent pas dans le bilan d'un seul de ces systèmes. De même, le poids et la réaction normale du sol peuvent se compenser dans une situation particulière sans constituer une paire d'action-réaction : leurs partenaires d'interaction ne sont pas les mêmes.

6. Changer d'approche avec l'énergie

La dynamique relie forces et accélération ; une approche énergétique peut éviter de décrire chaque instant du mouvement. Pour un objet de masse m animé d'une vitesse de norme v, l'énergie cinétique vaut $E_c = (1/2)\, m\, v^2$. Dans un champ de pesanteur supposé uniforme, une énergie potentielle peut s'écrire $E_p = m\, g\, h$, avec une origine de hauteur choisie.

La conservation de l'énergie mécanique exige les hypothèses appropriées. Avec frottement, l'énergie mécanique peut diminuer tandis que l'énergie totale du système et des échanges reste prise en compte. La transformation vers une énergie interne n'est pas une disparition de l'énergie. Il faut préciser la frontière du système et les transferts qui la traversent.

Un objet de 2,0 kg passant de 5,0 à 10,0 m/s voit son énergie cinétique passer de 25 à 100 J. Doubler la vitesse quadruple cette énergie, dans ce modèle. Cela n'autorise pas à annoncer une

distance réelle de freinage sans connaître les forces, l'adhérence et les conditions du mouvement.

7. Une puissance n'est pas une réserve d'énergie

La puissance moyenne correspond à une énergie transférée par unité de temps : $P_{moy} = E / \Delta t$. Un watt vaut un joule par seconde. Une lampe de puissance constante 5 W utilisée deux heures reçoit 10 Wh, soit 36 000 J. Une énergie exprimée en Wh et une puissance exprimée en W ne sont donc pas interchangeables.

Une batterie donnée pour 20 Wh pourrait, dans un modèle idéal sans pertes, alimenter cette lampe pendant quatre heures. Le calcul réel doit tenir compte du rendement, de la température, des limites de fonctionnement et de l'énergie effectivement utilisable. La valeur idéale fournit un ordre de grandeur, pas une promesse d'autonomie. Aucun assemblage de batterie n'est nécessaire pour comprendre ce raisonnement.

8. Discuter deux modèles sans fabriquer un désaccord scientifique

On peut comparer un modèle sans frottement et un modèle avec frottement. Le premier facilite le calcul et décrit parfois convenablement une courte phase ; le second peut mieux reproduire une évolution prolongée. La question n'est pas lequel est toujours « vrai », mais quel modèle répond à la question avec une approximation acceptable.

Un écart entre mesure et prédiction appelle plusieurs examens : calcul, unités, protocole, incertitude et hypothèses. Il ne prouve pas immédiatement que la loi étudiée est fausse. Inversement, sauver un modèle en ajoutant sans cesse des hypothèses invérifiables le prive de sa valeur explicative. Une explication utile annonce les conditions dans lesquelles elle pourrait échouer.

9. Exercices corrigés

Exercice A - Signes. Un objet se déplace vers les x positifs à 4 m/s. Sa vitesse devient 1 m/s après 3 s. Calculez l'accélération moyenne. **Correction :** $(1 - 4)/3 = -1$ m/s². Le signe décrit l'orientation de la variation de vitesse ; il ne signifie pas que l'objet se déplace déjà vers les x négatifs. Sa vitesse finale reste positive.

Exercice B - Énergie. Un objet de 0,50 kg se déplace à 6,0 m/s. Quelle est son énergie cinétique ? **Correction :** $E_c = 0{,}5 \times 0{,}50 \times 6{,}0^2 = 9{,}0$ J. Les deux facteurs 0,5 et 0,50 correspondent respectivement au coefficient de la formule et à la masse : les confondre est une erreur fréquente.

Exercice C - Modèle. Une lampe de 4 W fonctionne trois heures. Une batterie annonce 15 Wh, dont 80 % sont supposés utilisables. **Correction :** besoin = 12 Wh ; énergie utilisable = $0{,}80 \times 15 = 12$ Wh. Le modèle donne juste la quantité requise, sans marge. Il ne justifie donc pas une autonomie garantie en conditions réelles.

10. Révision active

Sans regarder le texte, définissez grandeur, unité, référentiel et résultante. Expliquez ensuite pourquoi une vitesse non nulle peut accompagner une accélération nulle, puis pourquoi une énergie mécanique peut diminuer sans disparition de l'énergie totale. Refaites un calcul en conservant les unités et cherchez une hypothèse qui limiterait sa portée.

Pour l'oral, une réponse solide comporte une idée, un calcul ou un exemple, puis une limite. Pour l'écrit, concluez dans les termes de la question initiale. Un résultat numérique isolé ne montre ni ce qui a été étudié ni pourquoi le calcul est adapté.

11. Choisir un modèle à partir d'un graphique

Une table de mesures ne vient pas avec son équation. Pour décider si une relation est proportionnelle, cherchez d'abord ce que représente l'origine. Si un allongement x est mesuré par rapport à la longueur au repos d'un ressort, une loi F = kx passe par l'origine dans le modèle élastique linéaire. Si l'instrument présente un décalage constant, les données peuvent plutôt suivre F = kx + b. Le terme b n'est pas automatiquement une nouvelle propriété du ressort : il peut décrire un défaut de zéro ou une force déjà présente. La distinction doit être discutée par le protocole et non choisie seulement parce qu'une droite semble jolie.

Considérons les points fictifs suivants : x vaut 0,010 ; 0,020 ; 0,030 m, et F vaut respectivement 0,23 ; 0,43 ; 0,63 N. Entre deux points successifs, la variation de force est 0,20 N pour une variation d'allongement de 0,010 m. La pente est donc 20 N/m. La relation affine qui traverse ces points est F = 20x + 0,03. Interpréter la pente comme une raideur suppose que l'allongement est bien défini et que le régime linéaire est pertinent. Interpréter l'ordonnée à l'origine comme une erreur instrumentale exige une vérification supplémentaire. Le calcul distingue deux paramètres ; il ne décide pas à lui seul de leur cause.

Pour tester une relation F = kv², représenter F en fonction de v² peut rendre la structure plus visible qu'un tracé F en fonction de v. Une transformation des axes est une question adressée aux données. Elle ne dispense pas de contrôler les unités et la plage où l'hypothèse tient. Extrapoler une loi ajustée sur une faible plage peut produire une prédiction très précise numériquement et très fragile physiquement.

12. Une estimation différentielle de l'incertitude

Supposons qu'une vitesse soit calculée par v = d/t avec des mesures indépendantes de distance et de durée. Une estimation usuelle de l'incertitude-type composée, lorsque les incertitudes relatives sont petites et que le modèle linéarisé convient, donne u(v)/v = sqrt[(u(d)/d)² + (u(t)/t)²]. Cette relation combine des incertitudes-types ; elle n'est pas la somme de marges maximales garanties. Une corrélation entre mesures modifierait le calcul. Il faut donc connaître la nature des nombres utilisés avant de les insérer dans cette expression.

Avec d = 2,00 m, u(d) = 0,01 m, t = 1,00 s et u(t) = 0,02 s, la vitesse calculée est 2,00 m/s. Les contributions relatives valent 0,005 et 0,020. Leur combinaison quadratique est environ 0,0206 ; l'incertitude-type sur la vitesse est donc environ 0,041 m/s. Dans cet exemple, améliorer seulement la mesure de distance changera peu l'incertitude globale : la durée domine. Cette conclusion oriente un progrès expérimental concret plutôt qu'une multiplication de décimales.

Il est possible de travailler à un niveau plus élémentaire avec des bornes données : si d appartient à [1,99 ; 2,01] m et t à [0,98 ; 1,02] s, alors d/t appartient à [1,99/1,02 ; 2,01/0,98], soit environ [1,951 ; 2,051] m/s. Ce second calcul répond à une autre question et utilise d'autres hypothèses. Présenter les deux démarches comme identiques ferait perdre l'information qu'elles portent. La compétence recherchée est de choisir et nommer la méthode, puis de juger quelle mesure mérite d'être améliorée.

Chapitre 2 - Cinématique : décrire un mouvement sans confondre ses grandeurs

Repère historique - 1638 : composer deux mouvements

Les Discorsi de Galilée, publiés à Leyde en 1638, exposent notamment le mouvement parabolique des projectiles. Le Museo Galileo relie ce résultat à la composition d'un mouvement horizontal et d'une chute uniformément accélérée. Ce repère historique éclaire la séparation des équations suivant deux axes dans le présent chapitre. Ce n'est pas la forme dessinée d'une parabole qui prouve que tout objet réel suivra exactement cette trajectoire : la résistance de l'air et les conditions initiales doivent toujours être discutées. L'histoire d'une idée aide ici à comprendre pourquoi sa démonstration doit annoncer ses hypothèses.

Référence du fait historique, consultée le 11 octobre 2026 : Museo Galileo, notice de l'appareil démontrant la trajectoire parabolique, https://catalogue.museogalileo.it/object/ApparatusToDemonstrateParabolicTrajectoryProjectiles.html. Analyse pédagogique LFDP, sans citation verbatim ni image reproduite.

1. Le problème et les choix nécessaires

La cinématique décrit où se trouve un système et comment sa position évolue. Elle ne cherche pas encore la force responsable. Cette séparation est féconde : observer une trajectoire permet de formuler une question dynamique, mais une trajectoire seule ne révèle pas toutes les interactions. Une bille dessinant une parabole dans une vidéo ne prouve pas, par sa seule forme, que les frottements sont négligeables. Cette hypothèse doit être mise en relation avec les conditions et avec la précision des données.

Avant le calcul, nommez le système, le référentiel, le repère spatial et l'origine des dates. Le système peut être un objet dont on étudie le centre de masse, approximation utile lorsque sa rotation n'est pas la question. Le référentiel est le cadre physique par rapport auquel on décrit le mouvement. Le repère fournit des axes, une origine et des coordonnées. L'origine des dates définit ce que signifie t = 0 : départ d'un enregistrement, lancement ou passage devant un repère. Ces choix ne sont pas des détails de présentation ; ils fixent le sens des grandeurs.

Un train qui avance régulièrement illustre la dépendance au référentiel. Le voyageur assis a une position constante dans le repère du wagon. Dans celui du quai, sa position varie. Deux descriptions différentes peuvent être correctes parce qu'elles ne répondent pas à la même question. Le référentiel terrestre sera généralement adopté ici ; sa qualité d'approximation galiléenne sera discutée au chapitre consacré aux forces. Pour commencer, toutes les coordonnées sont exprimées dans un repère orthonormé fixe et le temps en secondes.

2. Position, trajectoire et déplacement

En deux dimensions, le vecteur position s'écrit OM(t) = x(t) e_x + y(t) e_y. Les vecteurs e_x et e_y désignent les directions des axes. La trajectoire est l'ensemble des positions occupées ; les fonctions horaires indiquent en plus quand elles sont occupées. Deux objets peuvent suivre la même courbe à des rythmes différents. Lire seulement une photographie de cette courbe ne suffit donc pas à connaître la vitesse.

Le déplacement entre deux dates est la différence des vecteurs positions. Il dépend des extrémités du trajet, tandis que la distance parcourue dépend de tout le chemin. Un marcheur parcourt 60 m vers l'est, puis 40 m vers l'ouest. Sa distance totale est 100 m ; son déplacement est 20 m vers l'est. Si le trajet dure 50 s, sa vitesse

vectorielle moyenne vaut 0,40 m/s vers l'est, alors que sa vitesse moyenne au sens distance divisée par durée vaut 2,0 m/s. Pour éviter l'ambiguïté, précisez lequel de ces deux sens est utilisé.

Le mouvement rectiligne se produit sur une droite, mais il peut comporter un changement de sens. Une coordonnée x(t) qui augmente puis diminue représente ce changement sans qu'il soit nécessaire de déplacer l'axe. Le mouvement circulaire est défini par une trajectoire circulaire ; il peut être uniforme ou non. « Uniforme » décrit ici la constance de la norme de la vitesse. Le vocabulaire associe ainsi une propriété géométrique de la trajectoire et une propriété temporelle, qu'il faut examiner séparément.

3. La vitesse comme variation de position

La vitesse moyenne entre t et t + Δt est ΔOM/Δt. La vitesse instantanée est la limite de ce quotient lorsque Δt tend vers zéro, si la position est dérivable. On écrit v = dOM/dt, donc v_x = dx/dt et v_y = dy/dt. La norme vaut sqrt(v_x² + v_y²) dans notre repère. Ses unités sont des mètres par seconde. Le vecteur vitesse est tangent à la trajectoire et orienté dans le sens du mouvement lorsque sa norme est non nulle.

Cette définition relie une représentation graphique à un calcul. Sur un graphe x en fonction de t, la pente d'une sécante donne une vitesse moyenne. La pente de la tangente donne v_x à une date. Une pente négative signifie que la coordonnée diminue ; elle ne signifie pas que la norme de la vitesse serait négative. Sur un graphe de vitesse en fonction du temps, une aire algébrique donnera un déplacement, et non une position absolue sans condition initiale.

Considérons x(t) = 3 + 2t − 0,50t², avec les unités adaptées. Alors v_x(t) = 2 − t. À t = 1 s, l'objet se déplace dans le sens positif ; à t

= 2 s, sa vitesse est nulle ; à t = 3 s, il se déplace dans le sens négatif. Sa coordonnée à t = 2 s est 5 m. La vitesse nulle à cet instant n'efface ni sa position ni l'évolution ultérieure. Elle caractérise ici un demi-tour, à établir par le changement de signe de v_x autour de cette date.

4. L'accélération décrit une variation vectorielle

L'accélération est $a = dv/dt$. Ses composantes sont les dérivées de celles de la vitesse et ses unités sont m/s^2. Elle peut modifier la norme de la vitesse, sa direction ou les deux. Dans l'exemple précédent, $a_x = -1\ m/s^2$. Avant le demi-tour, le vecteur vitesse et l'accélération ont des sens opposés : la norme de la vitesse diminue. Après le demi-tour, ils ont le même sens : elle augmente. La même accélération négative correspond donc à deux évolutions différentes de la rapidité.

Pour un mouvement rectiligne, comparer les signes de v_x et a_x est utile. Leur produit positif indique une augmentation de la norme de la vitesse, hors du point où elle est nulle ; leur produit négatif indique une diminution. Cette règle ne doit pas être transplantée telle quelle à un mouvement plan en comparant arbitrairement une seule composante. Il faut alors considérer la projection de l'accélération sur la direction de la vitesse.

Une accélération nulle sur un intervalle implique une vitesse vectorielle constante sur cet intervalle. Une accélération nulle à une seule date ne suffit pas. De même, une vitesse de norme constante n'implique pas une accélération nulle. Le mouvement circulaire uniforme donnera un contre-exemple décisif : le vecteur vitesse tourne et sa dérivée est dirigée vers le centre. L'intuition courante qui assimile « accélérer » à « aller plus vite » doit donc être enrichie pour devenir un concept physique.

5. Construire les lois horaires à accélération constante

Sur un axe, si $a_x = a$ est constante et si $v_x(0) = v_0$, intégrer donne $v_x(t) = v_0 + at$. Une seconde intégration, avec $x(0) = x_0$, donne $x(t) = x_0 + v_0t + at^2/2$. Les constantes d'intégration portent les conditions initiales. Les oublier revient à résoudre un autre problème. L'expression vaut uniquement pendant la phase où l'accélération est supposée constante.

On peut retrouver le déplacement par le graphe de vitesse : une aire de rectangle v_0t plus une aire algébrique de triangle $at^2/2$. Cette seconde démarche n'est pas une formule concurrente ; elle éclaire pourquoi le temps apparaît au carré. Pour comparer deux trajectoires, conservez les mêmes origines ou annoncez leurs différences. Deux expressions comportant des constantes différentes ne sont pas nécessairement incompatibles.

Un mobile part de $x_0 = 10$ m avec $v_0 = 4$ m/s et $a = 2$ m/s². Au bout de 3 s, sa vitesse est 10 m/s et sa position est 31 m. Le déplacement vaut 21 m. La vitesse moyenne sur cette phase est $(4 + 10)/2 = 7$ m/s, puisque la vitesse varie linéairement ; multipliée par 3 s, elle donne le même déplacement. Utiliser la vitesse finale pendant toute la durée donnerait 30 m et surestimerait le déplacement.

6. Projectile dans un champ uniforme : un modèle explicite

Prenons un projectile lancé depuis l'origine avec une vitesse initiale de norme v_0 faisant un angle α au-dessus de l'horizontale. Dans le modèle sans résistance de l'air, l'accélération est $(0, -g)$, avec g constant. Les conditions initiales donnent $x(t) = v_0 \cos(\alpha)t$ et $y(t) = v_0 \sin(\alpha)t - gt^2/2$. Les mouvements horizontal et vertical ont une même variable temps ; les étudier séparément ne les rend pas indépendants physiquement.

Si cos(α) n'est pas nul, on élimine t pour obtenir y = x tan(α) − gx²/[2v_0² cos²(α)]. La trajectoire est une parabole dans ce modèle. Le sommet correspond à v_y = 0, mais la vitesse horizontale reste généralement non nulle. Le temps du sommet est v_0 sin(α)/g. Pour un retour à la même hauteur, le temps de vol positif vaut deux fois cette valeur, puis la portée vaut v_0² sin(2α)/g. Cette dernière expression ne s'applique pas directement si l'arrivée et le départ ont des altitudes différentes.

Avec v_0 = 10 m/s, α = 30° et g = 10 m/s² choisi pour l'exercice, on obtient v_y(0) = 5 m/s, un sommet à 0,50 s et une hauteur maximale de 1,25 m. Le retour au niveau initial se produit à 1,0 s ; la portée vaut environ 8,66 m. Ces nombres décrivent une situation fictive idéale, pas une prescription de lancement réel. Le vent, la forme de l'objet et la résistance de l'air peuvent modifier fortement une trajectoire.

7. Mouvement circulaire : séparer direction et rapidité

Une position circulaire peut être paramétrée par x = R cos(ωt) et y = R sin(ωt), avec R et ω constants. La dérivation donne v_x = −Rω sin(ωt), v_y = Rω cos(ωt), puis une norme R|ω|. Une seconde dérivation donne a_x = −Rω² cos(ωt), a_y = −Rω² sin(ωt). L'accélération est donc opposée au vecteur position : elle pointe vers le centre et sa norme vaut Rω² = v²/R.

La période est T = 2π/|ω|. Sur un cercle de rayon 2 m parcouru en 4 s, la norme de la vitesse vaut 2πR/T = π m/s et celle de l'accélération π²/2, soit environ 4,93 m/s². Le vecteur vitesse n'est jamais constant au cours du tour, bien que sa norme le soit. Cette accélération a une définition cinématique ; le chapitre suivant cherchera quelle résultante de forces peut la produire.

Lorsque la rapidité change, une composante tangentielle s'ajoute à la composante normale. Dans le repère local de la trajectoire, a_t =

dv/dt pour la norme v et $a_n = v^2/R$ pour une trajectoire circulaire. Le repère local tourne avec le mouvement : il ne faut pas dériver ses vecteurs comme s'ils étaient fixes. Cette précision évite une confusion entre la représentation commode d'une accélération et le calcul correct de sa dérivée.

8. Estimer une vitesse à partir d'un enregistrement

Des positions mesurées à intervalles réguliers Δt peuvent fournir une estimation centrale $v(t_i) \approx [x_{(i+1)} - x_{(i-1)}]/(2\Delta t)$. Cette expression utilise les points voisins ; elle ne fournit pas directement les valeurs aux extrémités de l'enregistrement. Diminuer Δt peut mieux décrire les variations rapides, mais le bruit de position devient plus important relativement à la différence calculée. Un échantillonnage plus fin n'améliore donc pas automatiquement toute estimation.

Pour x à trois dates successives égales à 0,12 ; 0,20 ; 0,31 m, avec Δt = 0,10 s, la vitesse centrale estimée est (0,31 − 0,12)/0,20 = 0,95 m/s. Les vitesses moyennes des deux intervalles sont 0,80 et 1,10 m/s. Leur évolution suggère une accélération positive dans ce repère. Elle ne constitue pas, avec seulement trois positions incertaines, une preuve que l'accélération reste constante durant toute la trajectoire.

L'accélération estimée par seconde différence est $[x_{(i+1)} - 2x_i + x_{(i-1)}]/\Delta t^2$. Ici elle vaut 3,0 m/s². Le dénominateur au carré rend l'estimation sensible aux erreurs de position. Avant d'interpréter une oscillation brutale de l'accélération, examinez la résolution, la calibration et le suivi du point. Une courbe calculée n'est pas une observation directe indépendante des données qui l'ont produite.

9. Exercices corrigés et erreurs à reconnaître

A - Aller-retour. Un mobile parcourt 30 m vers l'est en 10 s, puis revient 10 m vers l'ouest en 5 s. Calculez la distance, le déplacement et les deux vitesses moyennes. **Correction :** distance 40 m, déplacement 20 m vers l'est, durée 15 s. La vitesse vectorielle moyenne est 20/15 = 1,33 m/s vers l'est ; distance/durée vaut 2,67 m/s. La moyenne simple de 3 et 2 m/s ne convient pas : les durées des phases sont différentes.

B - Arrêt idéal. Un mobile a $v_0 = 6$ m/s et $a_x = -2$ m/s² jusqu'à son premier arrêt. **Correction :** $v_x = 6 - 2t$ s'annule à 3 s. Le déplacement est $6\times3 - 3^2 = 9$ m. Prolonger cette expression après 3 s annoncerait un mouvement en sens inverse ; ce prolongement n'est valide que si la même accélération reste réellement appliquée. Pour un simple freinage qui cesse à l'arrêt, il faut changer de phase et de modèle.

C - Sommet. Au sommet d'une trajectoire parabolique idéale, l'accélération est-elle nulle ? **Correction :** non, elle vaut toujours $(0, -g)$. Seule la composante verticale de la vitesse est nulle. La confusion vient d'avoir remplacé la dérivée de la vitesse par la vitesse elle-même.

D - Lecture graphique. Une courbe x(t) est une droite de pente −3 m/s. **Correction :** le mouvement est rectiligne uniforme dans ce repère avec $v_x = -3$ m/s et $a_x = 0$. Une autre courbe $v_x(t)$ de pente −3 m/s² décrirait une accélération constante, ce qui est une situation différente. L'intitulé des axes détermine la signification de la pente.

10. Révision et portée

Pour réviser, reconstruisez les lois horaires à partir de l'accélération et des conditions initiales, puis vérifiez-les par dérivation. Dessinez séparément position, vitesse et accélération pour un demi-tour. Expliquez le mouvement circulaire sans recourir à « la vitesse ne change pas » : dites que sa norme reste constante alors que sa direction varie. Chaque description doit indiquer le référentiel, les unités et la phase étudiée.

Ce chapitre développe des raisonnements et exercices originaux LFDP. Il utilise comme cadre le programme officiel publié de physique-chimie, partie physique : https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm ; annexe consultée le 11 octobre 2026 : https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf. Aucun texte du programme, sujet d'examen ou schéma tiers n'est reproduit. Les situations numériques sont fictives et ne doivent pas servir de consignes de sécurité routière ou d'expérimentation dangereuse.

Chapitre 3 - Dynamique : relier un bilan de forces à une accélération

Repère historique - 1687 : organiser la mécanique par des principes

Les Principia de Newton ont été publiés en 1687 sous l'égide de la Royal Society, qui conserve le manuscrit lié à la première édition. Pour le lecteur, ce jalon permet de replacer les lois étudiées dans une construction mathématique de la mécanique, plutôt que dans une simple liste de recettes numériques. La démarche du chapitre demeure une démarche de justification : choisir le système, écrire les interactions, projeter puis résoudre. L'importance historique d'un ouvrage ne dispense pas d'annoncer les limites du cadre newtonien lorsqu'une situation demande un autre modèle.

Référence du fait historique, consultée le 11 octobre 2026 : Royal Society, notice du manuscrit des Principia, https://royalsociety.org/blog/2014/07/principia/. Analyse pédagogique LFDP, sans citation verbatim ni image reproduite.

1. Définir ce qui reçoit les forces

Une force décrit une interaction exercée sur un système par un autre système. Avant d'en dresser la liste, choisissez la frontière étudiée. Pour un livre posé sur une table, le système peut être le livre seul : la Terre et la table exercent alors des forces extérieures. Si l'on étudie livre et table ensemble, leur interaction mutuelle devient interne. Une liste de forces ne peut donc être correcte indépendamment du système choisi. C'est la première décision d'un exercice de dynamique.

On représente chaque force par un vecteur, caractérisé par sa direction, son sens et sa norme, en newtons. Pour l'étude de la translation du centre de masse, la résultante extérieure est déterminante. Pour des problèmes de rotation, les points

d'application et les moments deviennent nécessaires ; ce guide ne prétend pas remplacer un cours complet de mécanique du solide. Faire converger les flèches vers un point représentant le centre de masse est une convention de schéma, pas l'affirmation que toutes les interactions se produisent matériellement à cet endroit.

Listez les partenaires d'interaction avant de chercher des formules : Terre, support, câble, air, autre objet chargé. Le mouvement n'est pas un partenaire. Il n'existe donc pas de force « d'avancement » à ajouter parce qu'un objet se déplace. Le vecteur vitesse décrit l'état du mouvement ; les forces décrivent des interactions capables d'en faire varier la quantité de mouvement.

2. Inertie et référentiel galiléen

Dans un référentiel galiléen, un système isolé ou soumis à une résultante extérieure nulle conserve une vitesse vectorielle constante. Il peut être au repos ou en mouvement rectiligne uniforme. L'inertie n'est donc pas une tendance spéciale à s'arrêter. Les arrêts observés dans la vie quotidienne proviennent souvent d'interactions avec le sol ou l'air. Leur omniprésence explique l'intuition erronée selon laquelle une force serait indispensable pour entretenir toute vitesse.

Un référentiel en translation rectiligne uniforme par rapport à un référentiel galiléen est lui-même galiléen dans la mécanique classique. Un repère attaché à un véhicule qui accélère ne l'est pas dans les mêmes conditions. Décrire une balle libre comme accélérant par rapport à ce véhicule ne signifie pas qu'une nouvelle interaction physique lui a été appliquée. Pour utiliser la deuxième loi dans sa forme simple, choisissez un référentiel approprié ; sinon il faut introduire des termes d'inertie avec une théorie explicitée.

Le référentiel terrestre est une approximation usuelle pour les durées et distances modestes d'un exercice scolaire. La rotation de la Terre impose des limites à cette approximation, importantes pour certains mouvements étendus ou très précis. Une hypothèse peut être excellente pour un chariot suivi pendant deux secondes et insuffisante pour une étude de circulation atmosphérique. La qualité du référentiel dépend du problème, pas d'une étiquette absolue « vrai » ou « faux ».

3. Deuxième loi et projection

La quantité de mouvement est p = mv. La forme générale usuelle pour un système matériel dans un référentiel galiléen relie la résultante extérieure à dp/dt. Pour un système fermé de masse constante, cela devient somme F_ext = ma. Les problèmes de masse variable, comme un système ouvert éjectant de la matière, demandent un bilan adapté ; appliquer simplement ma avec une masse qui change sans examiner les échanges ne suffit pas.

Dans un repère orthonormé fixe, la relation vectorielle donne une équation pour chaque axe : somme F_x = ma_x, somme F_y = ma_y. Les signes viennent de la projection, pas du nom de la force. Le poids d'un objet sur un axe vertical ascendant vaut −mg ; sur un axe descendant il vaut +mg. Une force de frottement s'oppose au glissement relatif dans un modèle simple, mais son signe dépend du sens de ce glissement et de l'axe choisi.

La méthode s'organise en six étapes : annoncer système et référentiel ; faire le bilan des interactions ; choisir les axes ; projeter les forces ; résoudre pour l'accélération ou l'inconnue demandée ; interpréter. Si le mouvement est contraint à rester sur un support, cette information fournit une équation supplémentaire. On ne peut pas toujours supposer N = mg avant d'avoir projeté : une traction inclinée, un plan incliné ou une accélération verticale modifieraient la réaction normale.

4. Poids, masse et contact

La masse caractérise notamment l'inertie dans la relation ma ; le poids est la force gravitationnelle exercée par la Terre dans le modèle de proximité P = mg. Une même masse conserve sa valeur lorsqu'on change de lieu dans les situations ordinaires de ce guide, tandis que le poids dépend du champ de pesanteur. Le kilogramme est l'unité de masse, le newton celle de force. Dire qu'un poids vaut « 2 kg » mélange deux grandeurs, même si le langage quotidien emploie cette formulation.

La force de contact d'un support peut se décomposer en une composante normale et une composante tangentielle. Sur un support horizontal sans accélération verticale, un objet uniquement soumis au poids et au contact vérifie N = mg. Cela ne signifie pas que le poids et la réaction sont une paire d'action-réaction : le poids est exercé par la Terre sur l'objet, la réaction par le support sur l'objet. Les forces réciproques correspondantes sont exercées par l'objet sur la Terre et sur le support.

Un ascenseur fournit un exemple fictif. Pour une personne de masse 60 kg, avec g = 10 m/s² pour le calcul, une accélération ascendante de 1 m/s² donne N − mg = ma, donc N = 660 N. En accélération descendante de même norme, N = 540 N. La masse n'a pas changé ; la force de contact a changé. Une balance fondée sur cette force de contact peut donc indiquer une valeur différente lorsqu'elle est utilisée hors des conditions prévues pour sa conversion.

5. Frottement : une relation dépendante du régime

Le frottement statique peut empêcher un glissement et s'adapte, dans un modèle simple, jusqu'à une norme maximale $\mu_s N$. Tant que l'objet ne glisse pas, il n'est pas correct d'imposer automatiquement $f = \mu_s N$. Si une traction horizontale de 2 N est compensée par un frottement statique possible de cette norme, la résultante horizontale est nulle. Le maximum est une borne, pas une valeur toujours atteinte.

Lorsque le glissement est établi, un modèle simplifié de frottement solide utilise $f = \mu_k N$, orienté contre la vitesse relative au support. Les coefficients dépendent des surfaces et des conditions ; ils ne constituent pas des constantes universelles garanties. Le frottement de l'air obéit à d'autres modèles, par exemple une dépendance à la vitesse ou à son carré dans certaines plages. Confondre ces régimes produirait une erreur de mécanisme, même si les unités du calcul restent cohérentes.

L'orientation n'est pas toujours « vers l'arrière » dans le repère terrestre. Une caisse entraînée sans glisser par un tapis accéléré peut recevoir une force de frottement dans le sens de son accélération. La question correcte est de savoir quel glissement relatif serait empêché ou combattu. Cet exemple montre l'intérêt de définir les deux surfaces et leur mouvement relatif avant de tracer la flèche.

6. Plan incliné : exploiter la géométrie du repère

Prenons un objet de masse m sur un plan incliné d'angle α. Choisissons un axe parallèle au plan, orienté vers le bas, et un axe normal vers l'extérieur. Le poids possède une composante mg sin(α) dans la pente et une composante −mg cos(α) selon la normale. Si l'objet reste en contact avec le plan et n'a pas d'accélération normale, la réaction normale vaut N = mg cos(α). La géométrie est plus simple dans ce repère qu'avec des axes horizontal et vertical.

Sans frottement, l'accélération dans la pente vaut g sin(α), indépendante de la masse dans ce modèle. Avec un frottement de glissement opposé à une descente, elle vaut g[sin(α) − μ_k cos(α)]. Une valeur négative signifierait que la vitesse descendante diminue pendant cette phase ; elle ne prouverait pas que le système se met spontanément à monter après l'arrêt. À l'arrêt, le régime statique et ses conditions doivent être examinés.

Dans un exercice fictif avec m = 2 kg, α = 30°, μ_k = 0,20 et g = 10 m/s², N vaut environ 17,32 N. Le frottement vaut environ 3,46 N et la composante du poids dans la pente 10 N. La résultante est donc environ 6,54 N, d'où a ≈ 3,27 m/s² vers le bas. Vérifier l'ordre de grandeur est utile : le frottement réduit ici l'accélération par rapport aux 5 m/s² du modèle sans frottement. Aucun coefficient réel de surface n'est déduit de cet exemple.

7. Tension et système composé

Une corde idéale, de masse négligeable et inextensible, transmet une tension sous les hypothèses appropriées. Dans un montage sans poulie massive ni frottement, on peut souvent considérer la norme de tension identique le long d'un même segment de corde. Cette simplification appartient au modèle ; elle ne vaut pas automatiquement pour une corde massive, élastique ou passant sur un mécanisme qui dissipe de l'énergie.

Deux chariots fictifs, de masses 1 kg et 2 kg, sont reliés et tirés horizontalement par une force de 6 N, sans frottement. En prenant les deux comme système, la tension entre eux est interne : l'accélération vaut $6/(1 + 2) = 2$ m/s². Si la force tire le chariot de 1 kg, le second ne reçoit horizontalement que la tension ; $T = 2\times2 = 4$ N. Pour le premier, $6 - T = 1\times2$ retrouve le même résultat.

Cette double étude illustre une stratégie : le système composé simplifie le calcul d'une accélération commune, puis un sous-système révèle une interaction interne. Additionner toutes les forces des deux dessins sans distinguer les systèmes reviendrait à compter deux fois la tension. Choisir une frontière adaptée est donc une méthode de résolution, pas une formalité préalable au « vrai calcul ».

8. Une résultante perpendiculaire à la vitesse

Pour un mouvement circulaire uniforme, la cinématique donne une accélération vers le centre de norme v^2/R. La dynamique impose alors une résultante radiale de norme mv^2/R. L'expression « force centripète » nomme le rôle de cette résultante ; elle n'ajoute pas une interaction aux forces déjà présentes. Selon la situation, une tension, la gravitation ou une combinaison de contacts peut jouer ce rôle.

Un objet de 0,20 kg décrit un cercle horizontal idéal de rayon 0,50 m à 2,0 m/s. La résultante vers le centre doit valoir 0,20×2,0²/0,50 = 1,6 N. Si une tension est la seule force horizontale, sa composante horizontale possède cette norme. Il faut encore traiter l'équilibre vertical. L'énoncé doit préciser le montage ; le calcul radial seul ne suffit pas à conclure que la tension totale vaut 1,6 N dans toute configuration.

Une force perpendiculaire à la vitesse peut modifier sa direction sans changer instantanément sa norme. Cela prépare le lien avec la puissance d'une force, définie plus loin par le produit scalaire F·v. La description par les forces et celle par l'énergie ne se contredisent pas : elles examinent des aspects différents de la même évolution. Une force dont le travail est nul n'est pas nécessairement une force dont l'effet dynamique est nul.

9. Champ électrique et signe de la charge

Dans un champ électrique uniforme E, une particule de charge q reçoit une force électrique F = qE. Pour une charge positive, cette force est dans le sens du champ ; pour une charge négative, elle est dans le sens opposé. Sous l'hypothèse d'une seule force pertinente et d'une masse constante, l'accélération est a = qE/m. Une particule déjà en mouvement n'avance pas nécessairement dans le sens de cette accélération : les conditions initiales restent essentielles.

Pour une particule fictive de masse 2,0×10^−6 kg et de charge 3,0×10^−9 C, un champ de 4,0×10^3 N/C donne une force de 1,2×10^−5 N et une accélération de 6,0 m/s². Avec la charge opposée, seule l'orientation de cette accélération change. Dans un repère où le champ est orienté vers les x positifs, a_x prend donc le signe de q. Les unités N/C multipliées par C donnent bien N.

Cet exemple théorique ne décrit ni une manipulation électrique ni un dispositif domestique. Il montre comment un champ traduit une interaction distribuée dans l'espace en force sur un objet test. Pour une particule réelle très légère, le poids, les collisions ou les effets relativistes doivent être examinés selon les conditions ; ils ne sont pas éliminés par le simple fait d'écrire F = qE.

10. Exercices corrigés

A - Force inclinée. Un bloc de 2 kg reçoit une traction de 5 N faisant 30° au-dessus de l'horizontale. Il reste sur un support horizontal, sans frottement, avec g = 10 m/s². **Correction :** verticalement, N + 5 sin(30°) − 20 = 0, donc N = 17,5 N. Horizontalement, a_x = 5 cos(30°)/2 ≈ 2,17 m/s². Imposer N = 20 N ignorerait la composante verticale de la traction.

B - Résultante nulle. Un chariot avance à 3 m/s avec deux forces horizontales opposées de 4 N. **Correction :** leur somme est nulle ; dans le modèle galiléen de masse constante, la vitesse reste constante. Le repos n'est pas la seule solution. Si l'une des forces disparaît, on change de phase et l'accélération devient non nulle.

C - Interaction réciproque. Deux objets se repoussent. L'un est plus massif. Les normes des forces réciproques sont-elles différentes ? **Correction :** elles sont égales et leurs sens opposés dans la mécanique étudiée. Les accélérations peuvent différer parce que F/m dépend de la masse. L'égalité des forces n'impose pas l'égalité des effets sur deux systèmes différents.

D - Contact impossible. Un calcul de réaction normale donne N < 0 pour un support qui ne peut que pousser. **Correction :** le modèle de contact permanent est devenu incompatible avec la situation. Une réaction normale négative ne constitue pas une valeur physique à conserver en prenant sa valeur absolue. Il faut examiner une

phase de perte de contact avec un nouveau bilan et de nouvelles conditions.

11. Révision et références

Reconstituez un bilan sans regarder le dessin corrigé, puis vérifiez qu'un partenaire correspond à chaque force. Expliquez pourquoi l'état de mouvement n'est pas une force, pourquoi un frottement statique n'est pas toujours à sa limite et pourquoi une résultante centripète n'est pas une interaction supplémentaire. Pour chaque projection, justifiez le signe avant de remplacer les symboles par des valeurs.

Cadre de progression : programme officiel publié de Terminale, partie physique, https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm. Repères sur les lois de Newton : NASA Glenn, https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/newtons-laws-of-motion/. Les raisonnements, exemples et exercices ci-dessus sont originaux LFDP ; aucun passage, schéma ou sujet d'examen tiers n'est reproduit. Les hypothèses annoncées appartiennent aux situations pédagogiques et ne certifient aucun montage réel.

Chapitre 4 - Énergie et travail : choisir une frontière et suivre les transferts

Repère historique - 1849 : relier travail mécanique et transfert thermique

Les archives de la Royal Society conservent un manuscrit de James Prescott Joule daté du 4 juin 1849, consacré à l'équivalent mécanique de la chaleur ; il a été reçu le 6 juin et présenté le 21 juin. Ce document fournit un repère concret dans l'étude des relations entre travail et transfert thermique. Il ne signifie pas que tout le premier principe était déjà contenu dans une formule scolaire unique. Dans ce guide, sa portée pédagogique est de rappeler qu'une baisse d'énergie mécanique doit conduire à chercher les transferts et les autres formes d'énergie, au lieu de conclure à une disparition.

Référence du fait historique, consultée le 11 octobre 2026 : Royal Society, archives PT/37/3, https://makingscience.royalsociety.org/items/pt_37_3/paper-on-the-mechanical-equivalent-of-heat-by-james-p-prescott-joule. Analyse pédagogique LFDP, sans citation verbatim ni image reproduite.

1. Pourquoi une approche énergétique ?

La dynamique permet de trouver une accélération, puis une trajectoire si les conditions initiales sont connues. Certaines questions demandent seulement une vitesse après un déplacement ou une énergie transférée. Une approche énergétique peut alors éviter de calculer chaque instant du mouvement. Elle ne remplace pas les forces dans toutes les situations : l'énergie cinétique dépend de la norme de la vitesse et ne donne pas à elle seule sa direction.

Prenons une bille qui descend une piste idéale. Une équation différentielle le long de la piste permettrait de décrire son

mouvement détaillé. Si l'on cherche seulement la vitesse à une hauteur donnée, le bilan d'énergie peut être beaucoup plus direct. En revanche, connaître cette vitesse ne dit pas si la bille reste en contact dans un virage. Cette dernière question réclame une projection de la deuxième loi de Newton. Choisir une méthode consiste donc à examiner quelle information elle conserve et laquelle elle ne fournit pas.

La première précaution est de définir le système. Un objet seul, un objet avec la Terre et un objet avec son support n'ont pas la même liste de transferts externes. Une diminution d'énergie mécanique d'un objet ne signifie pas une perte d'énergie totale de tout ce qui l'entoure. Le vocabulaire « perte » désigne souvent une énergie devenue moins utile pour l'objectif poursuivi, par exemple transformée en énergie interne, et non une disparition physique.

2. Travail d'une force constante

Pour une force constante F appliquée à un point se déplaçant de A vers B, le travail est W_AB(F) = F·AB = F AB cos(θ), où θ est l'angle entre la force et le déplacement. Le travail est une grandeur algébrique, exprimée en joules. Il est positif si la force possède une composante dans le sens du déplacement, négatif si cette composante lui est opposée et nul si elle lui est perpendiculaire.

Une traction constante de 10 N fait un angle de 30° avec un déplacement horizontal de 3 m. Son travail vaut 10×3 cos(30°), soit environ 26,0 J. La même norme de force dans une direction verticale aurait un travail nul pour ce déplacement horizontal. Ajouter les seules normes des forces serait donc insuffisant : leur orientation est indispensable. Le produit scalaire traduit précisément cette dépendance.

Pour une force variable, on additionne des travaux élémentaires F·dr le long du trajet ; en une dimension, cela devient une intégrale

de F(x) dx. Une aire algébrique sous un graphe F en fonction de x peut représenter ce travail. Une zone située sous l'axe contribue négativement. L'intégrale ne doit pas être remplacée par « force finale fois distance » à moins qu'une hypothèse permette ce raccourci.

3. Théorème de l'énergie cinétique

L'énergie cinétique d'un point matériel de masse constante est E_c = mv²/2, où v désigne la norme de la vitesse. Pour ce modèle dans un référentiel galiléen, la variation d'énergie cinétique entre A et B est égale à la somme des travaux des forces extérieures. Écrire ΔE_c = somme W ne suppose pas que la résultante est constante. Les forces doivent néanmoins être celles du système étudié, et leur travail évalué sur le déplacement pertinent.

On comprend l'origine de la relation en prenant le produit scalaire de ma = somme F avec la vitesse v. Comme d(v·v)/dt = 2a·v, on obtient d(mv²/2)/dt = somme F·v. L'intégration sur le temps relie variation d'énergie et travaux. Cette démonstration utilise la masse constante et un modèle de point matériel. Un solide qui tourne possède aussi une énergie cinétique de rotation ; la réduire sans justification à celle de son centre de masse serait incomplet.

Un chariot de 2 kg passe de 1 à 3 m/s. Sa variation d'énergie cinétique vaut (2/2)(9 − 1) = 8 J. Si une traction fournit 12 J et qu'une autre force fournit −4 J, la somme vaut bien 8 J. Le théorème ne dit pas que la traction a travaillé seule. Il permet aussi de déterminer le travail d'une force inconnue lorsque les autres transferts et les vitesses sont connus.

4. Forces conservatives et énergie potentielle

Une force conservative permet de définir une énergie potentielle dont la variation est l'opposé de son travail : $W_{AB} = -[E_p(B) - E_p(A)]$. Son travail ne dépend que des extrémités, dans le domaine considéré. L'énergie potentielle n'est définie qu'à une constante additive près. On choisit une origine commode ; les variations et les résultats physiques ne dépendent pas de cette origine.

Dans un champ de pesanteur uniforme avec un axe vertical ascendant z, $E_p = mgz$ + constante. Une montée de hauteur h augmente cette énergie de mgh et le travail du poids vaut $-mgh$. Une descente donne le signe opposé. La formule contient l'interaction avec la Terre ; elle ne doit pas être comprise comme une réserve mystérieuse attachée à une hauteur absolue sans référence.

Pour un ressort idéal de raideur k et d'allongement x mesuré par rapport au repos, la force de rappel est $F_x = -kx$. Une primitive adaptée donne $E_p = kx^2/2$. Elle est positive aussi bien pour un allongement que pour une compression, avec zéro au repos. La force est orientée vers le repos dans les deux cas. Cette forme suppose un domaine élastique linéaire : elle n'annonce pas le comportement d'un ressort fortement déformé ou endommagé.

5. Conservation et bilan de l'énergie mécanique

L'énergie mécanique est $E_m = E_c + E_p$ pour les interactions conservatives prises en compte. Si seules ces forces travaillent, E_m reste constante dans le modèle. Si des forces non conservatives effectuent un travail, la variation d'énergie mécanique correspond à leur travail, lorsque la décomposition du système et de ses interactions a été posée correctement. Un frottement sur un support immobile peut ainsi diminuer E_m.

Une bille fictive de masse 0,50 kg part sans vitesse à 3,0 m au-dessus du niveau d'arrivée. Avec g = 10 m/s² et sans rotation ni frottement, son énergie initiale vaut 15 J. À l'arrivée, elle est entièrement cinétique : v = sqrt(2gh) = sqrt(60), soit environ 7,75 m/s. La masse s'élimine parce qu'elle multiplie les deux énergies. Cette simplification ne signifie pas que tous les objets réels descendent identiquement dans l'air.

Supposons maintenant un travail de frottement de −3,2 J durant la descente. L'énergie cinétique finale vaut 11,8 J, donc v = sqrt(2×11,8/0,50) ≈ 6,87 m/s. L'énergie mécanique finale est plus faible ; l'énergie totale n'a pas disparu. Pour décrire où elle a été transférée, il faut élargir le système au support et aux échanges thermiques. Si la bille roule, une part de l'énergie cinétique appartient à la rotation : ce serait encore un autre modèle.

6. Distance d'arrêt idéale et limites de l'usage

Un modèle théorique de freinage avec une force résistante constante de norme f sur un support fixe donne W = −fd. Si la vitesse initiale est v_0 et la vitesse finale nulle, le théorème de l'énergie cinétique conduit à d = mv_0²/(2f). Si f = μmg dans un modèle de glissement, la distance devient v_0²/(2μg). La masse s'élimine seulement parce que la force retenue est proportionnelle à cette masse.

Cette expression montre, dans le modèle, une dépendance quadratique à la vitesse initiale. Doubler v_0 quadruple d si μ et g restent identiques. Elle ne fournit aucune distance réelle garantie : temps de réaction, état du support, pente, contrôle du freinage, variations de la force et interaction avec l'air ne sont pas décrits. Un résultat scolaire ne doit pas devenir une consigne opérationnelle de conduite.

La distance parcourue pendant une phase préalable à vitesse constante est v_0Δt. On peut l'ajouter à une distance de freinage si les phases sont clairement séparées et si le modèle le justifie. Cette addition illustre une bonne habitude : identifier les frontières temporelles avant de combiner des bilans. Employer une formule unique en y insérant des grandeurs appartenant à différentes phases produit souvent une réponse sans signification.

7. Ressort et échanges entre deux formes d'énergie

Un objet de masse 0,25 kg est associé à un ressort idéal de raideur 100 N/m. Dans un modèle horizontal sans frottement et sans autre travail, un allongement initial de 0,20 m au repos correspond à une énergie potentielle de 2,0 J. Au passage par la position d'équilibre, l'énergie potentielle choisie est nulle ; l'énergie cinétique vaut 2,0 J, d'où v = sqrt(2×2,0/0,25) = 4,0 m/s.

L'approche énergétique donne la norme de cette vitesse sans calculer l'instant du passage. La direction dépend de la phase du mouvement. Une étude dynamique donnerait une équation d'oscillateur et permettrait de calculer la période. Les deux méthodes sont complémentaires : l'une décrit une contrainte globale, l'autre l'évolution temporelle. Il est utile de savoir ce qui manque avant de croire que l'exercice est entièrement résolu.

Dans le graphe de l'énergie potentielle, un minimum correspond à un équilibre stable pour ce système unidimensionnel idéal : un petit déplacement fait apparaître une force de rappel. Un maximum correspond à un équilibre instable. Dire que la force est nulle en un point ne suffit donc pas à qualifier la stabilité. La forme de l'énergie autour du point apporte l'information nécessaire. Des frottements peuvent ensuite amortir le mouvement sans modifier cette distinction locale du modèle conservatif.

8. Puissance, rendement et chaîne de conversion

La puissance instantanée d'une force appliquée à un point de vitesse v est P = F·v. Sa moyenne sur une durée est le travail divisé par cette durée. Un watt correspond à un joule par seconde. Une puissance élevée peut fournir une énergie donnée rapidement ; elle n'est pas une énergie totale. Une réserve exprimée en Wh et une puissance exprimée en W ne doivent donc pas être additionnées ou comparées comme des grandeurs identiques.

Un mécanisme fictif fournit un travail utile de 600 J en 15 s. Sa puissance utile moyenne vaut 40 W. Avec un rendement énergétique de 0,85 pour cette phase, l'énergie reçue est 600/0,85 ≈ 706 J. Le rendement est énergie utile divisée par énergie reçue, pour une frontière et un objectif définis. Il ne signifie pas que le reste de l'énergie a été annihilé : il correspond à des transferts qui ne servent pas l'objectif retenu.

Pour deux conversions successives de rendements 0,80 et 0,90, le rendement global est 0,72 si les définitions et les phases sont compatibles. Il ne vaut pas la moyenne 0,85. On peut le comprendre sur 100 J reçus : la première étape en rend 80 utiles à la seconde, qui en rend 72. Les pertes relatives s'appliquent à des quantités différentes. Une récupération d'une partie des transferts peut améliorer une chaîne, mais ne permet pas de contourner la conservation de l'énergie.

9. Choisir entre forces et énergie

Utilisez une approche par les forces si la question porte sur l'accélération, la direction, la réaction d'un support ou une tension. Utilisez une approche énergétique si les travaux peuvent être calculés facilement et si la question porte sur une vitesse, une hauteur ou un transfert. Souvent, il faut les deux. Sur une trajectoire circulaire, l'énergie peut déterminer la rapidité à une hauteur ; la projection radiale détermine ensuite le contact nécessaire.

Une difficulté particulière survient lorsque le travail d'une force de contact dépend du mouvement du support. Le frottement n'est pas toujours un travail négatif sur chaque objet dans tout référentiel. Un tapis entraînant une caisse peut lui fournir de l'énergie. La dissipation globale doit être étudiée en considérant les deux systèmes et leur mouvement relatif. Cette nuance évite de transformer une propriété fréquente du frottement sur sol fixe en règle absolue mal appliquée.

Le calcul énergétique exige aussi une cohérence du référentiel : l'énergie cinétique dépend de la vitesse dans le référentiel choisi. Un même objet n'a pas la même énergie cinétique pour un observateur qui l'accompagne et pour un observateur au sol. Les bilans restent cohérents si toutes les grandeurs sont définies dans le même cadre. Mélanger des vitesses de référentiels différents dans une seule équation ne produit pas une conservation utilisable.

10. Exercices corrigés

A - Travail nul. Une force de 8 N reste perpendiculaire à un déplacement de 5 m. **Correction :** le travail est nul, puisque cos(90°) = 0. Cette force peut pourtant changer la direction de la vitesse. Le travail nul ne démontre donc pas une accélération nulle.

B - Hauteur. Un objet ponctuel de 0,20 kg possède 4,0 J d'énergie cinétique avant une montée idéale sans frottement. Avec g = 10 m/s², jusqu'à quelle augmentation de hauteur peut-il monter si toute cette énergie devient potentielle ? **Correction :** mgh = 4,0 donne h = 2,0 m. Il faut supposer qu'aucune autre forme d'énergie ou contrainte ne modifie le bilan. Le zéro de hauteur choisi ne change pas cette différence.

C - Force variable. Sur un axe, une force est F_x(x) = 6x avec x en mètres et le coefficient en N/m. Calculez son travail de x = 0 à x = 2 m. **Correction :** intégrer 6x donne 3x² ; le travail vaut 12 J. Employer la force finale de 12 N sur 2 m donnerait 24 J, car la force n'a pas eu sa valeur finale durant tout le trajet.

D - Rendement. Une chaîne reçoit 500 J, en transmet 400 à une seconde étape et fournit finalement 300 J utiles. **Correction :** les rendements sont 400/500 = 0,80 et 300/400 = 0,75 ; leur produit 0,60 égale 300/500. Les deux transferts non utiles valent 100 J chacun dans cet exemple, mais leurs rendements relatifs diffèrent.

E - Conclusion impossible. Deux objets ont la même énergie cinétique. Ont-ils la même vitesse ? **Correction :** pas nécessairement, car E_c dépend aussi de la masse. Pour une énergie de 10 J, une masse de 1 kg a une vitesse sqrt(20) ; une masse de 4 kg a une vitesse sqrt(5), deux fois plus faible. Une égalité de grandeur ne permet pas d'isoler un paramètre sans connaître les autres.

11. Révision et sources

Pour réviser, écrivez un bilan en symboles avant tout remplacement numérique. Justifiez le signe des travaux, nommez les interactions auxquelles correspond chaque énergie potentielle et indiquez les conditions de conservation. Expliquez ensuite ce qu'un résultat énergétique ne permet pas de déterminer. L'objectif est de choisir une méthode adaptée plutôt que de chercher à tout prix une formule où toutes les données peuvent entrer.

Références de cadre et d'unités : ministère de l'Éducation nationale, programme publié de Terminale, https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm ; BIPM, brochure du SI, https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/, consultés le 11 octobre 2026. Le développement, les démonstrations et les exercices sont originaux LFDP. Aucun montage électrique, expérience de freinage ou manipulation de ressort à risque n'est prescrit par les situations fictives de ce chapitre.

Chapitre 5 - Gravitation et orbites : comprendre un mouvement de chute permanent

1. Une interaction à distance et un modèle

La gravitation newtonienne décrit une attraction entre deux masses. Pour deux objets assimilés à des points, de masses M et m séparées par une distance r, la norme de la force vaut GMm/r^2. La constante G est universelle dans ce modèle ; elle ne doit pas être confondue avec g, qui décrit un champ de pesanteur local. Les deux objets reçoivent des forces réciproques de même norme et de sens opposés.

L'assimilation à des points demande une justification. À l'extérieur d'un corps parfaitement sphérique et de répartition de masse sphérique, son champ gravitationnel est celui d'une masse concentrée au centre. Un corps réel peut présenter des écarts de forme et de répartition. Pour des calculs scolaires d'orbite, on adopte souvent cette approximation ; pour une navigation spatiale précise, elle peut être insuffisante. Un résultat ne gagne pas une précision physique simplement parce qu'on emploie beaucoup de chiffres dans le calcul.

Choisissons un vecteur unitaire e_r dirigé du centre attracteur vers le satellite. La force exercée sur le satellite s'écrit $F = -GMm\, e_r/r^2$. Le signe moins traduit l'attraction. Dans un repère centré sur l'objet massif considéré approximativement fixe et galiléen, l'accélération du satellite vaut $a = -GM\, e_r/r^2$. La masse m s'élimine dans cette relation ; elle reste présente dans l'énergie ou la force. Les conditions du référentiel et l'absence d'autres interactions sont des hypothèses à annoncer.

2. Du champ gravitationnel au poids près du sol

Le champ gravitationnel créé par la masse M à la distance r a une norme GM/r². Près d'une surface sphérique de rayon R, on peut écrire g ≈ GM/R² si les effets de rotation et les particularités locales sont négligés. À une altitude h, la distance au centre est R + h, et non h. Oublier le rayon du corps attracteur ferait diverger artificiellement la force lorsque l'altitude tend vers zéro.

Le rapport entre les champs à l'altitude h et à la surface vaut [R/(R + h)]². Pour h = R, ce rapport est 1/4. À une altitude faible devant R, le champ varie peu et l'hypothèse de pesanteur uniforme peut être pertinente. Cette approximation a un domaine de validité ; elle ne doit pas être prolongée à des distances comparables au rayon sans examen.

Dans un exercice avec R = 6,0×10^6 m et h = 3,0×10^5 m, le rapport vaut (6,0/6,3)² ≈ 0,907. Le champ est donc environ 9,3 % plus faible que celui de surface du modèle. Ce résultat décrit les données fictives proposées, pas une mesure d'un lieu réel. Il montre surtout pourquoi une petite altitude à l'échelle humaine peut produire un changement non négligeable à l'échelle du calcul orbital.

3. Orbite circulaire : concilier vitesse tangentielle et accélération radiale

En orbite circulaire uniforme de rayon r, la cinématique impose une accélération de norme v²/r vers le centre. La gravitation étant la seule force retenue, on égalise v²/r et GM/r². On obtient v = sqrt(GM/r). La vitesse est tangentielle, tandis que la force et l'accélération sont radiales. Elles ne s'opposent pas à la vitesse et ne la freinent pas dans ce modèle ; elles en changent la direction.

Une orbite peut être comprise comme une chute qui se poursuit autour du corps attracteur. L'objet n'est pas hors de l'action de la

gravité. Une vitesse horizontale adaptée et la courbure du champ donnent une trajectoire qui ne rencontre pas la surface dans le modèle. Cette explication est une image conceptuelle ; construire une orbite réelle demande des contraintes de trajectoire, de propulsion et d'environnement bien plus nombreuses.

La période vaut T = 2πr/v, donc T = 2π sqrt[r³/(GM)]. En posant μ = GM, on peut calculer sans séparer les deux paramètres. Pour un exercice fictif avec μ = 4,00×10^14 m³/s² et r = 8,00×10^6 m, la vitesse vaut environ 7,07×10^3 m/s. La période vaut environ 7,11×10^3 s, soit environ 118 min. Le contrôle dimensionnel de sqrt(μ/r) donne bien des m/s.

4. Comparer deux orbites sans refaire tous les calculs

Autour d'un même centre attracteur, v est proportionnelle à r^−1/2 et T à r^3/2 pour des orbites circulaires idéales. Si le rayon est multiplié par quatre, la vitesse est divisée par deux et la période multipliée par huit. Ce raisonnement par rapports réduit les risques d'erreur et révèle la structure des lois. Une grande orbite peut être parcourue moins vite tout en demandant un temps beaucoup plus long pour un tour.

Le rayon orbital et l'altitude ne sont pas interchangeables. Si deux altitudes sont dans un rapport quatre, leurs rayons R + h ne le sont généralement pas. Le raisonnement précédent doit donc porter sur les distances au centre. Écrire le symbole r et rappeler sa définition avant le calcul évite cette confusion fréquente.

Il est aussi possible de retrouver μ à partir d'une période et d'un rayon mesurés : μ = 4π²r³/T². Cette relation estime un paramètre gravitationnel sous les hypothèses du modèle. Elle ne fournit pas directement la masse si G n'est pas connue et si les autres conditions sont omises. L'étude de la précision serait également

importante : une petite erreur relative sur r est amplifiée par la puissance trois.

5. Les lois de Kepler et leur portée

Les lois de Kepler décrivent les orbites planétaires idéalisées : ellipse avec le centre attracteur à un foyer, aires égales balayées en des durées égales, et relation entre carré de la période et cube du demi-grand axe. Les deux premières ont été publiées en 1609 et la troisième en 1619. Ce repère historique, confirmé par la présentation officielle de la NASA, montre une distinction entre décrire une régularité à partir d'observations et expliquer ensuite sa structure par un modèle d'interaction.

Pour une orbite elliptique, la distance au centre varie. La vitesse est plus grande près du point le plus proche et plus faible près du point le plus éloigné. La loi des aires interdit donc de traiter toutes les orbites elliptiques comme des mouvements uniformes. L'ellipse possède deux foyers ; le centre attracteur est à l'un d'eux dans le modèle, pas au centre géométrique de l'ellipse.

La troisième loi s'écrit $T^2/a^3 = 4\pi^2/[G(M + m)]$ pour un problème newtonien idéal à deux corps, avec a le demi-grand axe de leur orbite relative. Si m est négligeable devant M, on emploie souvent GM au dénominateur. Pour une orbite circulaire, a devient r. La relation $T^2 = a^3$ n'est valable qu'avec des unités et un système adaptés ; elle n'est pas une égalité universelle entre des secondes carrées et des mètres cubes.

6. Une énergie potentielle adaptée aux grandes distances

Dans le modèle newtonien central, on choisit souvent une énergie potentielle nulle à distance infinie : $E_p(r) = -GMm/r$. Elle est négative à distance finie. Cette valeur négative n'est pas un défaut : l'origine de l'énergie potentielle est conventionnelle. La force radiale se retrouve par $F_r = -dE_p/dr = -GMm/r^2$.

Le choix $E_p = mgz$ du voisinage du sol est une approximation locale de la variation de cette énergie. On ne doit pas employer mgh avec g constant pour un changement de distance arbitrairement grand. Près d'une surface, la variation peut se linéariser ; loin de celle-ci, la dépendance en 1/r devient importante.

En orbite circulaire, $v^2 = GM/r$ donne $E_c = GMm/(2r)$. L'énergie mécanique totale vaut donc $E_m = -GMm/(2r)$. Elle est négative pour cette orbite liée. Cette relation n'autorise pas à déduire un rayon circulaire de toute énergie sans examiner la forme de la trajectoire et la vitesse. Pour une orbite elliptique liée, le demi-grand axe intervient dans une formule analogue, mais la distance instantanée varie.

7. Vitesse de libération : un seuil énergétique idéal

Dans un modèle sans atmosphère et avec un centre attracteur isolé, la vitesse minimale permettant d'atteindre l'infini avec une vitesse finale tendant vers zéro se calcule par $E_m = 0$. Au départ à la distance r, $mv^2/2 - GMm/r = 0$, donc $v_{lib} = \mathrm{sqrt}(2GM/r)$. Elle vaut $\mathrm{sqrt}(2)$ fois la vitesse circulaire à cette même distance.

Cette expression ne décrit pas la vitesse d'une fusée pendant toute une mission ni un protocole de lancement. La propulsion peut agir progressivement ; l'atmosphère et d'autres corps modifient les contraintes. La relation fournit un seuil pour un objet impulsé puis laissé sans propulsion dans un modèle précis. La remplacer par

une « vitesse obligatoire de toute fusée » serait une mauvaise interprétation.

Avec les données fictives $\mu = 4{,}00\times10^{14}\ m^3/s^2$ et $r = 8{,}00\times10^{6}$ m, la vitesse de libération idéale vaut $1{,}00\times10^{4}$ m/s, tandis que la vitesse circulaire vaut environ $7{,}07\times10^{3}$ m/s. La différence vient de la destination énergétique : rester lié sur un cercle ou atteindre une distance arbitrairement grande. Les deux calculs répondent à des questions distinctes.

8. Impesanteur et mouvement commun

Dans une cabine en chute libre, les objets et les personnes ont des accélérations gravitationnelles proches. La force de contact qui soutenait une personne au sol peut devenir très faible. Cette situation est souvent appelée impesanteur ; elle ne démontre pas la disparition du champ gravitationnel. L'étude du contact et celle de la gravitation doivent être séparées, comme dans l'exemple de l'ascenseur du chapitre de dynamique.

Dans un référentiel orbital idéal, on peut construire une description où certaines forces d'inertie compensent la gravitation. Cela ne fait pas de ces forces des interactions supplémentaires dans le référentiel galiléen de départ. Employer simultanément les termes de deux descriptions sans préciser le référentiel conduit à un double comptage. Pour le niveau traité ici, la description par une accélération gravitationnelle centripète reste la voie la plus directe.

Le champ n'est pas parfaitement uniforme à travers un système étendu. Les différences d'accélération gravitationnelle entre points participent aux effets de marée. Une cabine suffisamment petite peut les négliger pour un exercice simple ; un problème plus précis doit les prendre en compte. L'approximation de mouvement

commun ne prétend donc pas que tous les points de tout objet ont exactement la même accélération dans l'espace.

9. Orbite synchronisée et conditions supplémentaires

Une orbite dont la période égale celle de rotation d'un astre est synchronisée avec cette rotation au sens temporel. Pour rester au-dessus d'un même point de l'équateur dans le modèle simple, il faut en plus une orbite circulaire, dans le plan équatorial et dans le même sens de rotation. L'égalité des périodes seule ne garantit pas une position apparente fixe.

La relation $r^3 = \mu T^2/(4\pi^2)$ permet de calculer un rayon synchronisé idéal lorsque μ et T sont donnés. Elle ne donne pas directement l'altitude : il faut ensuite soustraire le rayon de l'astre. L'exercice doit distinguer une période de rotation d'un jour civil arbitrairement défini si une précision importante est demandée. Choisir 24 heures sans examiner la donnée fournie peut introduire un écart conceptuel.

Même dans un tel modèle, un signal met un temps non nul pour parcourir la distance. La propagation et le mouvement orbital sont deux questions différentes. Un satellite paraissant fixe n'est pas immobile dans un référentiel centré sur l'astre ; il accomplit une révolution. Le qualificatif « fixe » doit toujours être rattaché à l'observateur ou au référentiel considéré.

10. Modèle newtonien et modèles plus précis

La gravitation newtonienne est très utile pour de nombreux calculs de mécanique céleste. Elle ne constitue pas une description suffisante de tous les phénomènes gravitationnels. Des exigences de précision ou des champs particuliers demandent d'autres modèles, notamment relativistes. Reconnaître cette limite ne rend pas inutiles les exercices newtoniens : un modèle peut être pertinent dans un domaine tout en n'étant pas universel.

L'opposition utile n'est donc pas « ancienne théorie fausse contre nouvelle théorie vraie » sans nuance. On examine les prédictions, les conditions et la précision. Un problème scolaire annoncé comme à deux corps néglige volontairement d'autres attractions ; un logiciel de mission peut inclure des perturbations multiples. Le choix dépend de l'objectif et de la tolérance aux écarts.

Dans un compte rendu, distinguez paramètres donnés, paramètres mesurés et résultats calculés. Si une période a servi à ajuster μ, retrouver ensuite cette même période avec ce μ n'est pas une vérification indépendante. Il faut une autre observation ou une prédiction non utilisée dans l'ajustement. Ce point relie la mécanique orbitale à la méthode générale de validation du chapitre initial.

11. Exercices corrigés

A - Altitude. Un astre a un rayon R ; un satellite se trouve à l'altitude 2R. Comparez son champ à celui de surface. **Correction :** sa distance au centre vaut 3R, donc le rapport est 1/9. Employer 2R donnerait 1/4 et confondrait altitude et rayon orbital.

B - Période. Deux satellites fictifs décrivent des cercles autour du même astre, avec $r_2 = 9r_1$. **Correction :** $v_2/v_1 = 1/3$ et $T_2/T_1 = 27$. Les rapports viennent des puissances $-1/2$ et $3/2$. La masse

des satellites est supposée négligeable devant celle du centre attracteur.

C - Masse du satellite. Doubler m en conservant r et M modifie-t-il la vitesse circulaire ? **Correction :** non dans l'approximation où M est fixe et dominant, car m s'élimine dans l'équation d'accélération. La force et les énergies sont en revanche doublées. Confondre vitesse et force masquerait cette distinction.

D - Unités. Vérifiez la dimension de μ. **Correction :** puisque $a = \mu/r^2$, μ a la dimension longueur³/temps². Dans $T^2 = 4\pi^2 r^3/\mu$, le quotient possède donc la dimension temps². Une donnée exprimée en km³/s² doit être convertie avant un calcul utilisant des mètres.

E - Interprétation. Un objet a $E_m > 0$ dans le modèle central isolé. Peut-on affirmer qu'il suit un cercle ? **Correction :** non ; une orbite circulaire liée possède $E_m < 0$ avec l'origine choisie à l'infini. L'énergie positive est compatible avec une trajectoire non liée, sous les autres conditions du modèle. La direction de la vitesse et le moment cinétique restent nécessaires pour préciser cette trajectoire.

12. Révision et sources

Retrouvez la vitesse circulaire et la période à partir de Newton et de l'accélération centripète. Expliquez pourquoi la gravitation reste présente en impesanteur, pourquoi l'altitude doit être ajoutée au rayon de l'astre et pourquoi une période synchronisée ne suffit pas à rendre un satellite apparemment fixe. Concluez chaque calcul par une phrase reliant le résultat aux hypothèses.

Référence officielle pour les lois de Kepler et les dates 1609 et 1619 : NASA Science, https://science.nasa.gov/solar-system/orbits-and-keplers-laws/, consultée le 11 octobre 2026. Le présent développement mathématique, les comparaisons et les exercices sont originaux LFDP ; aucun récit historique, image ou passage de cette page n'est reproduit. Le programme publié de Terminale, partie physique, fournit le cadre scolaire :

https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm. Les paramètres numériques explicitement fictifs ne sont pas des mesures de la Terre ni une trajectoire opérationnelle.

Chapitre 6 - Fluides : pression, débit et limites des modèles d'écoulement

Repère historique - 1648 : comparer une pression selon l'altitude

Le Récit de la grande expérience de l'équilibre des liqueurs de Pascal, publié en 1648, rapporte l'expérience réalisée selon ses indications par Florin Périer au puy de Dôme. La BnF souligne que la hauteur de la colonne de mercure diminuait avec l'altitude. Ce résultat constitue un exemple historique de comparaison susceptible de départager des explications : le poids de l'air devient une cause à examiner, au lieu d'invoquer une horreur du vide. Les calculs de ce chapitre restent distincts de cette expérience. Ils ne demandent ni de manipuler du mercure ni de reproduire un appareil ancien.

Référence du fait historique, consultée le 11 octobre 2026 : BnF, présentation de l'édition originale du Récit, https://www.bnf.fr/fr/etienne-klein-resident-musee. Analyse pédagogique LFDP, sans citation verbatim ni image reproduite.

1. Décrire un milieu sans suivre chaque molécule

Un fluide peut s'écouler et se déformer sous l'effet des contraintes. Les liquides et les gaz présentent des différences importantes, notamment de compressibilité. Dans une description macroscopique, on emploie des grandeurs locales comme pression, masse volumique, température et vitesse. Cette approche traite le milieu comme continu à l'échelle pertinente ; elle ne prétend pas que la matière soit réellement dépourvue de structure microscopique.

La masse volumique ρ est une masse divisée par un volume, en kg/m^3. Elle peut varier avec la température, la pression ou la composition. L'hypothèse de fluide incompressible signifie ici que

les variations de masse volumique sont négligeables dans le problème. Elle n'affirme pas qu'aucun liquide réel ne puisse être comprimé. Pour un gaz, cette approximation peut parfois convenir à certains écoulements lents, mais elle doit être examinée et non appliquée par habitude.

Un écoulement stationnaire présente, à chaque point fixe, des grandeurs qui ne varient pas avec le temps. Cela ne signifie pas que les particules du fluide sont immobiles. Une particule peut passer par des zones de vitesses différentes dans un écoulement stationnaire. Séparer une évolution observée en un point de celle suivie le long d'une particule prépare une lecture correcte de Bernoulli et des lignes de courant.

2. Pression et force : préciser la surface et le sens

La pression correspond à une force normale par unité de surface dans le modèle hydrostatique. Son unité SI est le pascal : 1 Pa = 1 N/m². Sur une petite surface plane de pression uniforme, la norme de la force pressante est pA. Pour une surface étendue sur laquelle la pression varie, il faut additionner les contributions locales ; une pression mesurée en un seul point n'est pas automatiquement représentative de toute la surface.

La force pressante est normale à la surface. Sur deux faces opposées d'un objet, les forces peuvent en grande partie se compenser. Une pression absolue élevée ne donne donc pas nécessairement une grande résultante : celle-ci dépend souvent d'une différence de pression. Pour une plaque séparant deux milieux à pressions uniformes p_1 et p_2, la résultante normale a une norme |p_1 − p_2|A, dans le sens imposé par la pression la plus élevée.

Avec une différence de pression de 5 000 Pa et une surface de 10 cm², soit 0,0010 m², la force résultante vaut 5,0 N. Employer 10

directement donnerait un facteur dix mille erroné. Les conversions d'aires méritent une attention particulière : 1 cm² vaut 10^−4 m², parce que le facteur de longueur est élevé au carré. Un hectopascal vaut 100 Pa et un bar 100 000 Pa ; ces unités ne doivent pas être confondues.

3. Statique d'un liquide de masse volumique constante

Prenons un liquide au repos, de masse volumique constante, dans un champ de pesanteur uniforme. Avec un axe vertical z orienté vers le haut, la pression vérifie dp/dz = −ρg. On peut l'obtenir en équilibrant une petite colonne : la différence des forces pressantes compense le poids. Entre deux niveaux, p_2 − p_1 = −ρg(z_2 − z_1). La pression augmente donc lorsque l'on descend.

À une profondeur h sous une surface de pression p_0, la pression vaut p = p_0 + ρgh. Le terme ρgh est une différence de pression par rapport à la surface, pas nécessairement la pression absolue. Pour ρ = 1 000 kg/m³, g = 10 m/s² et h = 0,50 m dans un exercice, cette différence vaut 5 000 Pa. Si p_0 = 100 000 Pa, la pression absolue vaut 105 000 Pa.

Dans un liquide homogène au repos et connecté, deux points de même altitude ont la même pression sous ces hypothèses. La forme du récipient n'intervient pas directement dans la différence hydrostatique. Une colonne étroite et une cuve large peuvent donc produire la même pression à la même profondeur. Cela ne signifie pas qu'elles contiennent la même masse ni que les forces sur toutes leurs parois soient identiques.

Le résultat ne s'applique pas sans modification à une masse volumique variant fortement avec l'altitude, à un fluide accéléré ou à un écoulement. Dans l'atmosphère, par exemple, ρ n'est pas généralement constante sur une grande différence d'altitude. Une

loi simple peut être pertinente sur une petite hauteur et devenir insuffisante lorsqu'on change d'échelle.

4. Poussée d'Archimède et volume déplacé

La pression est plus élevée sous un objet immergé qu'au-dessus. L'addition des forces pressantes produit une résultante ascendante égale au poids du fluide déplacé dans le modèle hydrostatique. Sa norme est ρ_f gV_immergé pour un fluide homogène, avec ρ_f la masse volumique du fluide. Le volume pertinent est le volume immergé, pas obligatoirement le volume total de l'objet.

Pour un bloc prismatique entièrement immergé, on peut comprendre la formule sans suivre une surface courbe. Les forces latérales se compensent. Si la hauteur est h et la surface horizontale A, la différence de pression entre bas et haut est ρ_f gh. La résultante vaut donc ρ_f ghA = ρ_f gV. Cette démonstration explique pourquoi la forme détaillée n'est pas le facteur principal dans la relation générale.

Un objet fictif de masse 0,60 kg et de volume total 0,0010 m³ est entièrement immergé dans un liquide de masse volumique 1 000 kg/m³, avec g = 10 m/s². Son poids vaut 6,0 N et la poussée 10 N. Si aucune autre force ne le retient, la résultante verticale initiale est ascendante. Pour flotter à l'équilibre, il doit déplacer 0,60 kg de liquide, soit 0,00060 m³ : 60 % de son volume est immergé. Cela ne signifie pas nécessairement 60 % de sa hauteur si sa section varie.

La flottabilité dépend de la masse volumique moyenne et du volume disponible pour déplacer du fluide, pas seulement du matériau d'une paroi. Un objet creux peut donc flotter même si le matériau qui le constitue est plus dense que le liquide. Ce raisonnement ne certifie aucune capacité de charge réelle :

stabilité, étanchéité, mouvement du fluide et résistance mécanique sont d'autres questions.

5. Débit volumique et conservation de la masse

Le débit volumique Q est un volume traversant une section par unité de temps, en m³/s. Si une vitesse uniforme normale à une section A convient, Q = Av. Si la vitesse varie sur la section, on peut employer une vitesse moyenne adaptée ou une intégrale. La formule simple ne signifie donc pas que toutes les particules avancent à la même vitesse dans une conduite réelle.

Pour un écoulement stationnaire sans accumulation ni fuite, la masse entrante par unité de temps égale la masse sortante. Le débit massique vaut ρQ dans une section uniforme. Si la masse volumique est constante, on obtient Q_1 = Q_2 et A_1v_1 = A_2v_2. Pour un fluide compressible, il faut conserver ρ_1A_1v_1 = ρ_2A_2v_2 ; supprimer les densités sans justification modifierait le bilan.

Un débit fictif de 0,0020 m³/s traverse une section de 0,0040 m² : la vitesse moyenne vaut 0,50 m/s. Dans une section quatre fois plus petite, 0,0010 m², elle vaut 2,0 m/s si le débit et la densité sont conservés. Le débit est 2,0 litres par seconde puisque 1 litre vaut 10^−3 m³. Le rétrécissement augmente ici la vitesse moyenne, pas la quantité de liquide passant chaque seconde.

À une bifurcation, le débit entrant est la somme des débits sortants si le même modèle incompressible et stationnaire s'applique. Une égalité de pression aux branches ne garantit pas des débits identiques : longueurs, diamètres et pertes de charge peuvent différer. La conservation fixe une contrainte globale ; elle ne fournit pas toutes les relations nécessaires à la répartition.

6. Bernoulli : une conservation conditionnelle

Pour un écoulement stationnaire, incompressible et sans dissipation visqueuse significative, une forme de Bernoulli s'écrit p + ρgz + ρv²/2 = constante le long d'une ligne de courant, en l'absence d'apport ou de retrait de travail entre les points considérés. Les trois termes ont la dimension d'une pression. Cette relation n'est pas une règle universelle disant que toute vitesse élevée implique partout une pression basse.

À altitude égale, elle donne p_2 − p_1 = (ρ/2)(v_1² − v_2²). Pour les vitesses 0,50 et 2,0 m/s du précédent exemple, avec ρ = 1 000 kg/m³, la différence vaut 500(0,25 − 4) = −1 875 Pa. La pression statique du second point est plus faible dans ce modèle. La relation a un domaine annoncé : elle ne détermine pas à elle seule les pertes dans une longue conduite réelle.

Le terme ρv²/2 est parfois appelé pression dynamique. Il ne doit pas être confondu avec une pression statique mesurée par n'importe quel dispositif. Un instrument, son orientation et la façon dont il perturbe l'écoulement déterminent ce qu'il mesure. L'expression mathématique et l'observation expérimentale doivent être raccordées par un protocole, comme pour les autres modèles du guide.

Les hypothèses sont confirmées par la présentation officielle de la NASA Glenn sur Bernoulli, consultée le 11 octobre 2026 : https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/bernoullis-equation/. Les développements et nombres proposés ici sont originaux ; aucun schéma ni démonstration de cette page n'est reproduit.

7. Réservoir et vitesse de sortie idéale

Considérons un réservoir dont la surface libre est très grande devant celle d'un petit orifice. Dans un modèle idéal, la vitesse de la surface peut être négligée, les pressions à la surface et à la sortie sont identiques et l'écoulement est traité comme quasi stationnaire. Bernoulli donne v_sortie = sqrt(2gh), où h est la différence de niveau entre la surface et l'orifice. Cette relation est souvent appelée loi de Torricelli.

Avec h = 1,25 m et g = 10 m/s² pour le calcul, la vitesse idéale vaut 5,0 m/s. Si la surface libre descend, h varie et la vitesse idéale aussi. On ne peut donc pas conserver cette valeur durant toute une vidange sans discuter l'évolution du niveau. Le débit dépend encore de la section effective et des écarts au modèle idéal, notamment la contraction de l'écoulement et les pertes.

La ressemblance avec la vitesse acquise par une chute libre sur la même hauteur révèle une structure énergétique commune. Elle n'implique pas que l'écoulement entier soit identique au mouvement d'un point matériel. La pression, la géométrie, la continuité et le contact avec les parois apportent des conditions propres au fluide. Une analogie est utile lorsqu'on précise ce qu'elle compare et ce qu'elle laisse de côté.

8. Viscosité et pertes de charge

La viscosité traduit la résistance associée aux déformations et aux différences de vitesse entre couches de fluide. Elle peut produire une dissipation d'énergie mécanique. Dans une conduite réelle, maintenir un débit peut demander une différence de pression même entre deux sections de même altitude et de même vitesse moyenne. Le Bernoulli idéal sans pertes ne suffit pas à décrire cette situation.

On peut introduire un terme de perte de charge dans un bilan énergétique, à condition de préciser sa définition et son unité. Une chute de pression par dissipation n'est pas une disparition de la masse ni de l'énergie totale ; une part de l'énergie mécanique se transforme en énergie interne. Des pompes peuvent apporter de l'énergie, et d'autres dispositifs en retirer. Les frontières du système redeviennent essentielles.

En complément de culture scientifique, considérons un écoulement stationnaire, laminaire et pleinement développé d'un fluide newtonien incompressible, de viscosité constante, dans un tube cylindrique rectiligne horizontal de rayon constant, sans glissement aux parois fixes. Son débit volumique peut être décrit par Q = πr^4Δp/(8ηL), avec η la viscosité dynamique, L la longueur du tronçon étudié, r son rayon intérieur et Δp la pression amont moins la pression aval ; Q est compté positif dans ce sens. Cette loi est donnée ici comme modèle particulier, non comme relation à appliquer à toute conduite. Elle montre une dépendance forte au rayon et une différence avec une conservation idéale sans viscosité. Turbulence, entrées, coudes ou variations de propriétés demandent d'autres descriptions.

9. Une transmission de force ne crée pas d'énergie

Dans un dispositif hydraulique idéal au repos, une variation de pression peut être transmise dans un liquide et produire des forces différentes sur des pistons de surfaces différentes. Si la même différence de pression agit sur A_1 et A_2, alors F_2/F_1 = A_2/A_1. Une grande surface peut donc recevoir une force plus élevée. Cela ne constitue pas une multiplication gratuite du travail.

La conservation du volume déplacé impose A_1d_1 = A_2d_2 dans le modèle incompressible sans fuite. La force plus grande correspond à un déplacement plus petit, et F_1d_1 = F_2d_2 dans le cas idéal. Pour un rapport de surfaces 10, une force de 10 N sur

le petit piston correspond à 100 N sur le grand ; un déplacement de 5 cm du petit correspond à 0,5 cm du grand. Les deux travaux valent 0,50 J.

Les frottements et les déformations diminuent le travail utile réel. Les calculs de ce paragraphe sont des exercices de conservation, pas des instructions de fabrication ou de levage. Pression maximale, résistance des matériaux, stabilité et sécurités ne sont pas étudiées. Une formule de physique ne suffit pas à valider un appareil.

10. Exercices corrigés

A - Pression relative. Un liquide de masse volumique 800 kg/m³ a une surface à 100 000 Pa. Avec g = 10 m/s², calculez la pression à 2 m de profondeur. **Correction :** la différence hydrostatique vaut 16 000 Pa ; la pression absolue vaut 116 000 Pa. Répondre 16 000 Pa sans dire qu'il s'agit d'une pression relative serait ambigu.

B - Section. Un débit de 3 litres par seconde traverse une section de 6 cm². **Correction :** Q = 0,003 m³/s et A = 0,0006 m², donc v_moy = 5 m/s. Si la section est doublée à débit conservé, la vitesse est divisée par deux. Ce résultat utilise une densité constante et ne décrit pas un dispositif réel garanti.

C - Flottaison. Un objet homogène de masse volumique 600 kg/m³ flotte dans un liquide de masse volumique 1 000 kg/m³. **Correction :** à l'équilibre idéal, ρ_obj gV_total = ρ_liquide gV_immergé. La fraction de volume immergé vaut 0,60. Une fraction de hauteur égale demande une forme dont la section appropriée reste constante.

D - Bernoulli. Dans un écoulement idéal horizontal, la vitesse est la même aux points 1 et 2, mais une mesure montre une baisse de pression. **Correction :** ce constat invite à examiner les hypothèses : dissipation, apport ou retrait d'énergie, stationnarité et mesures. Il

ne faut pas forcer le résultat réel dans la relation idéale en supprimant une donnée. Le modèle peut être insuffisant ou le protocole défectueux.

11. Révision et portée

Pour réviser, reliez chaque formule à son bilan : forces pour la statique, volume ou masse pour le débit, énergie pour Bernoulli. Vérifiez toujours si la pression est absolue ou relative, si la vitesse est locale ou moyenne et si le volume est total ou immergé. Ces distinctions sont souvent plus importantes que la difficulté du calcul.

Cadre scolaire : programme publié de Terminale, partie physique, https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm. Repère officiel complémentaire : NASA Glenn, Bernoulli, lien donné ci-dessus. Rédaction et exercices originaux LFDP, sans citation verbatim ni reproduction de figure. Les cas idéaux n'autorisent aucune manipulation de pression dangereuse, plongée, installation domestique ou dispositif de soin.

Chapitre 7 - Électricité : charge, énergie et évolution d'un circuit RC

Repère historique - 1800 : une correspondance sur les phénomènes électriques

La Royal Society conserve une lettre d'Alessandro Volta à Joseph Banks datée du 20 mars 1800, consacrée à l'électricité associée au contact de substances conductrices de différentes sortes. Cette source d'archive situe les phénomènes électriques dans une recherche fondée sur des dispositifs et des échanges scientifiques. Il serait trompeur d'assimiler sans précaution cet objet historique au générateur idéal des exercices. Le chapitre sépare justement le phénomène réel et les relations choisies pour le modéliser : tension, courant, résistance et stockage capacitif répondent à des questions différentes.

Référence du fait historique, consultée le 11 octobre 2026 : Royal Society, archives L&P/11/137, https://makingscience.royalsociety.org/items/l-and-p_11_137/letter-account-of-electricity-excited-by-contact-and-conducting-substances-of-different-kinds-from-alessandro-volta-to-joseph-banks. Analyse pédagogique LFDP, sans citation verbatim ni image reproduite.

1. Charge électrique et courant

La charge électrique est une grandeur algébrique exprimée en coulombs. Un système peut porter une charge positive, négative ou globalement nulle. Le courant correspond à un transfert de charge par unité de temps. Pour une quantité de charge Δq traversant une section pendant Δt, le courant moyen vaut $\Delta q/\Delta t$; le courant instantané est la dérivée de la charge transférée selon une orientation choisie. Un ampère vaut un coulomb par seconde.

Le sens conventionnel du courant est celui d'un déplacement de charges positives. Dans un métal, les électrons mobiles se

déplacent en sens opposé au courant conventionnel. Dans d'autres milieux, plusieurs types de porteurs peuvent contribuer. Le signe d'un courant dans une équation dépend donc d'une orientation et ne doit pas être assimilé au seul sens de mouvement d'un électron particulier.

Un courant constant de 2,0 mA pendant 3,0 s correspond à une charge transférée de 6,0 mC. Si le courant varie, il faut intégrer i(t) sur la durée, ou calculer une aire algébrique sous son graphe. Une valeur finale de courant ne décrit pas nécessairement toute la phase. Cette distinction est analogue à celle entre vitesse finale et déplacement dans un mouvement accéléré.

2. Tension et différence de potentiel

Une tension U_AB est une différence de potentiel V_A − V_B, exprimée en volts. Un volt correspond à un joule par coulomb. La tension n'est pas une quantité de charge stockée et le courant n'est pas une tension en mouvement. Les deux grandeurs décrivent des aspects différents : potentiel entre deux points et débit de charge dans une branche.

L'inversion des points change le signe : U_BA = −U_AB. Dans un circuit idéal à éléments localisés où les effets d'induction non pris en compte sont négligeables, les différences de potentiel s'additionnent le long d'un parcours. La somme algébrique sur une maille fermée est nulle. Cette loi de maille ne consiste pas à additionner les seules valeurs positives annoncées sur les composants ; les orientations comptent.

La conservation de la charge donne la loi des nœuds dans le modèle où il n'y a pas d'accumulation significative de charge au nœud : somme des courants entrants = somme des courants sortants. Si une entrée vaut 5 mA et deux sorties 2 et 3 mA, le bilan est cohérent. Un composant qui stocke de la charge, comme

un condensateur, reste compatible avec cette conservation : il faut intégrer le stockage dans le système et ses bornes.

3. Résistance et convention de puissance

Pour un conducteur ohmique idéal dans un domaine de fonctionnement donné, u = Ri avec R en ohms. On adopte la convention récepteur : le courant entre par la borne dont le potentiel est utilisé comme positif pour u. La puissance électrique reçue vaut alors p = ui. Pour une résistance R > 0, p = Ri² = u²/R est positive et correspond à un transfert vers l'énergie interne dans le modèle.

Une résistance de 1,0 kΩ soumise à 5,0 V reçoit un courant de 5,0 mA et une puissance de 25 mW. Si ces valeurs restent constantes pendant 20 s, l'énergie reçue vaut 0,50 J. Le calcul convertit les préfixes avant d'appliquer les lois. Confondre kΩ et Ω multiplierait le courant par mille ; confondre mW et W multiplierait l'énergie par mille.

La relation ohmique n'est pas universelle pour tous les composants. Une diode, une lampe dont la température change fortement ou un générateur réel peuvent demander d'autres modèles. Une résistance annoncée dans un exercice est un paramètre du modèle, pas une garantie de comportement sous toute tension. Aucun calcul de cette section ne valide une installation, une alimentation ou un assemblage réel.

4. Associations simples et frontières du modèle

Pour des résistances en série traversées par le même courant, les tensions s'additionnent et R_eq = R_1 + R_2. Pour des résistances en parallèle soumises à la même tension, les courants s'additionnent et 1/R_eq = 1/R_1 + 1/R_2. Les égalités viennent des lois de maille et des nœuds ; elles ne doivent pas être appliquées à deux éléments seulement parce qu'ils sont proches sur un dessin.

Deux résistances identiques de 2 kΩ donnent 4 kΩ en série et 1 kΩ en parallèle. Une résistance équivalente de branches parallèles positives est inférieure à la plus petite des résistances individuelles. Cette propriété offre un contrôle d'ordre de grandeur. En série, elle est au contraire supérieure à chacune. Une réponse inversant ces relations signale souvent une confusion de topologie.

Un générateur réel peut être décrit, dans une plage limitée, par une force électromotrice E et une résistance interne r : la tension fournie à une charge devient U = E − ri si le courant sort du générateur. Cette baisse de tension rappelle que les composants idéaux ont des limites. Le modèle ne doit pas servir à estimer sans données un court-circuit ou une situation dangereuse ; les protections, les régimes transitoires et les caractéristiques réelles sont absents.

5. Condensateur idéal et capacité

Un condensateur idéal comporte deux armatures portant des charges opposées dans le modèle simple. Si q désigne la charge de l'armature A et u = V_A − V_B, on écrit q = Cu avec C constante, en farads. Un farad vaut un coulomb par volt. Le signe de q est lié à celui de u ; une capacité positive ne signifie pas que la charge reste toujours positive.

Dans la convention récepteur où le courant entre sur l'armature A, i = dq/dt = Cdu/dt. Le condensateur peut ainsi recevoir un courant lorsque sa tension varie, même si aucune charge ne traverse le diélectrique idéal entre les armatures. Dire qu'il « bloque le courant » sans préciser le régime est trompeur : en régime permanent de tension constante, le courant idéal est nul ; pendant un transitoire, il peut être non nul.

Une capacité de 100 µF soumise à 5,0 V correspond à une charge de 500 µC, soit 0,00050 C, sur l'armature positive. Si la tension monte linéairement de 0 à 5 V en 0,50 s, le courant de ce modèle est C×10 V/s = 1,0 mA. Une autre forme de montée produirait un autre courant. La capacité relie charge et tension ; elle ne fixe pas toute seule la durée d'une évolution.

6. Énergie stockée et associations de condensateurs

Lorsqu'une charge élémentaire dq est transférée dans le condensateur, l'énergie reçue vaut u dq. Avec u = q/C, l'intégration de zéro à q donne E_capa = q²/(2C) = Cu²/2. Le facteur 1/2 vient du fait que la tension augmente durant le transfert ; multiplier simplement la tension finale par toute la charge doublerait l'énergie stockée.

Pour C = 100 µF et u = 5,0 V, l'énergie vaut 0,00125 J, soit 1,25 mJ. Cette énergie est une grandeur distincte de la charge de 500 µC. Deux condensateurs de capacités différentes peuvent avoir la même tension et des énergies différentes. Une comparaison doit donc préciser quelle grandeur est commune.

En parallèle, les tensions sont identiques et les charges s'ajoutent : C_eq = C_1 + C_2. En série dans le modèle de deux condensateurs initialement neutres avec nœud intermédiaire isolé, les normes de charges sont identiques et 1/C_eq = 1/C_1 + 1/C_2. Pour 2 µF et 3

µF, les capacités équivalentes sont 5 µF en parallèle et 1,2 µF en série.

Sous 10 V au total en série, la charge vaut 12 µC. Les tensions sont alors 6 V sur le condensateur de 2 µF et 4 V sur celui de 3 µF. Leur somme retrouve 10 V. Une répartition égale de tension n'est pas automatique ; elle exige ici des capacités égales. Les conditions initiales et les charges préexistantes peuvent aussi modifier un problème plus général.

7. Charge d'un circuit RC : établir l'équation

Un générateur idéal de tension constante E alimente en série une résistance R et un condensateur C. On choisit i comme courant de charge entrant sur l'armature positive du condensateur. La loi de maille donne E = Ri + u_c, et i = Cdu_c/dt. On obtient RCdu_c/dt + u_c = E. Cette équation décrit le transitoire sous les hypothèses idéales annoncées.

En posant τ = RC, la solution avec u_c(0) = u_0 est u_c(t) = E + (u_0 − E)e^(−t/τ). La vérification se fait par dérivation et substitution. À t = 0, l'expression redonne u_0 ; à long terme, elle tend vers E. Une condition initiale nulle donne u_c = E[1 − e^(−t/τ)] et i = (E/R)e^(−t/τ).

Le courant est initialement E/R dans ce modèle, puis décroît. La tension du condensateur évolue continûment lorsque le courant est fini, contrairement à la tension idéale imposée par le générateur au moment du changement de phase. Une commutation ne permet donc pas de réinitialiser arbitrairement u_c à zéro. Si une charge précédente subsiste, elle devient la nouvelle condition initiale.

8. Constante de temps et précision d'un seuil

Le produit RC possède la dimension d'un temps : Ω×F = s. Avec R = 10 kΩ et C = 100 µF, τ = 1,0 s. Pour E = 5,0 V et u_0 = 0, au bout d'une constante de temps, la tension vaut 5(1 − e^−1) ≈ 3,16 V, soit environ 63,2 % de sa valeur finale. À trois constantes de temps, elle atteint environ 95,0 %, et à cinq environ 99,3 %.

La valeur finale n'est jamais atteinte exactement en un temps fini dans cette solution idéale. L'expression « charge terminée » signifie donc qu'un critère de précision a été choisi. Pour atteindre au moins 99 % de E, on résout 1 − e^(−t/τ) ≥ 0,99, d'où t ≥ −τ ln(0,01) ≈ 4,605τ. Ce seuil est plus précis qu'une affirmation absolue « après cinq τ, c'est exactement fini ».

Un graphe permet aussi d'estimer τ. À l'origine, la tangente à la courbe de charge d'un condensateur initialement neutre a une pente E/τ et rencontre le niveau E à t = τ. Cette construction suppose une échelle correctement calibrée et un modèle pertinent. Une estimation graphique possède une incertitude ; elle n'est pas égale à un paramètre exact simplement parce qu'une droite a été tracée.

9. Décharge et changement de convention

Un condensateur initialement à U_0 est ensuite relié à une résistance sans générateur idéal. Sa tension vérifie RCdu_c/dt + u_c = 0, donc u_c(t) = U_0e^(−t/τ). Si l'on définit i_d comme courant quittant l'armature positive à travers la résistance, i_d = u_c/R = −Cdu_c/dt. Le signe moins vient de la diminution de la charge sur cette armature.

Si l'on conservait le courant défini entrant dans l'armature, il serait négatif durant cette décharge pour U_0 > 0. Les deux descriptions sont cohérentes ; changer de convention sans le dire crée

seulement une contradiction apparente. Le schéma ou la phrase de définition du courant doivent donc accompagner l'équation.

L'énergie du condensateur varie comme e^(−2t/τ), puisque son énergie est proportionnelle à u_c². Elle ne diminue pas selon la même exponentielle que la tension. À t = τ, la tension vaut environ 36,8 % de sa valeur initiale, mais l'énergie environ 13,5 %. Cette différence est un bon exercice de lecture des grandeurs : une loi temporelle ne se transmet pas sans transformation à toutes les quantités liées.

10. Un bilan d'énergie de la charge

Pour la charge idéale de zéro à E à travers R, le générateur transfère au total une charge CE. L'énergie qu'il fournit vaut donc CE² puisque sa tension reste E. Le condensateur stocke CE²/2 ; l'autre moitié est dissipée dans la résistance dans ce modèle. Le résultat peut surprendre, car augmenter ou diminuer R change la durée et le courant, mais pas cette répartition totale dans le modèle idéal.

Il ne faut pas prolonger ce résultat sans examen vers R = 0. Le modèle prévoit alors un transitoire de durée nulle et un courant non borné, ce qui signale des hypothèses physiques insuffisantes. Les résistances, inductances, limites du générateur et effets de rayonnement réels deviennent pertinents. Une limite mathématique peut révéler le domaine d'un modèle plutôt que décrire un dispositif possible.

La comparaison avec une batterie rappelle encore la distinction entre énergie et capacité. Une capacité de batterie exprimée en Ah est une quantité de charge ; une estimation en Wh utilise aussi une tension. Par exemple, 2 Ah à une tension nominale de 3,7 V correspondent à 7,4 Wh dans une estimation nominale. La tension

variant pendant l'usage, cette multiplication ne garantit ni l'énergie effectivement disponible ni l'autonomie d'un appareil.

11. Exercices corrigés

A - Unités. R = 2,0 kΩ et C = 250 µF. **Correction :** τ = 2 000×250×10^−6 = 0,50 s. La multiplication des valeurs 2 et 250 sans les préfixes ne donne pas un temps en secondes.

B - Condition initiale. Un circuit de charge a E = 6 V, τ = 2 s et u_c(0) = 2 V. **Correction :** u_c(t) = 6 − 4e^(−t/2). À t = 0, la tension vaut 2 ; à long terme, 6. Employer 6[1 − e^(−t/2)] oublierait la charge initiale.

C - Seuil de décharge. Quand u_c devient-elle au plus un dixième de U_0 ? **Correction :** e^(−t/τ) ≤ 0,10, donc t ≥ τ ln(10) ≈ 2,303τ. Ce calcul est un critère théorique relatif, pas une consigne de vérification de sécurité électrique.

D - Énergie relative. Lorsque la tension a été divisée par trois, que devient l'énergie ? **Correction :** elle est divisée par neuf, puisque E_capa = Cu²/2 pour C constante. Une division par trois correspondrait à une relation linéaire qui n'est pas celle de l'énergie.

E - Modèle permanent. Un condensateur idéal est soumis depuis longtemps à une tension constante. **Correction :** du_c/dt = 0, donc son courant idéal est nul. Sa charge et son énergie peuvent rester non nulles. L'absence de courant ne signifie pas absence de toute grandeur électrique stockée.

Complément - Géométrie d'une capacité et principe d'un capteur

Pour deux armatures planes parallèles séparées par un isolant homogène, le modèle sans effets de bord donne $C = \varepsilon S/d$. La surface S est celle des faces en regard, d leur séparation et ε la permittivité du milieu, exprimée en F/m. Dans le vide, $\varepsilon = \varepsilon_0$; pour un diélectrique linéaire idéal, on écrit $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$. Cette relation suppose notamment que les dimensions latérales soient grandes devant d. Elle ne décrit pas exactement un composant de forme quelconque ou un milieu dont les propriétés varient fortement.

À matériau et distance fixés, doubler S double C. À matériau et surface fixés, doubler d divise C par deux. Une déformation qui modifie d peut donc être repérée par une variation de capacité : c'est le principe d'un modèle de capteur capacitif. La capacité n'est pas directement une pression, une position ou une humidité ; il faut une relation de conversion et un étalonnage adaptés au dispositif. Les calculs sur papier ne prouvent pas la précision d'un capteur réel.

Exercice original. Dans un modèle fictif à air assimilé au vide, $S = 20\ \text{cm}^2$, $d = 1{,}0\ \text{mm}$ et $\varepsilon_0 = 8{,}85 \times 10^{-12}\ \text{F/m}$. Calculer C, puis sa variation si d augmente de 10 %, les autres paramètres restant constants. Enfin, déterminer l'effet sur la constante de temps si ce condensateur est associé à $R = 10\ \text{M}\Omega$ dans le circuit RC idéal étudié.

Correction. La conversion donne $S = 20 \times 10^{-4}\ \text{m}^2 = 2{,}0 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$ et $d = 1{,}0 \times 10^{-3}\ \text{m}$. Ainsi $C = 8{,}85 \times 10^{-12} \times 2{,}0 = 1{,}77 \times 10^{-11}\ \text{F}$, soit 17,7 pF. Une hausse de 10 % de d donne $C' = C/1{,}10$, soit environ 16,1 pF : la diminution relative est 9,09 %, et non exactement 10 %. Le rapport inverse doit être calculé avant d'arrondir. La constante de temps initiale vaut $RC = 1{,}77 \times 10^{-4}\ \text{s}$,

soit 177 µs ; elle est également divisée par 1,10 lorsque la capacité change.

Pour un petit écart seulement, $\Delta C/C \approx -\Delta d/d$ à surface et permittivité constantes. Cette approximation du premier ordre est utile pour lire une sensibilité, mais elle n'est pas l'égalité exacte utilisée dans l'exercice. Si ε varie en même temps que d, une seule mesure de C peut correspondre à plusieurs causes. Distinguer variation détectée et cause identifiée évite d'attribuer trop vite une propriété unique à un signal.

Références de la relation et du principe, consultées le 11 octobre 2026 : Université de Lille, théorie des condensateurs plans, https://tpmpathome.univ-lille.fr/capacites_condensateurs/version_papier/_papier.pdf ; sujet officiel Éduscol présentant un modèle de capteur capacitif, https://eduscol.education.gouv.fr/sites/default/files/document/22-pycj1nc1pdf-97374.pdf. Le présent exercice et ses nombres sont originaux ; aucune manipulation haute tension ni reproduction de sujet d'examen n'est proposée.

12. Révision et références

Reconstruisez l'équation différentielle d'un RC à partir de la maille et de $i = Cdu/dt$. Vérifiez sa solution par substitution, puis expliquez les conditions initiales, la limite et un seuil choisi. Révisez les unités et les conventions de signe avant de mémoriser des expressions. Le même raisonnement sert ensuite à d'autres systèmes dont l'évolution est exponentielle.

Cadre scolaire : programme publié de Terminale, partie physique, https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm et annexe https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf. Unités : BIPM, https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/, consultés le 11 octobre 2026. Le chapitre, les bilans et les exercices sont originaux LFDP. Aucun montage secteur, manipulation de batterie ou procédure de sécurité électrique n'est enseigné par ces exemples ; la théorie ne valide pas une installation.

Chapitre 8 - Thermodynamique : distinguer un état et les transferts qui le modifient

Repère historique - 1859 : comparer l'absorption du rayonnement par des gaz

À la Royal Institution, John Tyndall a commencé en 1859 à assembler un dispositif pour étudier l'absorption et la transmission du rayonnement thermique par différents gaz. L'institution conserve un tube de cet ensemble et relie ces recherches au rôle de la vapeur d'eau dans l'effet de serre naturel. Ce repère n'attribue pas à un seul savant toutes les étapes de la science du climat. Il illustre une démarche pertinente pour le chapitre : distinguer les propriétés radiatives des milieux avant de fermer un bilan énergétique. Un gaz ne doit pas être supposé également transparent à toutes les longueurs d'onde.

Référence du fait historique, consultée le 11 octobre 2026 : Royal Institution, notice de l'appareil de Tyndall, https://www.rigb.org/explore-science/explore/collection/john-tyndalls-radiant-heat-apparatus. Analyse pédagogique LFDP, sans citation verbatim ni image reproduite.

1. Choisir le système et les échanges

La thermodynamique décrit des systèmes comportant de très nombreuses particules à l'aide de grandeurs macroscopiques. Température, pression, volume et quantité de matière donnent accès à un état sans suivre chaque particule. Cette description ne remplace pas la structure microscopique ; elle fournit un autre niveau de modèle adapté aux bilans et aux transformations.

Un système fermé n'échange pas de matière avec l'extérieur mais peut échanger de l'énergie. Un système ouvert échange de la

matière ; les flux correspondants demandent un bilan plus complet. Un système isolé n'échange ni matière ni énergie dans le modèle. Un système adiabatique n'échange pas d'énergie par transfert thermique, mais peut recevoir ou fournir du travail. Ces termes ne sont pas synonymes : une compression adiabatique peut modifier la température.

Avant toute équation, dessinez la frontière et nommez ce qui peut la traverser. Un liquide seul chauffé par une résistance reçoit un transfert provenant de cette résistance. Un ensemble liquide et résistance peut recevoir de l'énergie sous forme de travail électrique. Le résultat global doit rester cohérent, mais les termes du bilan dépendent de la frontière choisie. Une formule de conservation sans système défini demeure ambiguë.

2. Température et énergie interne

La température thermodynamique s'exprime en kelvins. La relation avec les degrés Celsius est $T(K) = \theta(°C) + 273{,}15$. Une différence de température a la même valeur numérique en kelvins et en degrés Celsius, mais un rapport de températures thermodynamiques exige des kelvins. Dire que 40 °C est « deux fois plus chaud » que 20 °C n'a donc pas de sens comme rapport thermodynamique.

L'énergie interne U décrit des contributions microscopiques, notamment l'agitation et les interactions entre constituants. Elle se distingue de l'énergie cinétique du mouvement d'ensemble et de l'énergie potentielle liée à la position globale. Un objet immobile peut avoir une énergie interne importante. Une vitesse macroscopique n'est pas la mesure de toute l'agitation moléculaire.

La température n'est pas une quantité d'énergie. Deux systèmes à la même température peuvent présenter des masses, capacités

thermiques et énergies internes différentes. Le transfert thermique n'est pas non plus une substance stockée appelée « chaleur » : c'est une manière de transférer de l'énergie. Dans une rédaction, dites qu'un système reçoit une énergie par transfert thermique et que son énergie interne varie, plutôt qu'il « contient un transfert ».

3. Gaz parfait : une équation d'état conditionnelle

Le modèle du gaz parfait relie pression absolue p, volume V, quantité de matière n et température T par pV = nRT. La constante R peut être prise égale à 8,314 J/(mol·K) pour les exercices. Le volume doit être exprimé en m³ si la pression est en pascals. La pression relative à l'atmosphère et la température Celsius ne peuvent pas être insérées directement dans cette relation.

Pour n = 0,10 mol, T = 300 K et V = 0,0020 m³, la pression calculée est 0,10×8,314×300/0,0020 ≈ 1,25×10^5 Pa. La cohérence des unités vient de Pa·m³ = J. Si V double à n et T constants, la pression est divisée par deux. Si T double à n et V constants, la pression double, mais il s'agit d'un doublement en kelvins.

Le modèle néglige notamment certains effets des interactions et du volume propre des particules. Il devient moins adapté dans des conditions où ces effets sont importants, par exemple près d'une condensation. Il ne faut pas supposer qu'un gaz réel obéit exactement à cette loi pour toute pression et toute température. Référence officielle complémentaire : NASA Glenn, équation d'état, https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/equation-of-state/, consultée le 11 octobre 2026.

4. Premier principe et convention de signes

Pour un système fermé, un bilan général peut s'écrire $\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = W + Q$, où W et Q sont les énergies reçues respectivement par travail et transfert thermique. Si les variations mécaniques globales sont négligeables, on écrit $\Delta U = W + Q$. Une énergie reçue est positive dans cette convention ; une énergie fournie à l'extérieur est négative. D'autres conventions existent, mais il faut les annoncer et les conserver.

Le travail et le transfert thermique dépendent du chemin de transformation, tandis que la variation d'énergie interne dépend des états initial et final. Deux transformations entre les mêmes états peuvent comporter des travaux et transferts thermiques différents, dont la somme donne la même ΔU. Cette distinction entre grandeur d'état et transfert est au cœur du bilan ; ce n'est pas une subtilité de vocabulaire.

Pour une expansion contre une pression extérieure constante, le travail reçu par le système est $W = -p_{ext}(V_f - V_i)$, dans le modèle mécanique annoncé. Si le volume passe de 2,0 à 4,0 litres sous 100 000 Pa, $W = -200$ J. Si le système reçoit simultanément $Q = 500$ J, sa variation d'énergie interne est +300 J. Le signe négatif du travail signifie que le système fournit une énergie mécanique à l'extérieur durant l'expansion.

5. Capacité thermique et variation de température

Pour un système incompressible de masse m dont la capacité thermique massique c est supposée constante sur la plage étudiée, une variation d'énergie interne sans changement d'état peut s'écrire $\Delta U = mc\Delta T$. La capacité thermique totale $C = mc$ s'exprime en J/K ; c en J/(kg·K). Le symbole C est distinct ici de la capacité électrique du chapitre précédent, même si la lettre est identique. L'unité indique immédiatement quelle grandeur est utilisée.

Si le seul échange pertinent est thermique, $Q = mc\Delta T$. Si un travail électrique ou mécanique est aussi reçu, il faut l'inclure. Un objet fictif de masse 0,20 kg, avec c = 1 000 J/(kg·K), reçoit 4 000 J sans pertes ni changement d'état. Sa température augmente de $4\,000/(0{,}20\times1\,000) = 20$ K, soit une augmentation de 20 °C. Une masse deux fois plus grande demanderait deux fois plus d'énergie pour la même augmentation dans ce modèle.

La capacité peut varier avec la température. La formule à c constant est alors une approximation ; un calcul plus précis peut intégrer une capacité dépendant de T. Il faut également considérer le récipient, les pertes et les échanges avec l'air. Une estimation idéale n'est pas un temps de chauffage garanti d'un équipement réel.

6. Mélange et changement d'état

Deux masses d'une même substance sans changement d'état, avec la même capacité thermique massique constante, peuvent être étudiées par un bilan isolé. Si le récipient et les pertes sont négligés, $m_1c(T_f - T_1) + m_2c(T_f - T_2) = 0$. La température finale est donc une moyenne pondérée par les masses. Elle est comprise entre les températures initiales pour des masses positives.

Dans un exercice, 0,20 kg à 60 °C et 0,30 kg à 20 °C donnent T_f = (0,20×60 + 0,30×20)/0,50 = 36 °C. La moyenne simple 40 °C serait incorrecte parce que les masses diffèrent. On peut employer les Celsius pour ce calcul de différences et de moyenne pondérée, puisque le décalage commun de 273,15 se conserve ; cela ne justifie pas leur emploi dans un rapport de températures ou dans pV = nRT.

Lors d'un changement d'état à une pression donnée, une énergie peut être reçue sans variation de température durant la coexistence des phases. Une relation Q = mL utilise une énergie massique de changement d'état L. Pour une substance fictive avec L = 2,0×10^5 J/kg, transformer 0,10 kg demande 20 000 J dans le modèle. La formule mcΔT ne décrit pas cette phase, car l'énergie interne change autrement que par une simple variation de température.

7. Trois modes de transfert thermique

La conduction transfère de l'énergie dans un milieu sans mouvement macroscopique global de matière nécessaire. La convection associe des échanges au mouvement d'un fluide. Le rayonnement correspond à un transfert par ondes électromagnétiques et peut se produire à travers le vide. Dans une situation réelle, plusieurs modes coexistent ; les séparer dans un modèle permet d'examiner leurs contributions.

Pour une paroi plane homogène de surface A, d'épaisseur e et de conductivité thermique λ, un modèle stationnaire unidimensionnel donne une puissance thermique de norme P = λA|ΔT|/e. On définit une résistance thermique R_th = e/(λA), en K/W. Ainsi P = |ΔT|/R_th. L'énergie passe spontanément du côté le plus chaud vers le plus froid dans ce cas sans autre mécanisme imposé.

Avec e = 0,10 m, λ = 0,050 W/(m·K), A = 2,0 m², R_th = 1,0 K/W. Pour un écart de 20 K, la puissance vaut 20 W. Doubler l'épaisseur divise cette puissance par deux dans le modèle. Les contacts, ponts thermiques, variations de température et échanges de surface peuvent modifier une paroi réelle. Une formule simple ne permet pas d'attester la performance complète d'un bâtiment.

8. Rayonnement et températures absolues

Un modèle de corps gris peut donner une puissance rayonnée P = εσAT^4, où ε est une émissivité entre zéro et un dans ce modèle, σ la constante de Stefan-Boltzmann et T la température absolue. Pour un échange avec un environnement idéal décrit à T_env, une forme simplifiée de la puissance nette est εσA(T^4 − T_env^4), avec les hypothèses géométriques et radiatives appropriées. La puissance quatre exige des kelvins, jamais des degrés Celsius.

Avec ε = 0,80, A = 0,10 m², T = 400 K, T_env = 300 K et σ ≈ 5,67×10^−8 W/(m²·K^4), la puissance nette illustrative vaut environ 79,4 W. Le calcul ne signifie pas que toute surface réelle à cette température possède la même émissivité ni les mêmes échanges. Le milieu, les autres surfaces et le spectre peuvent demander une description plus détaillée.

Les valeurs de constantes physiques sont vérifiables auprès du NIST : https://physics.nist.gov/cuu/Constants/Table/allascii.txt, table consultée le 11 octobre 2026. Les valeurs arrondies ci-dessus servent les exercices. Le modèle radiatif rappelle pourquoi une petite augmentation relative de température peut changer sensiblement la puissance, sans fournir à elle seule une prévision de température dans un système complet.

9. Refroidissement au contact d'un thermostat

Un modèle phénoménologique de Newton peut écrire la puissance reçue P = −hA(T − T_ext), avec hA supposé constant et un environnement à température T_ext constante. Pour un système de capacité thermique totale C, C dT/dt = −hA(T − T_ext). La solution est T(t) = T_ext + (T_0 − T_ext)e^(−t/τ), avec τ = C/(hA). L'écart de température, et non la température absolue elle-même, décroît exponentiellement.

Pour un objet fictif initialement à 80 °C dans un environnement à 20 °C, avec τ = 10 min, la température après une constante de temps vaut 20 + 60/e ≈ 42,1 °C. Pour atteindre au plus 30 °C, il faut 60e^(−t/τ) ≤ 10, donc t ≥ τ ln(6) ≈ 17,9 min. Ces chiffres décrivent une courbe idéale, pas une consigne de manipulation ou de contact avec un objet chaud.

L'équation ressemble à celle du circuit RC. La comparaison porte sur la structure mathématique : une différence à un état final se réduit avec un temps caractéristique. Elle ne rend pas les mécanismes identiques. Le refroidissement peut comporter rayonnement, évaporation ou variation de h, et le thermostat peut ne pas rester constant. Un ajustement exponentiel doit être discuté à la lumière des observations et des hypothèses.

10. Conservation et sens des transformations

Le premier principe impose un bilan d'énergie mais ne dit pas à lui seul quelles transformations se produisent spontanément. Deux objets isolés n'échangent pas spontanément une énergie thermique de manière à rendre le plus chaud encore plus chaud et le plus froid encore plus froid dans le cas usuel étudié. La direction des évolutions demande une information supplémentaire, développée par le second principe et l'entropie. Ce complément est mentionné pour éviter de demander au premier principe une conclusion qu'il ne fournit pas.

Une pompe à chaleur peut transférer de l'énergie depuis un milieu plus froid vers un milieu plus chaud en recevant du travail. Si elle fournit 600 J au côté chaud et reçoit 200 J de travail, elle peut prélever 400 J au côté froid dans un bilan idéal. Le rapport 600/200 = 3 n'est pas un rendement de création d'énergie : il compare la chaleur utile fournie au travail payé, tandis que l'autre apport vient du milieu froid.

Le coefficient de performance peut ainsi être supérieur à un sans contredire la conservation. Il doit être distingué d'un rendement défini comme énergie utile sur toute l'énergie reçue. Les conditions de température et les caractéristiques réelles fixent d'autres limites. Aucune performance d'appareil n'est attestée par cet exemple fictif.

11. Un bilan radiatif simplifié et ses limites

Pour une sphère recevant un flux solaire S, la surface interceptant le rayonnement est πR^2, tandis que sa surface totale est $4\pi R^2$. Avec un albédo a, la puissance absorbée idéale est $(1 - a)S\pi R^2$. Si elle rayonne comme un corps noir uniforme, l'équilibre donne $4\pi R^2\sigma T^4 = (1 - a)S\pi R^2$, soit $T = [(1 - a)S/(4\sigma)]^{1/4}$.

Avec des paramètres illustratifs S = 1 360 W/m² et a = 0,30, on trouve environ 255 K. Le rayon s'élimine. Cette température correspond au modèle radiatif simplifié ; elle n'est pas automatiquement la température moyenne réelle du sol. Atmosphère, absorption et émission selon les longueurs d'onde, circulation, alternance jour-nuit et distribution des températures ne sont pas décrites. Une moyenne de T^4 n'est pas exactement la puissance quatre d'une moyenne de T.

Ce calcul sert à comprendre la structure d'un bilan et le rôle de l'albédo. Il ne constitue pas une prévision climatique. Un modèle plus riche doit préciser quels échanges et quelles couches sont inclus. Une valeur simplifiée peut être informative si l'on annonce ce qu'elle mesure ; elle devient trompeuse si on la présente comme une mesure directe de tout le système Terre-atmosphère.

Complément - Effet de serre et frontière du bilan radiatif

La surface terrestre réchauffée émet un rayonnement principalement infrarouge. Certains gaz atmosphériques, notamment la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone, absorbent et émettent dans des bandes de ce domaine. Une partie du rayonnement émis par l'atmosphère se dirige vers le sol. Ce transfert contribue à une température du sol supérieure à celle d'un modèle où le rayonnement partirait directement vers l'espace. L'atmosphère n'est donc pas une paroi qui interdirait toute sortie d'énergie : elle participe à des échanges radiatifs et à d'autres transferts.

Le bilan au sommet de l'atmosphère compare l'énergie solaire absorbée par l'ensemble Terre-atmosphère à son émission vers l'espace. Le bilan du sol inclut également le rayonnement atmosphérique reçu et les échanges par convection et évaporation. Mélanger ces deux frontières conduit à compter un transfert interne comme une nouvelle énergie venant de

l'extérieur. Une absorption suivie d'une émission n'est pas une création d'énergie. Ces distinctions expliquent pourquoi les 255 K du modèle précédent ne sont pas automatiquement la température moyenne du sol.

Approfondissement sur papier : supposons une surface noire et une couche atmosphérique idéale transparente au rayonnement solaire mais absorbant entièrement l'infrarouge du sol. Négligeons convection et évaporation ; notons F le flux solaire moyen effectivement absorbé par le sol. La couche émet σT_a^4 vers le haut et autant vers le bas. Son bilan impose σT_s^4 = 2σT_a^4. Le bilan du sol donne F + σT_a^4 = σT_s^4. On en déduit σT_a^4 = F et σT_s^4 = 2F. Le flux sortant vers l'espace reste F, égal au flux reçu ; le transfert descendant supplémentaire est interne au système.

Exercice original. Pour F = 240 W/m² et σ = 5,67 × 10⁻⁸ W·m⁻²·K⁻⁴, calculer les deux températures du modèle. Que devient le bilan si l'on remplace abusivement le flux sortant vers l'espace par σT_s^4 ? Correction : T_a = (F/σ)^(1/4) ≈ 255 K et T_s = (2F/σ)^(1/4) ≈ 303 K. Le rapport vaut 2^(1/4), environ 1,189. Utiliser σT_s^4 comme flux sortant donnerait 480 W/m² et oublierait que la couche absorbe ce rayonnement avant d'émettre vers l'espace. La différence apparente ne démontre pas une violation de conservation, mais une frontière mal définie.

Ce modèle à une couche est volontairement très simplifié : l'atmosphère réelle absorbe différemment selon les longueurs d'onde, comporte un profil de température et échange aussi de l'énergie par des mouvements et des changements d'état. Les valeurs calculées ne sont ni une mesure du climat actuel ni une projection. La démarche montre un mécanisme et une conservation ; elle ne quantifie pas à elle seule l'effet d'une concentration réelle de gaz ou d'un scénario futur.

Références qualitatives et de frontière, consultées le 11 octobre 2026 : NASA Science, bilan radiatif, https://science.nasa.gov/ems/13_radiationbudget/ ; bilan énergétique Terre-atmosphère, https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/climate-and-earths-energy-budget/. Le modèle gris à une couche, sa démonstration et l'exercice ci-dessus sont des développements pédagogiques LFDP originaux ; aucune figure ni série climatique de la NASA n'est reproduite.

12. Exercices corrigés et révision

A - Signe du travail. Un gaz est comprimé de 3 à 2 litres sous une pression extérieure constante de 100 000 Pa. **Correction :** W = −p_extΔV = +100 J. Si Q = −40 J, ΔU = +60 J. La compression fournit du travail au système malgré le transfert thermique sortant.

B - Température. Une température passe de 20 à 40 °C. **Correction :** elle passe de 293,15 à 313,15 K ; le rapport vaut environ 1,068, pas 2. La différence vaut 20 K et 20 °C. Différence et rapport sont des opérations distinctes.

C - Refroidissement. Dans le modèle exponentiel, quel temps faut-il pour diviser l'écart à l'environnement par deux ? **Correction :** e^(−t/τ) = 1/2 donne t = τ ln(2), environ 0,693τ. Ce temps concerne l'écart T − T_ext, pas une division par deux de toute température Celsius.

D - Changement d'état. Un transfert thermique est reçu sans variation de température. **Correction :** cela n'impose pas Q = 0. Un changement d'état peut absorber une énergie tandis que la température reste constante dans les conditions annoncées. Le modèle mcΔT est alors insuffisant.

Pour réviser, annoncez système, échanges, convention de signes et domaine du modèle. Distinguez énergie interne, température et transfert. Reconstituez un bilan puis une équation temporelle, et vérifiez les unités et la limite. Cadre officiel publié de Terminale : https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm, annexe https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf. Rédaction, calculs et exercices originaux LFDP, sans texte, figure

ou protocole dangereux reproduit.

Chapitre 9 - Ondes : propagation, fréquence, intensité et décalage Doppler

Repère historique - 1842 : la fréquence dépend aussi du mouvement relatif

L'Université de Vienne situe en 1842 la première description par Christian Doppler du phénomène qui porte aujourd'hui son nom. Ce repère historique permet de relier le vocabulaire du chapitre à une question physique : pourquoi une source périodique et le signal reçu ne sont-ils pas nécessairement décrits par la même fréquence ? La date d'une proposition ne valide pas tous ses usages ultérieurs. Dans un calcul actuel, il faut encore préciser le milieu, la direction du déplacement et la convention de signe ; pour la lumière, une formule acoustique ne devient pas applicable par simple changement du nom de l'onde.

Référence du fait historique, consultée le 11 octobre 2026 : Université de Vienne, histoire de la physique, première partie, https://physik.univie.ac.at/en/about-us/history/part-1/. Analyse pédagogique LFDP, sans citation verbatim ni image reproduite.

1. Une perturbation qui se propage

Une onde décrit la propagation d'une perturbation et peut transporter de l'énergie. Pour une onde mécanique, un milieu matériel est nécessaire. Le déplacement local des éléments du milieu ne doit pas être confondu avec la vitesse de propagation de la perturbation. Dans le modèle simple d'une corde, un point peut osciller verticalement pendant que la déformation se propage horizontalement. Il ne parcourt pas toute la corde avec l'onde.

Une onde est transversale lorsque la perturbation est perpendiculaire à la direction de propagation et longitudinale lorsque ces directions sont parallèles. Le son dans un gaz est décrit

par des variations de pression et des déplacements locaux longitudinaux. Les ondes électromagnétiques n'exigent pas un milieu matériel pour se propager dans le vide. Ces catégories indiquent des mécanismes ; elles ne disent pas que toutes les ondes se comportent de manière identique.

Le modèle élémentaire ne suppose pas un transport global de matière identique à celui de l'énergie. Des phénomènes plus complexes peuvent associer un déplacement net ou un écoulement ; la phrase « aucune onde ne transporte jamais de matière » serait trop absolue. Pour le niveau traité, on distingue simplement déplacement local, transport de perturbation et éventuel mouvement global du milieu.

2. Retard et célérité

Si une perturbation se propage sans déformation à une célérité constante c, deux points séparés d'une distance d dans la direction de propagation observent le même signal avec un retard $\tau = d/c$. La célérité a l'unité m/s ; le retard est une durée positive. Un signal mesuré au second point peut être décrit par $s_2(t) = s_1(t - \tau)$, si les conventions de date et le sens de propagation sont cohérents.

Pour d = 1,70 m et c = 340 m/s dans un exercice acoustique, le retard vaut 0,0050 s, soit 5,0 ms. Il s'agit d'un trajet simple. Pour un écho reçu au point d'émission après réflexion sur un obstacle à distance d, le trajet idéal est 2d et le retard vaut 2d/c. Confondre ces deux géométries divise ou multiplie la distance calculée par deux.

La célérité dépend du milieu et de ses conditions ; elle n'est pas généralement la vitesse de la source. Une personne avançant en parlant ne pousse pas toutes les ondes sonores à sa propre vitesse. Le mouvement de la source modifie les intervalles entre

fronts reçus, ce qui conduit au Doppler, mais la propagation dans le milieu reste décrite par la célérité appropriée.

3. Période, fréquence et longueur d'onde

Pour une onde périodique, la période T est la durée séparant deux états identiques successifs en un point. La fréquence f = 1/T indique le nombre de cycles par seconde et s'exprime en hertz. La longueur d'onde λ est la distance entre deux points correspondant au même état de phase à une date, pour une propagation périodique simple. On a λ = cT = c/f dans ce modèle.

Un signal de fréquence 1 000 Hz se propageant à 340 m/s a une longueur d'onde de 0,340 m et une période de 1,00 ms. Une fréquence deux fois plus élevée, dans le même milieu non dispersif, donne une longueur d'onde deux fois plus petite. La période est une durée ; la longueur d'onde une distance. Les deux graphiques, en fonction du temps et de la position, doivent donc être lus avec des axes différents.

À une interface stationnaire entre deux milieux, la fréquence imposée par la source reste généralement la même dans le modèle de transmission étudié, mais la célérité et la longueur d'onde peuvent changer. Une célérité plus élevée dans le second milieu donne une plus grande longueur d'onde pour cette fréquence. Une réflexion et une transmission peuvent coexister ; une seule longueur d'onde ne décrit pas tout le champ si plusieurs ondes sont présentes.

4. Écrire une onde sinusoïdale et interpréter la phase

Une onde progressive se propageant vers les x positifs peut s'écrire $s(x,t) = A\cos(\omega t - kx + \varphi)$, avec $\omega = 2\pi f$ et $k = 2\pi/\lambda$. L'amplitude A porte l'unité de la grandeur perturbée ; la phase est sans dimension. Le rapport ω/k donne la célérité de phase dans ce modèle. Changer le signe devant kx change le sens de propagation, à conventions conservées.

À position fixe, on observe une oscillation temporelle. À date fixe, on observe un profil spatial. Deux points séparés de λ ont la même phase ; deux points séparés de λ/2 ont des phases opposées pour une sinusoïde. Cette relation ne signifie pas que les éléments matériels soient séparés par une longueur constante de leur propre mouvement ; elle décrit l'organisation du signal.

Si l'on impose une phase constante et que le temps augmente de Δt, la position augmente de $(\omega/k)\Delta t$. On retrouve ainsi le sens et la célérité sans mémoriser un signe isolé. Cette vérification est utile lorsqu'une convention différente écrit $\cos(kx - \omega t)$. Le cosinus étant pair, les formes peuvent être équivalentes avec une phase adaptée ; il faut examiner l'expression entière.

5. Intensité et répartition de puissance

L'intensité moyenne d'une onde peut être définie comme la puissance transportée par unité de surface, en W/m². Pour une source ponctuelle isotrope idéale dans un milieu sans absorption, la puissance P se répartit sur une sphère de surface $4\pi r^2$. L'intensité à distance r vaut donc $P/(4\pi r^2)$. Elle diminue lorsque la surface de répartition augmente, sans que la puissance totale ait été dissipée dans ce modèle.

Si la distance est doublée, l'intensité est divisée par quatre. À partir d'une intensité fictive de 10^−6 W/m² à 2 m, on obtient 2,5×10^−7 W/m² à 4 m dans les mêmes conditions. Cette loi

géométrique ne doit pas être appliquée sans examen près d'une source étendue, dans une salle réverbérante ou dans un milieu absorbant. La directivité peut aussi concentrer la puissance dans certaines directions.

L'absorption constitue un autre mécanisme : une partie de l'énergie de l'onde est transférée au milieu. Une loi d'atténuation peut alors comporter un facteur supplémentaire, dépendant de la distance et de la fréquence. Il faut distinguer répartition géométrique et dissipation. Les deux diminuent l'intensité mesurée, mais ne décrivent pas les mêmes transferts.

6. Niveau logarithmique et addition de sources

Un niveau d'intensité sonore est défini par L = 10log_10(I/I_0), en décibels, avec la référence conventionnelle I_0 = 10^−12 W/m² dans les exercices usuels. Le rapport est sans dimension. Pour I = 10^−6 W/m², le rapport vaut 10^6 et L = 60 dB. Le niveau ne s'ajoute pas comme une intensité et sa valeur ne suffit pas, seule, à décrire une exposition ou une protection réelle.

Doubler l'intensité ajoute 10log_10(2) ≈ 3,01 dB. La multiplier par dix ajoute 10 dB. Dans le modèle sphérique sans absorption, doubler la distance enlève 10log_10(4) ≈ 6,02 dB. Ces différences sont indépendantes du niveau initial tant que les hypothèses et la même référence sont conservées.

Pour des sources indépendantes dont les intensités peuvent être additionnées, quatre sources identiques donnent quatre fois l'intensité et environ 6,02 dB de plus qu'une seule. Additionner leurs quatre niveaux serait incorrect. Pour des ondes cohérentes, les amplitudes et phases interviennent dans des interférences ; la simple addition des intensités n'est plus la description générale. Le chapitre suivant précisera cette condition.

La relation entre amplitude et intensité dépend de la grandeur et du milieu. Pour une onde linéaire dans un même milieu, l'intensité peut être proportionnelle au carré d'une amplitude de pression ou de déplacement. Doubler cette amplitude multiplie alors l'intensité par quatre, non par deux. Les niveaux ne constituent aucune consigne universelle de sécurité auditive ; durée, spectre et conditions d'exposition restent nécessaires.

7. Doppler avec une source mobile

Le décalage Doppler correspond à une différence entre fréquence émise et fréquence reçue liée au mouvement relatif dans la géométrie étudiée. Pour une source sonore se rapprochant d'un observateur immobile dans le milieu, les fronts successifs sont plus rapprochés. Dans un modèle rectiligne subsonique, f_reçue = f_émise c/(c − v_s), avec v_s positive vers l'observateur et inférieure à c.

On peut retrouver la formule. Pendant une période T_émise, le premier front avance de cT_émise tandis que la source avance de v_sT_émise. La distance entre deux fronts devant elle vaut (c − v_s)T_émise. L'observateur fixe reçoit ces fronts à la célérité c ; la fréquence est c divisée par cette longueur d'onde. La formule résulte de la géométrie et de la période, pas d'un changement arbitraire de la fréquence propre de la source.

Avec f_émise = 440 Hz, c = 340 m/s et v_s = 20 m/s, la fréquence reçue au rapprochement vaut 467,5 Hz. À l'éloignement, la longueur d'onde augmente et la formule devient 440×340/(340 + 20), soit environ 415,6 Hz. Les écarts ne sont pas exactement symétriques autour de 440, car la vitesse de la source apparaît au dénominateur.

8. Observateur mobile et ondes électromagnétiques

Pour une source immobile et un observateur se rapprochant à vitesse v_o dans le milieu, l'observateur rencontre les fronts à une vitesse c + v_o. La fréquence reçue vaut f_émise(c + v_o)/c dans la géométrie rectiligne simple. Le mouvement de la source et celui de l'observateur ne se traduisent donc pas par des formules identiques pour une onde sonore, car le milieu fournit un cadre de propagation.

Si source et observateur se rapprochent dans la convention annoncée, on peut combiner les facteurs : f_reçue = f_émise(c + v_o)/(c − v_s). Une vitesse non alignée sur la ligne de visée demande les composantes pertinentes et une géométrie précise. Insérer toute la norme d'une vitesse dans une formule radiale sans examen peut surestimer un décalage.

Pour la lumière dans le vide, les relations complètes relèvent d'une description relativiste, différente du modèle acoustique avec milieu. À faible vitesse radiale devant c, une approximation donne un décalage relatif de longueur d'onde Δλ/λ ≈ v_r/c pour un éloignement, avec v_r positive en récession. Le signe et le domaine de l'approximation doivent être conservés. Cette relation ne prétend pas couvrir les vitesses élevées ou tous les phénomènes de décalage spectral.

9. Superposition et ondes stationnaires

Dans un modèle linéaire, deux perturbations peuvent se superposer en additionnant leurs valeurs. Deux ondes de même fréquence et amplitude se propageant en sens opposés peuvent produire une onde stationnaire. Des points restent des nœuds, avec amplitude nulle, tandis que d'autres sont des ventres d'amplitude maximale. L'onde stationnaire n'est pas une onde progressive unique qui avancerait tout entière dans une direction.

Pour une corde idéale fixée aux deux extrémités de longueur L, les conditions imposent des nœuds aux bornes. Les longueurs d'onde autorisées sont $\lambda_n = 2L/n$ et les fréquences $f_n = nc/(2L)$, pour les entiers $n \geq 1$. Ces relations dépendent des conditions aux limites ; un système dont une extrémité est libre a d'autres modes. Le mot « harmonique » ne dispense donc pas de définir le système.

Avec L = 0,50 m et c = 100 m/s dans un exercice, la fondamentale vaut 100 Hz et le troisième mode 300 Hz. Pour ce mode, trois demi-longueurs d'onde occupent la corde. Le nombre du mode, le nombre de nœuds et le nombre de ventres doivent être distingués. Les extrémités sont des nœuds ; le troisième mode comporte deux nœuds intérieurs et trois ventres.

10. Signal composé, battements et numérisation

Un signal pur est sinusoïdal dans le modèle. Un signal composé peut contenir plusieurs fréquences. La somme $A\cos(2\pi\times400t) + 0{,}5A\cos(2\pi\times800t)$ est périodique, mais n'est pas une sinusoïde unique. Le spectre décrit les composantes et leurs amplitudes. L'allure du signal et sa période fondamentale ne donnent pas à elles seules toutes les informations du spectre.

Deux sinusoïdes de fréquences proches, par exemple 440 et 442 Hz, peuvent produire des battements. L'identité de somme de cosinus révèle une oscillation rapide modulée par une enveloppe. La fréquence des battements d'amplitude observés est ici la différence absolue, 2 Hz. Ce phénomène ne signifie pas qu'une nouvelle source matérielle oscillant à 2 Hz a été ajoutée ; il vient de la superposition et de l'évolution de phase relative.

Pour numériser un signal limité à une fréquence maximale f_{max}, une fréquence d'échantillonnage supérieure à $2f_{max}$ est une condition fondamentale de reconstruction idéale, avec les hypothèses de bande limitée et de traitement adaptées. Si une

composante dépasse cette plage, un repliement peut la faire apparaître à une autre fréquence. Par exemple, des cosinus à 700 et 300 Hz produisent les mêmes valeurs aux instants multiples de 1/1 000 s. Les données échantillonnées seules ne permettent alors pas de les distinguer sans information supplémentaire.

11. Exercices corrigés

A - Écho. Un écho est reçu après 0,20 s dans un modèle avec c = 340 m/s. **Correction :** le trajet aller-retour vaut 68 m ; l'obstacle est à 34 m. L'écho ne correspond pas à un trajet simple de 68 m vers l'obstacle.

B - Longueur d'onde. Une onde a T = 0,020 s et c = 3,0 m/s. **Correction :** f = 50 Hz et λ = 0,060 m. La fréquence dépend de la période ; la longueur d'onde utilise aussi la célérité. Multiplier c par f ne donnerait pas une longueur.

C - Niveau. Une intensité est multipliée par 1 000. **Correction :** le niveau augmente de 10log_10(1 000) = 30 dB. Le niveau initial n'est pas multiplié par 1 000. Une échelle logarithmique transforme un rapport en différence.

D - Doppler. Une source sonore s'éloigne d'un récepteur immobile. **Correction :** dans le modèle subsonique présenté, la fréquence reçue est plus faible. Le signe doit être retrouvé à partir de fronts plus espacés, plutôt que mémorisé sans géométrie.

E - Modes. Une corde idéale a une fondamentale de 80 Hz. **Correction :** ses modes harmoniques ont 80, 160, 240 Hz, etc., sous les mêmes conditions aux limites. Une autre condition d'extrémité exige une autre relation ; le résultat n'est pas universel pour tout instrument.

12. Révision et portée

Sachez distinguer mouvement du milieu et propagation, lire une période sur un signal temporel et une longueur d'onde sur un profil spatial. Reconstituez le Doppler acoustique par les distances entre fronts. Pour une intensité et un niveau, revenez toujours à leur définition avant d'additionner. Vérifiez aussi les conditions de linéarité, de stationnarité et de géométrie.

Cadre officiel publié de Terminale, partie ondes et signaux : https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm et annexe https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf, consultés le 11 octobre 2026. Explications et exercices originaux LFDP, sans enregistrement, image ou sujet tiers reproduit. Les valeurs acoustiques données sont des paramètres d'exercice, pas une mesure locale, une évaluation d'exposition ni une consigne de protection.

Chapitre 10 - Optique : diffraction, interférences, images et lunette

Repère historique - 1801 : discuter une théorie de la lumière

Les archives de la Royal Society conservent le texte de la conférence de Thomas Young sur la théorie de la lumière et des couleurs, présenté le 12 novembre 1801 ; l'article correspondant a été publié en 1802. Distinguer la présentation et la publication évite de transformer deux dates proches en contradiction. Ce jalon accompagne l'étude des descriptions ondulatoires : expliquer une figure lumineuse demande de comparer phases et amplitudes, pas seulement de tracer des rayons. Les formules et exercices de ce chapitre sont des développements pédagogiques actuels ; ils ne prétendent ni reproduire le dispositif historique ni traduire son manuscrit.

Référence du fait historique, consultée le 11 octobre 2026 : Royal Society, archives L&P/11/172, https://makingscience.royalsociety.org/items/l-and-p_11_172/paper-on-the-theory-of-light-and-colours-bakerian-lecture-by-thomas-young. Analyse pédagogique LFDP, sans citation verbatim ni image reproduite.

1. Plusieurs modèles pour plusieurs questions

La lumière peut être décrite par des rayons pour étudier des images lorsque les dimensions du dispositif sont grandes devant la longueur d'onde et que les hypothèses géométriques conviennent. Une description ondulatoire devient nécessaire pour la diffraction et les interférences. Une description par photons éclaire certains échanges d'énergie avec la matière. Ces modèles ne sont pas trois opinions à départager par préférence ; chacun répond à des questions et possède un domaine de validité.

Un rayon est une représentation de direction de propagation dans l'optique géométrique, pas un fil matériel lumineux. Le dessin de

quelques rayons permet de construire une image, mais ne décrit pas à lui seul l'intensité distribuée autour de cette image. Une ouverture finie peut produire une tache de diffraction, même lorsqu'un schéma géométrique idéal fait converger les rayons en un point. La précision recherchée détermine le modèle nécessaire.

Le cadre de ce chapitre est celui de dispositifs idéalisés et de calculs sur papier. Les longueurs d'onde, tailles et focales sont des données d'exercices. Les formules ne certifient pas une qualité optique réelle. Aucun regard vers le Soleil, exposition au laser ou montage lumineux à risque n'est demandé pour comprendre les résultats.

2. Diffraction par une ouverture

La diffraction correspond à une modification de la propagation lorsqu'une onde rencontre une ouverture ou un obstacle. Elle devient particulièrement visible lorsque la dimension pertinente est comparable à la longueur d'onde. Une onde ne continue donc pas toujours sous la forme d'un faisceau géométrique strictement délimité par les bords. Le phénomène ne suppose pas une déviation aléatoire de photons indépendants à chaque bord dans le modèle ondulatoire étudié.

Pour une fente de largeur b éclairée par une onde monochromatique, le premier minimum de diffraction dans un modèle de champ lointain vérifie $\sin(\theta) = \lambda/b$. Pour de petits angles en radians, $\theta \approx \lambda/b$. L'angle θ est le demi-angle entre l'axe central et ce premier minimum. La largeur angulaire de la tache centrale est environ $2\lambda/b$. Confondre demi-angle et largeur totale produit un facteur deux.

Sur un écran à distance D dans les conditions de petite inclinaison, la largeur centrale vaut $\ell \approx 2\lambda D/b$. Avec $\lambda = 500$ nm, $b = 80$ µm et $D = 1{,}0$ m, on obtient $\ell \approx 0{,}0125$ m, soit 12,5 mm. La conversion

donne 500×10^−9 m et 80×10^−6 m. Une fente deux fois plus étroite donne une tache centrale deux fois plus large dans ce modèle ; une longueur d'onde plus grande produit aussi davantage d'étalement.

3. Interpréter une mesure de diffraction

Si la formule et ses conditions sont adaptées, on peut estimer une largeur inconnue par b ≈ 2λD/ℓ. Il faut mesurer la largeur centrale entre les premiers minima, pas choisir arbitrairement deux zones lumineuses visibles. La lumière monochromatique, la géométrie et les distances influencent la pertinence du modèle. Une lumière composée de plusieurs longueurs d'onde superpose plusieurs figures et peut compliquer la mesure.

Pour λ = 600 nm, D = 2,0 m et ℓ = 24 mm, la largeur estimée vaut 100 µm. Doubler une mesure de ℓ avec les mêmes autres paramètres diviserait b par deux. Cette dépendance permet un contrôle qualitatif avant le calcul. Une largeur négative serait impossible, et un résultat très éloigné des dimensions du dispositif inviterait à vérifier unités, définition de ℓ et hypothèses.

Les incertitudes sur D, λ et ℓ se répercutent sur b. Si la largeur mesurée est peu précise, ajouter des décimales à la distance ne rend pas automatiquement b très précis. Une estimation doit être présentée avec une précision compatible avec les données. Le modèle peut aussi être le principal facteur limitant si les angles ne sont plus petits ou si le régime de champ lointain n'est pas atteint.

4. Superposition et déphasage

Deux ondes sinusoïdales de même fréquence qui se superposent ont un résultat dépendant de leur déphasage. Pour une différence de marche δ et des sources initialement en phase dans le même milieu, $\Delta\varphi = 2\pi\delta/\lambda$, à une convention de signe près. Si les phases initiales diffèrent, il faut ajouter cette différence ; la seule distance ne suffit plus à décrire les interférences.

Une interférence constructive correspond à des perturbations qui se renforcent. Pour deux amplitudes égales et $\Delta\varphi = 2m\pi$, l'amplitude résultante est doublée. Une interférence destructive complète correspond à $\Delta\varphi = (2m + 1)\pi$ et peut annuler la perturbation locale si les amplitudes sont égales. Les conditions de marche sont alors $\delta = m\lambda$ et $\delta = (m + 1/2)\lambda$ dans le cas initialement en phase.

Pour deux amplitudes inégales, une opposition de phase ne produit pas nécessairement une annulation complète. La cohérence, c'est-à-dire ici une différence de phase suffisamment stable pour l'observation, est également nécessaire à une figure stable. Deux sources indépendantes peuvent faire varier leur phase relative trop rapidement ; le terme d'interférence moyen peut alors disparaître. La somme des intensités et la somme des amplitudes ne sont pas interchangeables.

5. Intensité et conservation de l'énergie

Pour la lumière, la relation scalaire qui suit suppose des contributions de même polarisation, en plus des conditions de cohérence ; des polarisations orthogonales ne donnent pas ce terme d'interférence. Dans le modèle linéaire approprié, deux ondes d'intensités I_1 et I_2 donnent localement I = I_1 + I_2 + 2sqrt(I_1I_2)cos(Δφ). Si chacune a une intensité I_0, le résultat devient 4I_0cos²(Δφ/2). Le maximum local vaut 4I_0 et le minimum zéro. L'intensité de deux ondes incohérentes de même intensité serait en moyenne 2I_0 dans les conditions d'addition usuelles.

Le maximum local plus élevé ne crée pas d'énergie, et le minimum n'en détruit pas. La figure redistribue l'énergie dans l'espace sous les conditions du dispositif. Une zone sombre et une zone brillante ne doivent pas être étudiées comme deux systèmes indépendants auxquels on attribuerait toute l'énergie initiale. La conservation se vérifie sur un bilan adapté de l'ensemble et de ses flux.

Cette relation montre aussi pourquoi additionner deux niveaux en décibels serait incorrect pour décrire une interférence. Il faut travailler avec les amplitudes ou intensités et les phases du modèle, puis appliquer la définition du niveau si cette représentation est demandée. Une même fréquence ne suffit pas : la stabilité relative de phase et la géométrie restent importantes.

6. Interférences à deux ouvertures

Dans un montage idéal de deux ouvertures cohérentes séparées de a, avec un écran éloigné à D et une coordonnée x proche de l'axe, la différence de marche est approximativement δ ≈ ax/D. Pour des sources initialement en phase, les maxima sont donc séparés d'un interfrange i ≈ λD/a. Les approximations demandent notamment une distance grande devant a et des angles suffisamment petits.

Avec λ = 600 nm, D = 2,0 m et a = 0,20 mm, l'interfrange vaut 0,0060 m, soit 6,0 mm. Augmenter a réduit l'interfrange ; éloigner l'écran l'augmente. Cette dépendance est distincte de la largeur de diffraction d'une ouverture de largeur b. Les deux dimensions a et b ne jouent pas le même rôle et ne doivent pas être échangées dans les formules.

Une figure réelle à deux fentes présente souvent des franges d'interférences modulées par une enveloppe de diffraction. Les franges expriment la différence de marche entre les ouvertures ; l'enveloppe dépend de chaque ouverture finie. Décrire l'une sans l'autre peut être une approximation utile sur une zone, mais ne prétend pas reproduire toute la distribution d'intensité.

Si l'on mesure i pour estimer λ, on utilise λ ≈ ia/D. Une valeur moyenne sur plusieurs interfranges peut réduire une erreur de repérage : mesurer dix espacements puis diviser par dix est souvent plus stable qu'un seul espacement. Cela ne supprime pas une erreur de calibration ni une hypothèse géométrique inadéquate. L'amélioration de répétabilité et la correction d'un biais sont deux objectifs différents.

7. Limite de résolution : former une image n'est pas tout distinguer

Une ouverture finie répartit l'image d'un point sur une tache plutôt que sur un point mathématique parfait. Deux objets très proches angulairement peuvent produire des taches qui se superposent. Un plus grand diamètre d'ouverture peut améliorer la résolution limitée par la diffraction pour une même longueur d'onde, mais les aberrations, le capteur et l'atmosphère peuvent imposer d'autres limites.

En complément de compréhension, un critère usuel pour une ouverture circulaire donne un angle caractéristique d'environ

1,22λ/D_ouverture dans le modèle de diffraction idéal. Ce nombre dépend du critère choisi et de la géométrie de l'ouverture ; il ne constitue pas une promesse de qualité d'une lunette réelle. Le symbole D_ouverture ne désigne pas la distance à l'écran du paragraphe précédent.

Grossir une image ne suffit pas à créer un détail qui n'a pas été résolu. Une image très agrandie peut rester floue. Il faut distinguer grossissement, résolution et luminosité. Cette distinction protège contre une interprétation simpliste d'un nombre commercial de grossissement, sans exiger de tester un instrument réel pour comprendre le modèle.

8. Lentille mince et convention algébrique

Pour une lentille mince convergente, on choisit un axe orienté dans le sens de propagation de la lumière et un centre optique O. La distance focale image f' = OF' est positive. La relation de conjugaison algébrique s'écrit 1/OA' − 1/OA = 1/f'. Pour un objet réel placé à gauche, OA est négatif ; une image réelle à droite a OA' positive. Les signes sont attachés aux positions orientées, pas au seul mot « distance ».

Le grandissement transversal est γ = A'B'/AB = OA'/OA. Un signe négatif indique une image inversée ; sa valeur absolue compare les tailles. Une image réelle peut être recueillie sur un écran dans le modèle, car les rayons convergent effectivement. Une image virtuelle correspond à l'intersection de prolongements ; elle ne se projette pas sur un écran placé à cette position par le même faisceau.

Avec f' = 0,10 m et OA = −0,30 m, la relation donne 1/OA' = 10 − 3,333... = 6,666..., donc OA' = 0,15 m. Le grandissement vaut −0,50. L'image est réelle, inversée et deux fois plus petite. Remplacer OA par une distance positive de 0,30 m changerait

l'équation et donnerait une réponse incompatible avec la convention.

9. Cas limites et construction géométrique

Pour un objet placé à l'infini dans une direction donnée, les rayons incidents sont approximativement parallèles et l'image se forme dans le plan focal image. Un rayon parallèle à l'axe passe par le foyer image après une lentille convergente idéale ; un rayon passant par le centre optique n'est pas dévié dans l'approximation de lentille mince. Ces règles permettent une construction, à condition de ne pas traiter un schéma non gradué comme une mesure exacte.

Si l'objet est au foyer objet, les rayons émergent parallèles et l'image est à l'infini dans le modèle. Si l'objet réel est entre le foyer et la lentille, l'image devient virtuelle et droite. Avec f' = 0,10 m et OA = −0,050 m, on trouve OA' = −0,10 m et γ = +2. L'image est située du côté de l'objet et agrandie.

La relation mince est utilisée dans des conditions paraxiales : rayons suffisamment proches de l'axe et angles modestes, avec un modèle de lentille adapté. De grands angles ou une ouverture importante peuvent révéler des aberrations. La diffraction limite encore l'image même si le modèle géométrique est correctement résolu. Un calcul de conjugaison répond à une question de position et de taille idéales, pas à toute la qualité d'un instrument.

10. Lunette afocale et grossissement angulaire

Une lunette astronomique idéale peut être modélisée par deux lentilles convergentes, objectif et oculaire. Pour un objet à l'infini, l'objectif forme une image intermédiaire dans son plan focal image. Dans une lunette afocale, ce plan coïncide avec le plan focal objet de l'oculaire. Les rayons ressortent alors parallèles ; la distance entre lentilles vaut f'_objectif + f'_oculaire dans le modèle simple.

Le grossissement angulaire signé est G = θ'/θ = −f'_objectif/f'_oculaire pour les petits angles et la convention adoptée. Le signe négatif correspond à une image inversée. Avec un objectif de focale 200 mm et un oculaire de 25 mm, la séparation idéale vaut 225 mm et G = −8. La valeur absolue du grossissement est huit ; elle compare des angles, pas directement une hauteur d'image à une hauteur d'objet situé à une distance finie.

Un plus grand diamètre d'objectif peut collecter davantage de lumière et améliorer une limite de résolution par diffraction, mais il ne modifie pas à lui seul ce rapport de focales. Un oculaire change le grossissement ; il ne répare pas automatiquement une information perdue. Pour expliquer une lunette à l'oral, distinguez le trajet des rayons, l'image intermédiaire, la condition afocale et le grossissement.

11. Réfraction, fréquence et longueur d'onde

L'indice d'un milieu peut être défini par n = c_0/v_phase pour une onde lumineuse monochromatique, avec c_0 la célérité dans le vide. À une interface stationnaire, la fréquence reste la même dans le modèle de transmission, tandis que la longueur d'onde devient λ_milieu = λ_vide/n. Une couleur liée à la fréquence ne se transforme donc pas simplement en une autre couleur parce que la longueur d'onde dans le milieu a changé.

La loi de réfraction s'écrit n_1sin(θ_1) = n_2sin(θ_2), les angles étant mesurés par rapport à la normale à l'interface. Mesurer par rapport à la surface sans conversion est une erreur de géométrie. Si n_2 > n_1, le rayon réfracté se rapproche de la normale pour la géométrie usuelle. La direction et l'amplitude de réflexion demandent encore leurs propres relations.

Une réflexion totale interne est possible lorsque l'onde passe d'un indice plus grand vers un indice plus petit et que l'angle d'incidence dépasse un angle limite vérifiant sin(θ_limite) = n_2/n_1. Cette condition ne s'applique pas au passage inverse. Elle illustre l'importance de l'ordre des milieux. Les propriétés des indices peuvent dépendre de la longueur d'onde ; la dispersion explique certaines différences de direction entre composantes d'une lumière polychromatique.

12. Exercices corrigés

A - Largeur centrale. λ = 400 nm, b = 0,10 mm et D = 2,0 m. **Correction :** $\ell \approx 2\lambda D/b = 0{,}016$ m, soit 16 mm. Le demi-angle vaut environ 0,004 rad. Donner une largeur de 8 mm aurait oublié le facteur deux.

B - Interfrange. Un montage idéal a i = 3,0 mm, a = 0,50 mm et D = 2,5 m. **Correction :** λ ≈ ia/D = 6,0×10^−7 m, soit 600 nm. Les deux millimètres sont convertis en mètres avant le produit. La longueur d'onde calculée dépend des hypothèses de petite inclinaison et de cohérence.

C - Phase. Deux ondes initialement en phase ont une différence de marche de 3λ/2. **Correction :** $\Delta\varphi = 3\pi$, équivalent à π modulo 2π : l'interférence est destructive. Elle est complètement nulle seulement si les amplitudes sont égales dans le modèle.

D - Image. f' = 0,20 m et OA = −0,40 m. **Correction :** 1/OA' = 5 − 2,5 = 2,5, donc OA' = 0,40 m et γ = −1. L'image est réelle, inversée et

de même taille. La même taille n'implique pas une orientation identique.

E - Lunette. Une lunette afocale possède des focales de 300 et 30 mm. **Correction :** la séparation idéale vaut 330 mm et le grossissement signé −10. L'inversion vient du modèle à deux lentilles convergentes ; un autre système de redressement modifierait la description.

F - Indice. Une onde de fréquence donnée a une longueur d'onde dans le vide de 600 nm et entre dans un milieu d'indice 1,5. **Correction :** sa longueur d'onde dans ce milieu vaut 400 nm ; la fréquence reste la même à l'interface stationnaire. La célérité de phase est divisée par 1,5.

13. Révision et références

Pour réviser, choisissez d'abord le phénomène : diffraction d'une ouverture, interférence entre contributions, conjugaison d'une lentille ou grossissement d'une lunette. Écrivez ensuite les dimensions et les conventions propres à ce phénomène. Ne confondez pas largeur de fente et séparation de fentes, angle et longueur sur écran, grandissement transversal et grossissement angulaire. Une représentation annotée peut être plus instructive qu'une formule isolée.

Cadre officiel publié de Terminale : https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm et annexe https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf, consultés le 11 octobre 2026. La partie sur la résolution circulaire est un complément annoncé ; le guide ne prétend pas reproduire toutes les modalités d'un examen. Explications et exercices originaux LFDP, sans photographie, schéma ou citation de manuel tiers. Les calculs ne constituent aucun protocole de montage ou de sécurité optique.

Chapitre 11 - Photons, niveaux d'énergie et conversion de la lumière

Repère historique - 1905 et 1921 : une loi pour l'effet photoélectrique

Le dossier de la Fondation Nobel relie les travaux d'Einstein de 1905 à l'explication de l'effet photoélectrique par des quanta de lumière. Le prix de physique attribué pour 1921, remis l'année suivante, mentionne notamment la loi de cet effet. Il ne faut donc pas le présenter comme un prix obtenu pour la relativité générale. Ce repère sert surtout à comprendre un changement de question : augmenter une intensité ne remplace pas nécessairement l'énergie individuelle exigée pour extraire un électron dans le modèle à un photon. Le calcul doit comparer des énergies, et non confondre puissance du faisceau et fréquence.

Référence du fait historique, consultée le 11 octobre 2026 : NobelPrize.org, dossier sur la lumière et archives Nobel, https://www.nobelprize.org/prizes/physics/the-dual-nature-of-light-as-reflected-in-the-nobel-archives/. Analyse pédagogique LFDP, sans citation verbatim ni image reproduite.

1. Pourquoi plusieurs descriptions de la lumière sont nécessaires

Le chapitre précédent décrivait une onde lumineuse par sa longueur d'onde, sa phase et ses interférences. Cette représentation explique la disposition des franges et les limites de résolution. Elle ne suffit pourtant pas à rendre compte de toutes les modalités d'échange d'énergie entre lumière et matière. Lorsqu'un détecteur reçoit de la lumière, l'énergie peut être transférée par événements discrets. Le photon désigne le quantum associé à cette interaction électromagnétique. Il ne faut donc pas remplacer une théorie utile par un slogan opposé : les phénomènes étudiés déterminent les grandeurs et le modèle pertinents.

Un photon n'est pas une petite bille classique dont on pourrait suivre la trajectoire sans conséquence dans tout dispositif d'interférence. Une onde lumineuse n'est pas davantage une substance matérielle qui s'écoulerait comme de l'eau. Les images peuvent faciliter une première explication ; elles cessent d'être utiles lorsqu'on leur attribue des propriétés étrangères au modèle. Une bonne réponse distingue ce qui est mesuré, ce qui est calculé et ce qui relève d'une représentation pédagogique.

Dans ce guide, l'énergie d'un photon sert à étudier les transitions entre niveaux d'énergie, l'effet photoélectrique et quelques bilans de conversion. Nous n'entreprenons pas une construction complète de la mécanique quantique. Les exemples numériques de niveaux atomiques et de matériaux sont fictifs sauf indication contraire. Ils permettent de raisonner sans faire passer un schéma simplifié pour les caractéristiques d'un composant réel.

2. Énergie, fréquence et longueur d'onde dans le vide

Pour une radiation de fréquence ν, l'énergie d'un photon s'écrit :

$E = h\,\nu = h\,c_0 / \lambda_0$.

La constante de Planck h vaut exactement 6,626 070 15 × 10^{-34} J·s et la célérité de la lumière dans le vide c_0 exactement 299 792 458 m·s^{-1} dans le système international. La notation λ_0 indique la longueur d'onde dans le vide. La fréquence et la longueur d'onde sont liées par $c_0 = \lambda_0 \nu$. La formule n'ajoute pas trois paramètres indépendants : donner l'un des deux paramètres spectraux permet de calculer l'autre, puis l'énergie.

La dimension de h ν est J·s multiplié par s^{-1}, donc une énergie. Pour une longueur d'onde de 600 nm, la conversion préalable donne $\lambda_0 = 600 \times 10^{-9}$ m. On obtient environ 3,31 × 10^{-19} J par photon. Ce nombre très petit décrit un événement individuel ; il ne signifie pas qu'une source produisant un grand nombre de photons transporte une énergie négligeable.

Le passage de la lumière dans un milieu transparent change sa célérité et sa longueur d'onde, mais conserve sa fréquence lors d'une traversée d'interface stationnaire. Si l'indice vaut n, la longueur d'onde du milieu est $\lambda = \lambda_0/n$. Il serait incorrect de remplacer λ_0 par cette longueur d'onde raccourcie dans h c_0/λ : on attribuerait au photon une énergie multipliée par n sans mécanisme correspondant. Le calcul le plus sûr utilise h ν, ou h c_0/λ_0 lorsque la longueur d'onde dans le vide est explicitement donnée.

Le photon a une masse au repos nulle et une énergie non nulle. Cela n'autorise pas l'application de l'expression classique m $v^2/2$ avec une masse nulle pour conclure à une énergie nulle. Cette expression appartient à un autre régime physique. La cohérence d'un raisonnement dépend aussi du domaine de validité de ses relations.

3. L'électronvolt : une unité d'énergie, pas une tension

L'électronvolt est adapté aux énergies des phénomènes microscopiques. Un électronvolt vaut exactement 1,602 176 634 × 10^{-19} J. Son symbole eV ne doit pas être confondu avec le volt, unité de différence de potentiel. Le lien entre les deux provient de l'énergie associée au déplacement d'une charge élémentaire sous une différence de potentiel d'un volt. Une énergie et une tension gardent cependant des dimensions différentes.

Pour convertir des joules en électronvolts, on divise par la valeur d'un électronvolt en joules. Le photon de 600 nm possède ainsi une énergie d'environ 2,07 eV. Pour convertir une énergie de 3,0 eV en joules, on multiplie au contraire par 1,602 × 10^{-19} : le résultat est proche de 4,81 × 10^{-19} J. L'écriture complète du facteur de conversion empêche de choisir le sens de l'opération au hasard.

Un raccourci pratique, à condition de garder ses unités, est :

E en eV ≈ 1 240 / longueur d'onde dans le vide en nm.

Le nombre 1 240 est un arrondi du produit h c_0 exprimé en eV·nm. Il n'est pas une nouvelle constante indépendante. Pour 400 nm, on trouve environ 3,10 eV ; pour 800 nm, environ 1,55 eV. Doubler la longueur d'onde divise l'énergie du photon par deux. Cette comparaison constitue un contrôle immédiat de tout calcul spectral.

4. Puissance d'un faisceau et nombre de photons

Une puissance mesure une énergie transférée par unité de temps. Dans le modèle d'un faisceau monochromatique, si chaque photon porte l'énergie E et si le débit moyen de photons est $\mathcal{N}$, alors $P = \mathcal{N} E$. On peut donc écrire $\mathcal{N} = P/(h\,\nu)$. Cette relation ne dit pas que les photons arrivent à intervalles réguliers ; elle donne un débit moyen compatible avec la puissance considérée.

Prenons une source fictive de puissance optique 2,0 mW à 500 nm dans le vide. L'énergie individuelle est proche de $3{,}97 \times 10^{-19}$ J. Le débit moyen est donc d'environ $5{,}03 \times 10^{15}$ photons par seconde. Une milliseconde représente en moyenne quelque $5{,}03 \times 10^{12}$ photons. Le résultat illustre le contraste entre une énergie microscopique et un flux macroscopique, sans demander de représenter mentalement chaque événement.

Si la source possède plusieurs longueurs d'onde, diviser la puissance totale par l'énergie d'un photon arbitrairement choisi n'est pas exact. Il faut répartir la puissance selon le spectre, calculer les contributions et les additionner. On peut parfois utiliser une approximation monochromatique, mais il faut la nommer et vérifier qu'elle répond au niveau de précision attendu.

Augmenter la puissance à fréquence fixée augmente le débit de photons dans ce modèle ; cela ne change pas l'énergie de chaque photon. Augmenter la fréquence augmente l'énergie individuelle, mais la puissance totale dépend aussi du nombre de photons. La couleur et la puissance ne sont donc pas deux façons équivalentes de dire « quantité de lumière ».

5. Lire un diagramme de niveaux d'énergie

Un diagramme représente des états d'énergie autorisés pour un système. La position verticale indique l'énergie, souvent en électronvolts. Les distances dessinées ne sont quantitatives que si l'échelle l'est. Pour étudier une transition, on calcule la différence entre énergie finale et énergie initiale, plutôt que de chercher immédiatement une formule spectrale.

Considérons des niveaux fictifs de -5 eV et -2 eV. Le passage du premier au second augmente l'énergie du système de 3 eV. Dans le modèle d'une absorption d'un seul photon, celui-ci doit fournir cette différence. La longueur d'onde correspondante vaut environ

413 nm dans le vide. Le passage inverse peut produire un photon de même énergie si la transition considérée est radiative.

Les signes négatifs des niveaux ne rendent pas l'énergie du photon négative. Ils signalent le choix d'une référence énergétique, par exemple celle d'un état non lié dans un modèle. L'énergie transférée dépend de la différence, et cette différence est positive pour le photon émis. Changer toutes les énergies de niveau d'une même constante conserve les transitions.

La seule correspondance énergétique ne garantit pas qu'une transition soit observable. Des règles de sélection, des populations d'états, des interactions et les conditions de mesure interviennent dans les systèmes réels. Au niveau d'un exercice simple, on exploite les transitions annoncées comme possibles. Pour interpréter un spectre réel, on recherche des références propres à l'espèce et au dispositif étudiés.

Un spectre de raies peut servir à identifier des transitions ; il ne constitue pas toujours une étiquette unique indépendante de toute condition. La résolution du spectromètre, les mélanges, l'élargissement des raies et les niveaux effectivement peuplés modifient la lecture. La méthode scientifique demande plusieurs indices concordants, pas une ressemblance visuelle isolée.

6. Le modèle énergétique de l'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique désigne l'émission d'électrons provoquée par l'interaction d'un rayonnement avec un matériau, dans les conditions appropriées. Dans le modèle élémentaire où un électron reçoit l'énergie d'un seul photon, une partie de cette énergie sert à franchir la barrière caractérisée par le travail d'extraction Φ. L'énergie cinétique maximale des électrons émis est alors :

$K_{max} = h\nu - \Phi$, lorsque $h\nu$ est au moins égal à Φ.

Le maximum est nécessaire : tous les électrons ne sortent pas avec une énergie identique. Leur état et les pertes avant émission peuvent différer. L'équation décrit la limite énergétique du modèle, pas une loi attribuant systématiquement la même vitesse à chaque électron détecté.

Pour un matériau fictif de travail d'extraction 2,2 eV et une lumière de 400 nm, l'énergie du photon est proche de 3,10 eV. La différence donne $K_{max} \approx 0{,}90$ eV, soit environ $1{,}44 \times 10^{-19}$ J. Une approximation non relativiste conduirait à $v_{max} = \sqrt{(2 K_{max}/m_e)}$, environ $5{,}6 \times 10^{5}$ m·s^{-1}. Cette vitesse reste petite devant c_0, ce qui rend l'approximation cohérente dans cet exemple.

La fréquence seuil vaut $\nu_{seuil} = \Phi/h$. On peut aussi définir la longueur d'onde seuil dans le vide $\lambda_{seuil} = h\,c_0/\Phi$. Pour $\Phi = 2{,}2$ eV, elle est proche de 564 nm. Dans le régime à un photon, une longueur d'onde plus courte apporte une énergie suffisante ; une longueur d'onde plus longue n'en apporte pas assez.

À 700 nm, l'énergie individuelle est seulement d'environ 1,77 eV : elle est inférieure au travail d'extraction fictif. Dans ce modèle, augmenter simplement le nombre de photons ne remplace pas l'énergie manquante de chacun. Il faut éviter d'en faire une affirmation universelle sur tous les régimes expérimentaux : des mécanismes multiphotoniques peuvent exister à des intensités particulières, mais ils sont hors du modèle étudié ici.

7. Une expérience qui distingue fréquence et intensité

Pour mettre à l'épreuve une relation, on doit faire varier un paramètre tout en maîtrisant les autres. À fréquence fixée au-dessus du seuil, une augmentation du flux de photons peut accroître le nombre d'électrons émis par unité de temps, dans un régime où le matériau et la collecte ne saturent pas. Elle ne modifie pas directement K_max dans l'équation élémentaire. À intensité appropriée, changer la fréquence modifie au contraire le maximum énergétique prévu.

Une tension opposée au mouvement des électrons peut permettre d'estimer leur énergie maximale. La valeur positive de la tension d'arrêt, notée U_a comme une grandeur, vérifie K_max = e U_a. L'électron porte la charge −e ; les signes des potentiels dans un schéma dépendent de leur orientation. Employer la valeur positive U_a évite de transformer une convention de circuit en énergie cinétique négative.

Avec K_max ≈ 0,90 eV, on attend une tension d'arrêt de grandeur environ 0,90 V dans le modèle idéal. Cette correspondance numérique utilise la définition de l'électronvolt. Elle ne permet pas de négliger les effets expérimentaux : potentiels de contact, lumière parasite, courant résiduel et précision de lecture doivent être envisagés dans une analyse réelle.

Si l'on trace K_max en joules en fonction de ν en hertz, la pente théorique est h et l'ordonnée à l'origine est −Φ. Si l'énergie est en eV, la pente est exprimée en eV·s, pas en J·s. Reconnaître l'unité du coefficient directeur est indispensable pour exploiter un graphique ou confronter deux mesures.

8. Conversion photovoltaïque et bilans corrects

Une cellule photovoltaïque transforme une partie de l'énergie lumineuse reçue en énergie électrique utilisable. Son fonctionnement complet demande un modèle de matériau et de transport des charges plus élaboré que l'effet photoélectrique simple. Pour un bilan macroscopique, on peut néanmoins comparer puissance incidente et puissance électrique délivrée, à condition de préciser la surface et les conditions.

Une surface fictive de 0,020 m^2 reçoit une irradiance de 500 $W \cdot m^{-2}$. Si cette irradiance est celle reçue par la surface dans les conditions géométriques annoncées, la puissance incidente vaut 10 W. Si la puissance électrique utile est 1,8 W, le rendement relatif à l'énergie incidente vaut 18 %. Il reste 8,2 W répartis entre réflexion, transmissions éventuelles, échauffement et autres pertes selon le système.

Supposons que 80 % de la puissance incidente soit effectivement absorbée. La puissance absorbée est alors 8 W. La fraction convertie en électricité parmi cette puissance absorbée vaut 22,5 %. Les deux pourcentages ne se contredisent pas : ils ont des dénominateurs différents. Un rendement présenté sans frontière de système ni référence énergétique peut être trompeur même lorsque son calcul arithmétique est exact.

On ne peut pas convertir un éclairement en lux en puissance en watts par une simple constante valable pour toutes les sources. Le lux tient compte de la réponse visuelle humaine selon le spectre. Le watt mesure une énergie par seconde. Une comparaison de sources demande de savoir si l'on évalue une perception lumineuse, une puissance rayonnante ou une efficacité de conversion.

9. Questions corrigées et diagnostic des erreurs

Exercice A. Une radiation possède une longueur d'onde dans le vide de 620 nm. Calculer l'énergie du photon en joules et en électronvolts. La réponse est environ $3{,}20 \times 10^{-19}$ J, soit 2,00 eV. Une valeur de 2,00 J proviendrait d'une confusion entre résultat numérique en eV et résultat en joules ; une valeur de $3{,}20 \times 10^{-28}$ J indiquerait probablement une conversion du nanomètre oubliée.

Exercice B. Un modèle de système possède les niveaux −4,0 eV, −2,5 eV et −1,0 eV. Quelles énergies pourraient correspondre aux différences entre ces niveaux ? Les différences positives sont 1,5 eV et 3,0 eV. Deux transitions distinctes peuvent donc partager la même différence de 1,5 eV. On ne déduit pas de cette seule liste que toutes les transitions sont autorisées ou observables.

Exercice C. Un matériau fictif a $\Phi = 2{,}5$ eV. Un photon de 500 nm suffit-il dans le modèle à un photon ? Son énergie est proche de 2,48 eV : elle reste légèrement inférieure au seuil. Arrondir trop tôt à 2,5 eV supprimerait la distinction demandée. La longueur d'onde limite vaut environ 496 nm. L'exercice rappelle qu'une approximation adaptée à une présentation générale peut devenir insuffisante près d'un seuil.

Exercice D. Une source monochromatique fournit 3,0 mJ à 600 nm. Estimer le nombre total de photons associés à cette énergie. On divise $3{,}0 \times 10^{-3}$ J par $3{,}31 \times 10^{-19}$ J, d'où environ $9{,}1 \times 10^{15}$ photons. Le résultat est un nombre sans unité ; il ne représente pas une fréquence. Pour obtenir un débit, il faudrait connaître la durée de l'émission.

Exercice E. À puissance optique identique, une source de 800 nm et une source de 400 nm produisent-elles le même débit de photons ? Le photon de 400 nm porte deux fois plus d'énergie. Le débit correspondant est donc deux fois plus faible, à puissance

identique et dans l'approximation monochromatique. Une réponse fondée seulement sur la couleur visible ne suffirait pas.

Complément - Décroissance radioactive, activité et demi-vie

La radioactivité correspond à la transformation spontanée de noyaux instables, accompagnée de l'émission de rayonnements. On ne peut pas annoncer l'instant de désintégration d'un noyau particulier à partir d'un compte à rebours déterministe. Une population nombreuse permet cependant un modèle statistique de décroissance. Pour un même radionucléide dans le cadre simple étudié, la demi-vie est la durée au bout de laquelle le nombre moyen de noyaux parents restants est divisé par deux. Elle ne signifie pas que tous les noyaux disparaissent après deux demi-vies.

Considérons une population initiale N0, sans nouvel apport de noyaux parents, et une constante de désintégration $\lambda > 0$. Le modèle moyen vérifie $dN/dt = -\lambda N$. La solution est $N(t) = N0 \exp(-\lambda t)$, pour $t \geq 0$. N compte ici seulement les noyaux parents non encore désintégrés, pas tous les noyaux du récipient. Des noyaux produits peuvent eux-mêmes être radioactifs : l'activité totale d'une chaîne demande alors d'autres équations. La relation simple n'est pas une description universelle de tous les mélanges.

L'activité A(t) du radionucléide parent est le nombre moyen de désintégrations par unité de temps : $A(t) = \lambda N(t)$. Elle s'exprime en becquerels, avec $1\ Bq = 1\ s^{-1}$. Pour exprimer A en Bq, λ doit donc être en s^{-1}. L'activité ne constitue pas une dose reçue par une personne : les rayonnements, l'exposition et la géométrie demandent d'autres informations. Aucun calcul de ce complément ne détermine une consigne de manipulation, un seuil de sécurité ou une décision clinique.

La relation N(t_1/2) = N0/2 donne exp(−λt_1/2) = 1/2. En prenant le logarithme, t_1/2 = ln(2)/λ. On peut alors écrire N(t) = N0 × 2^(−t/t_1/2). Après deux demi-vies, il reste N0/4 ; après trois, N0/8. Chaque intervalle retire la moitié de ce qui reste, et non une moitié constante de N0. La pente de la courbe devient donc moins forte en valeur absolue, contrairement à une décroissance linéaire.

Exercice original fictif. Une population parent est modélisée par N0 = 2,0 × 10¹² et une demi-vie de 8,0 h. Calculer λ en unités SI, N après 24 h et l'activité parent initiale puis finale. Correction : 8,0 h = 28 800 s, donc λ ≈ 2,41 × 10⁻⁵ s⁻¹. Après trois demi-vies, N = 2,5 × 10¹¹. L'activité initiale est environ 4,81 × 10⁷ Bq ; l'activité après 24 h est environ 6,02 × 10⁶ Bq, soit un huitième. Ces nombres caractérisent exclusivement le modèle donné ; ils ne sont associés à aucun objet à préparer ou à conserver.

Exercice de raisonnement. Déterminer quand la population moyenne passe sous 1 % de N0. La condition 2^(−t/t_1/2) < 0,01 donne t > [ln(100)/ln(2)]t_1/2, environ 6,64 demi-vies. Pour la donnée précédente, le seuil est franchi après environ 53,2 h. À sept demi-vies, la fraction vaut 1/128, environ 0,781 %. Une fraction faible n'est pas synonyme de disparition complète, et ne constitue pas un seuil de sécurité. Le modèle continu donne une moyenne : pour quelques noyaux restants, les fluctuations individuelles prennent une importance que cette courbe lisse ne représente pas.

Références scientifiques, consultées le 11 octobre 2026 : CEA, définition et décroissance radioactive, https://www.cea.fr/comprendre/pages/radioactivite/radioactivite.aspx?numero=1&type=chapitre ; document pédagogique hébergé par l'ASNR, partie 1.2.7, relations de décroissance et d'activité, https://recherche-expertise.asnr.fr/sites/default/files/documents/professionnels_sante/documentation/syllabus_chapitre_1.pdf. Les démonstrations et les deux exercices sont originaux LFDP. Aucune procédure expérimentale, valeur de dose ou information de traitement n'est reproduite.

10. Synthèse à expliquer sans formule récitée

L'énergie d'un photon dépend de sa fréquence, tandis que la puissance d'un faisceau dépend aussi du nombre de photons. Un diagramme de niveaux permet de calculer des différences énergétiques ; la possibilité d'une transition ne dépend pas uniquement de cette différence. L'effet photoélectrique élémentaire exige de comparer l'énergie individuelle au travail d'extraction. Un bilan photovoltaïque compare des puissances définies à la même frontière et dans les mêmes conditions.

Pour présenter une résolution, commencez par nommer l'énergie recherchée et son unité. Précisez ensuite le modèle : photon monochromatique, transition annoncée, extraction à un photon ou conversion macroscopique. Convertissez la longueur d'onde, conservez les chiffres nécessaires près d'un seuil, puis vérifiez le sens du résultat. Si la longueur d'onde diminue, l'énergie individuelle augmente. Si la puissance augmente à fréquence fixée, le débit peut augmenter. Ces deux contrôles conceptuels empêchent de nombreuses erreurs de calcul.

Références de cadrage et constantes

Programme français de spécialité physique-chimie de Terminale, partie énergie du photon et effet photoélectrique ; les développements et exercices ci-dessus sont une rédaction originale, pas une reproduction du programme : https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm

NIST, table des constantes physiques CODATA 2022, consultée le 11 octobre 2026 pour h, c_0, e et m_e : https://physics.nist.gov/cuu/Constants/Table/allascii.txt

Chapitre 12 - Construire, éprouver et présenter une résolution physique

Repère historique - 2018-2019 : définir ne signifie pas mesurer sans erreur

La résolution adoptée par la CGPM en 2018 a fixé les valeurs numériques de sept constantes définissant le SI révisé, avec effet au 20 mai 2019. Le BIPM indique notamment la constante de Planck, la charge élémentaire et la constante de Boltzmann. Ce repère institutionnel aide à distinguer une valeur exacte par définition et une réalisation expérimentale. Une balance, un capteur ou une méthode restent soumis à leurs incertitudes. Lorsque vous examinez un résultat, demandez donc si l'incertitude concerne la constante définie, la mesure réalisée ou les approximations de votre modèle ; ces trois niveaux ne se remplacent pas.

Référence du fait historique, consultée le 11 octobre 2026 : BIPM, résolution 1 de la 26e CGPM, https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/26-2018/resolution-1. Analyse pédagogique LFDP, sans citation verbatim ni image reproduite.

1. Une question physique n'est pas une collection de données

Un énoncé peut contenir une description, un graphique, des mesures, des valeurs de référence et des détails de contexte. Tous ces éléments n'ont pas le même statut. La première tâche consiste à reformuler la question en une grandeur recherchée ou en une proposition à discuter. « Le résultat est-il compatible avec le modèle ? » ne demande pas seulement de calculer un nombre. « Quel dispositif est le plus efficace ? » demande de préciser le critère d'efficacité et les conditions de comparaison.

Le travail commence donc avant le choix d'une formule. On identifie le système, la période étudiée, les échanges autorisés par la modélisation et les grandeurs réellement disponibles. Une masse et une hauteur suggèrent peut-être un bilan énergétique, mais l'existence de frottements annoncés interdit de conclure immédiatement à la conservation de l'énergie mécanique. La présence d'une résistance et d'un condensateur suggère une évolution RC, mais l'état initial et le branchement doivent être connus pour déterminer la solution.

Une méthode efficace consiste à rédiger deux phrases : « Je cherche… » et « Je modélise… ». La première évite de résoudre une question voisine ; la seconde rend visibles les hypothèses. Ces phrases peuvent être brèves dans une copie. Leur fonction n'est pas de produire un préambule décoratif, mais de fixer le contrat de la résolution.

Les modèles idéaux étudiés dans ce guide n'autorisent pas la réalisation autonome de dispositifs dangereux. Un calcul de force, de tension, de température ou d'énergie n'est pas une procédure de sécurité ni une certification technique. En particulier, les expériences électriques, les sources lumineuses intenses et les systèmes sous pression relèvent d'un encadrement adapté. Les exercices utilisent des situations théoriques clairement définies.

2. Choisir une loi en justifiant son domaine

Deux approches peuvent résoudre le même problème sans présenter le même coût. Pour connaître une vitesse après une chute sans résistance, le théorème de l'énergie cinétique est souvent plus rapide que l'intégration temporelle de la dynamique. Pour connaître l'instant d'arrivée, l'énergie seule ne suffit pas : il faut une relation temporelle. Pour étudier une force normale pendant un mouvement circulaire, la projection de la deuxième loi de Newton est plus directe qu'un simple bilan énergétique.

Le choix ne se résume donc pas à « cette formule apparaît dans ce chapitre ». Demandez-vous quelles inconnues la loi relie et lesquelles elle introduit. Une relation contenant une tension de contact inconnue peut compliquer un calcul de vitesse alors que son travail est nul dans le modèle. Inversement, éliminer trop vite la force de contact par un bilan d'énergie empêcherait de répondre à une question sur cette force.

Il faut aussi distinguer une loi fondamentale et une relation de comportement. La conservation de l'énergie ne dépend pas du fait qu'un ressort soit parfaitement linéaire. La relation $F = -k\,x$ suppose, elle, un régime de déformation et un modèle précis. De même, le bilan de charge demeure pertinent lorsqu'un dipôle n'obéit pas à la loi d'Ohm ; sa relation courant-tension doit alors être remplacée par celle qui convient.

Pour une présentation orale, comparer deux voies possibles est souvent très instructif. On explique pourquoi l'une donne directement la grandeur voulue, puis on utilise l'autre comme contrôle indépendant lorsque c'est possible. Une vérification par une méthode différente a plus de valeur qu'une répétition du même calcul avec une autre disposition des nombres.

3. Cas complet : chute horizontale et résistance de l'air négligée

Un objet fictif quitte horizontalement une plate-forme située à 5,0 m au-dessus d'un sol horizontal, avec une vitesse de 4,0 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. On prend $g = 10\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$ pour simplifier et on néglige l'air. Le repère possède un axe horizontal orienté dans le sens du mouvement et un axe vertical vers le haut ; l'origine est au point de départ. La vitesse verticale initiale est nulle.

Les équations deviennent $x(t) = 4\,t$ et $y(t) = -5\,t^2$. Le sol correspond à $y = -5$ m. Le temps positif d'arrivée est donc 1,0 s,

puis la distance horizontale est 4,0 m. La vitesse d'arrivée a pour composantes 4,0 et −10 m·s⁻¹. Sa norme est √116, environ 10,8 m·s⁻¹, et non la somme 14 m·s⁻¹. Un vecteur et sa norme ne se calculent pas de la même manière.

Le bilan d'énergie fournit un contrôle : v² = v₀² + 2 g h = 16 + 100 = 116 m²·s⁻². Il retrouve la norme sans déterminer directement l'heure d'arrivée. La cohérence des deux approches confirme les calculs dans le modèle, mais ne démontre pas que la résistance de l'air serait négligeable pour tout objet réel. Une feuille et une bille peuvent avoir des comportements différents malgré la même hauteur.

Le résultat horizontal varie linéairement avec la vitesse de départ et avec √h lorsque g reste constant : x_arrivée = v₀ √(2 h/g). Doubler la hauteur multiplie la portée par √2, pas par deux. Cette dépendance est plus informative qu'une valeur unique. Elle permet également de repérer une formule erronée, par exemple une portée proportionnelle à h lorsque le temps de chute devrait dépendre de √h.

4. Un modèle concurrent : chute avec frottement linéaire

Pour illustrer un autre régime, on choisit maintenant un axe vertical dirigé vers le bas et une force de résistance −b v, avec b positif. Cette relation est un modèle de frottement linéaire ; elle ne décrit pas universellement la résistance de l'air. Dans certains régimes, une dépendance quadratique ou plus complexe serait plus pertinente. Il faut donc présenter le calcul comme une comparaison de modèles, non comme une correction valable en toute situation.

La dynamique donne m v' = m g − b v. En posant τ = m/b et v_lim = m g/b, avec v(0) = 0, on obtient v(t) = v_lim (1 − e^(−t/τ)). La vitesse augmente mais approche une valeur limite. L'accélération

vaut g e^(−t/τ), positive et décroissante. Au tout début, lorsque t est petit devant τ, l'approximation de l'exponentielle donne v ≈ g t, comme pour la chute sans résistance.

La position, comptée à partir du départ, est z(t) = v_lim [t − τ (1 − e^(−t/τ))]. Sa dérivée retrouve v(t), et z(0) = 0. Pour de petits temps, le développement au premier ordre de la vitesse, puis son intégration, conduit à z ≈ g t²/2. Ces contrôles des conditions initiales et du régime limite sont indispensables lorsqu'une expression exponentielle comporte plusieurs signes.

Prenons τ = 2,0 s et g = 10 m·s⁻². La vitesse limite fictive vaut 20 m·s⁻¹. À t = 2,0 s, la vitesse est environ 12,6 m·s⁻¹, contre 20 m·s⁻¹ sans résistance. La distance parcourue est environ 14,7 m, contre 20 m dans le modèle sans résistance. Le frottement change donc à la fois la vitesse et la relation entre temps et distance.

Pour choisir entre les modèles, une seule mesure peut être insuffisante. On recherche plusieurs valeurs temporelles, on compare les écarts à la précision expérimentale et on examine la structure des résidus. Une courbe qui plafonne suggère une résistance, mais elle peut aussi résulter d'un appareil saturé. L'interprétation physique doit être accompagnée d'une lecture du dispositif de mesure.

5. Passer d'un graphique à un paramètre

Un graphique est une représentation de données avec une échelle, une unité et parfois une transformation. Le coefficient directeur de y en fonction de x a l'unité de y divisée par celle de x. Si l'on trace une vitesse en m·s⁻¹ contre un temps en secondes, la pente est une accélération en m·s⁻². Si l'axe horizontal est en millisecondes, la lecture brute de la pente exige une conversion avant d'être comparée à une valeur en unités SI.

Pour une décharge RC idéale, u(t) = u₀ e^(−t/τ). Lorsque les tensions restent positives dans les données utilisées, on peut écrire ln[u(t)/u₀] = −t/τ. Le quotient à l'intérieur du logarithme est sans dimension. Tracer ce logarithme contre le temps conduit à une droite dont la pente vaut −1/τ. Employer ln u sans préciser une tension de référence masque cette exigence dimensionnelle, même si certains usages numériques laissent cette référence implicite.

Supposons que u(0) = 6,0 V et u(2,0 s) = 3,0 V. Le modèle donne τ = 2/ln 2, environ 2,89 s. Il prévoit alors u(4,0 s) = 1,5 V. Cette troisième valeur constitue une prédiction testable, à condition qu'elle n'ait pas déjà servi à déterminer τ. Si la mesure vaut 1,9 V avec une incertitude petite, on ne doit pas simplement arrondir davantage pour sauver le modèle : il faut examiner les hypothèses ou les données.

L'ajustement peut comporter une ordonnée à l'origine libre pour tenir compte d'un instant de déclenchement décalé. Il ne faut pas forcer la droite à passer par l'origine uniquement parce qu'une formule idéale le suggère, sans vérifier que l'origine des temps et la tension de référence correspondent réellement au protocole. Une hypothèse imposée lors du traitement peut créer une apparente confirmation.

6. Incertitudes, dispersion et compatibilité

Une valeur mesurée n'est pas une connaissance exacte de la grandeur. La répétition de mesures peut renseigner la dispersion ; la résolution de l'appareil, son étalonnage, les conditions et la méthode contribuent aussi à l'incertitude. Une série très resserrée n'exclut pas un biais commun. Dix lectures avec une règle dont l'origine est décalée peuvent être reproductibles et pourtant systématiquement trop grandes.

On peut comparer deux résultats x_1 et x_2 assortis d'incertitudes-types u_1 et u_2. Si les contributions sont indépendantes, l'incertitude-type de leur différence est $\sqrt{(u_1^2 + u_2^2)}$. Le rapport $|x_1 - x_2|/\sqrt{(u_1^2 + u_2^2)}$ quantifie alors l'écart relativement à cette échelle. Il aide à discuter la compatibilité dans le cadre des hypothèses choisies. Il ne remplace pas une analyse des biais ni une règle de décision préalablement annoncée.

Prenons 2,00 s avec $u_1 = 0{,}03$ s et 2,08 s avec $u_2 = 0{,}04$ s. L'écart vaut 0,08 s et l'incertitude-type de la différence 0,05 s ; le rapport vaut 1,6. On peut dire que l'écart est de 1,6 fois cette incertitude combinée. On ne peut pas annoncer une probabilité exacte de vérité du modèle à partir de ce seul nombre. Une conclusion dépend notamment de la signification des incertitudes et du cadre statistique retenu.

La corrélation change le calcul. Si les deux résultats utilisent le même instrument et le même étalonnage, une partie de leur erreur peut être commune. Cette contribution peut s'annuler dans une différence ou s'ajouter dans une somme. La quadrature indépendante n'est donc pas une formule à appliquer automatiquement à toutes les situations. Au niveau d'un exercice, on suit les hypothèses données ; dans une étude réelle, on demande d'où viennent les incertitudes.

7. Vérifier les dimensions et les comportements limites

Une équation ne peut additionner que des grandeurs de même dimension. Dans l'expression $m\,g\,h + m\,v^2/2$, les deux termes sont des énergies. Dans une proposition $m\,g + m\,v^2/2$, une force serait additionnée à une énergie : l'erreur est détectable sans connaître les valeurs numériques. Une vérification dimensionnelle ne prouve pas une formule, car plusieurs expressions différentes peuvent avoir la même dimension ; elle élimine néanmoins de nombreuses possibilités incorrectes.

Les arguments d'une exponentielle, d'un logarithme ou d'une fonction trigonométrique doivent être sans dimension dans les modèles usuels. Dans e^(−t/τ), le rapport de deux temps répond à cette condition. Dans cos(2π f t), le produit de la fréquence par le temps est également sans dimension. Une écriture e^(−t) n'est complète que si une échelle temporelle ou une convention d'unité a été rendue explicite.

Les limites constituent un second filtre. Si une résistance à l'écoulement augmente, le débit ne devrait pas augmenter dans un modèle où la différence de pression reste fixée. Si la durée d'une charge RC tend vers zéro, la tension doit retrouver sa valeur initiale. Si une distance d'observation augmente pour une source isotrope idéale, l'intensité reçue doit diminuer. Ces raisonnements simples s'appuient sur des conditions maintenues constantes ; sans elles, la comparaison perd son sens.

La vérification doit porter aussi sur les valeurs extrêmes qui rendent le modèle invalide. Dans une relation supposant de petits angles, prendre un angle proche de π/2 n'est pas un test physique pertinent de la formule approximative. On vérifie d'abord si la limite explorée appartient encore au domaine annoncé. Un échec hors domaine renseigne la portée du modèle, pas nécessairement son exactitude dans son domaine.

8. Une étude de documents qui garde ses preuves visibles

Une synthèse documentaire doit distinguer ce que dit une source et ce que l'on en déduit. Un tableau de rendement mesuré dans des conditions particulières ne garantit pas le même rendement sous tout climat. Une valeur nominale n'est pas une valeur minimale garantie. Un extrait historique peut expliquer l'évolution d'un concept sans fournir les données nécessaires à un calcul actuel.

Pour comparer deux documents, examinez leurs dates, leurs systèmes, leurs unités, leurs frontières de bilan et leurs incertitudes. Deux nombres différents peuvent être compatibles s'ils ne mesurent pas exactement la même grandeur. Inversement, deux nombres égaux peuvent être sans rapport s'ils concernent des conditions différentes. La première question est donc « que mesure-t-on ? », avant « lequel est plus grand ? ».

Un argument solide comporte une proposition, une preuve et une limite. Par exemple : « Dans le modèle isotrope sans absorption, doubler la distance divise l'intensité par quatre, car elle se répartit sur une aire proportionnelle au carré de la distance. Cette prévision ne décrit pas automatiquement un environnement réfléchissant. » La limite précise renforce l'argument ; elle ne l'annule pas.

Pour un oral, préparez une figure simple, une équation centrale et un exemple numérique que vous pouvez refaire. Préparez aussi une question critique : pourquoi avoir négligé telle interaction, choisi tel référentiel ou retenu telle échelle ? Une réponse expliquée à cette question montre une compréhension plus profonde qu'un calcul long récité sans possibilité de justification.

9. Exercices de synthèse corrigés

Exercice A. Une masse fictive de 0,40 kg descend sans frottement d'une hauteur de 1,8 m, puis comprime un ressort horizontal de raideur 160 $N \cdot m^{-1}$. Avec $g = 10\ m \cdot s^{-2}$, l'énergie disponible vaut 7,2 J. À compression maximale, la vitesse est nulle et $k\,x^2/2 = 7{,}2$, donc $x = 0{,}30$ m. Cette réponse suppose que la hauteur ne change plus pendant la compression et que toute l'énergie considérée devient énergie élastique.

Si 1,8 J sont dissipés avant la compression, l'énergie élastique maximale n'est plus que 5,4 J. On trouve $x = \sqrt{(10{,}8/160)}$, environ

0,260 m. La compression ne baisse pas dans la même proportion que l'énergie, car elle intervient au carré. Cette comparaison explique pourquoi un contrôle proportionnel trop intuitif pourrait être erroné.

Exercice B. Un capteur reçoit deux sources sonores indépendantes dont les intensités valent chacune $4{,}0 \times 10^{-6}$ W·m⁻². Avec $I_0 = 10^{-12}$ W·m⁻², chaque niveau est environ 66,0 dB. L'intensité totale est $8{,}0 \times 10^{-6}$ W·m⁻² et le niveau environ 69,0 dB. Additionner les niveaux pour obtenir 132 dB serait faux. Les intensités s'additionnent dans cette hypothèse ; les niveaux logarithmiques se calculent ensuite.

Exercice C. Un faisceau de 450 nm transporte une puissance de 1,0 mW. Un dispositif ne convertit en signal utile que 20 % des photons reçus, dans un modèle où chacun donne un événement. L'énergie individuelle vaut environ $4{,}41 \times 10^{-19}$ J, le débit incident $2{,}27 \times 10^{15}$ s⁻¹ et le débit utile $4{,}53 \times 10^{14}$ s⁻¹. L'efficacité de comptage n'est pas automatiquement le rendement énergétique du dispositif : il faudrait connaître l'énergie et les pertes associées au signal produit.

Exercice D. Deux modèles prévoient une tension initiale de 8 V : le premier u = 8 e^(−t/2), le second u = 8 − 2 t. À t = 0,5 s, ils donnent environ 6,23 V et 7,0 V. À t = 4 s, le second donne zéro puis devient négatif, ce qui contredit un modèle de décharge passive dont la tension resterait positive. Une approximation linéaire peut être locale ; la prolonger indéfiniment produit une fausse prédiction.

10. Une méthode de révision qui reconstruit le raisonnement

Après un exercice, classez les erreurs selon leur origine : compréhension de la question, système et hypothèses, choix de loi, projection ou signe, manipulation algébrique, conversion, calcul, interprétation. Cette classification permet de choisir une action précise. Refaire dix applications numériques ne corrige pas une confusion entre accélération et vitesse ; il faut alors travailler les graphes et les définitions.

Révisez en alternant des exercices proches et des situations nouvelles. Les premiers stabilisent une technique ; les secondes vérifient que vous savez reconnaître quand elle s'applique. Expliquer un contre-exemple est particulièrement utile : pourquoi l'énergie mécanique n'est-elle pas conservée dans ce système, pourquoi cette loi de débit ne convient-elle pas, pourquoi un logarithme ne peut-il pas recevoir cette grandeur sans référence ?

Une résolution finale doit pouvoir être suivie sans deviner une convention cachée. Elle nomme les symboles, annonce les hypothèses, enchaîne les relations et conclut dans l'unité demandée. Elle ne promet pas plus que les données ne permettent. Cette exigence donne une unité au guide : le calcul est un outil puissant lorsqu'il reste accompagné d'une compréhension du système, du modèle et de la preuve.

Références de cadrage

Programme français de spécialité physique-chimie de Terminale, cadre des compétences expérimentales, de modélisation et de communication ; cas et exercices originaux LFDP : https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm

Brochure du Système international d'unités, BIPM, pour les dimensions et les conventions d'unités : https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/

Annexes - Problèmes transversaux et réponses argumentées

A. Mesurer g avec un modèle de pendule : complément méthodologique

Dans un complément fondé sur le modèle du pendule simple à petites oscillations, la période vaut $T = 2\pi\sqrt{(L/g)}$. Le fil est supposé de masse négligeable, la masse mobile assimilée à un point, les frottements négligés et l'amplitude suffisamment faible. Ce modèle n'est pas une définition universelle de tout pendule. Un objet étendu ou une grande amplitude peut demander une autre expression.

Une mesure fictive donne L = 0,640 m et T = 1,60 s. Isoler la grandeur cherchée conduit à $g = 4\pi^2L/T^2$, soit environ 9,87 $m\cdot s^{-2}$. Le calcul dimensionnel donne m/s^2, comme attendu. Doubler T avec L fixé diviserait g calculé par quatre ; cela exprime la dépendance de l'estimation, non une manière de modifier la gravité en changeant la mesure.

Pour une première approximation d'incertitude avec contributions indépendantes, prenons u(L) = 0,005 m et u(T) = 0,02 s. L'incertitude relative combinée est $\sqrt{[(u(L)/L)^2 + (2u(T)/T)^2]}$, environ 0,0262. On obtient $u(g) \approx 0{,}26\ m\cdot s^{-2}$. Le facteur deux devant l'incertitude relative de T provient de la puissance T^{-2}. L'oublier conduirait à sous-estimer cette contribution.

Comparer le résultat à une référence de 9,81 $m\cdot s^{-2}$ ne demande pas de les déclarer égaux. L'écart vaut environ 0,06 $m\cdot s^{-2}$, petit devant l'incertitude-type annoncée dans cet exemple. Cette compatibilité ne prouve pas l'absence de biais. On vérifierait notamment la définition de L, le chronométrage de plusieurs périodes, l'amplitude et les conditions d'oscillation. L'amélioration

consiste à agir sur une cause identifiée, pas à ajouter des décimales.

B. Déterminer une masse volumique par pesée apparente

Un solide fictif de masse 0,240 kg est entièrement immergé dans un liquide de masse volumique 1 000 kg·m^{-3}. Un dispositif mesure une force de traction verticale de 1,60 N lorsque le solide est immobile, sans contact avec le récipient. Avec g = 10 m·s^{-2}, le poids vaut 2,40 N. L'équilibre impose traction plus poussée égale au poids : la poussée vaut donc 0,80 N.

La relation d'Archimède donne le volume immergé V = 0,80/(1 000 × 10) = 8,0 × 10^{-5} m^3, soit 80 cm^3. Puisque le solide est entièrement immergé, cette valeur est son volume dans le modèle. Sa masse volumique vaut 0,240/(8,0 × 10^{-5}) = 3 000 kg·m^{-3}. Le résultat est supérieur à celui du liquide, ce qui est cohérent avec le besoin d'une traction pour le maintenir.

Si l'objet était partiellement immergé, le même calcul donnerait seulement le volume de la partie immergée. Si une bulle adhérait à l'objet, si le fil exerçait une autre action ou si le solide touchait le fond, le bilan serait modifié. La formule utilisée n'est pas fausse ; les grandeurs qui y entrent ne correspondraient plus au modèle annoncé.

Cet exercice distingue trois opérations : une loi d'équilibre donne une force, une relation de poussée donne un volume et une définition donne une masse volumique. Mélanger ces étapes peut masquer une hypothèse. Les écrire séparément permet de contrôler chacune et d'expliquer le résultat oralement.

C. Une caractéristique électrique ne suffit pas à connaître une énergie

Un dispositif fictif délivre une tension constante de 4,0 V à une intensité de 0,50 A pendant trois minutes. La puissance électrique vaut 2,0 W et l'énergie transférée 360 J, car trois minutes correspondent à 180 secondes. La charge transférée vaut 90 C. La relation énergie = tension × charge retrouve 360 J dans ces conditions de tension constante.

Supposons maintenant que la tension reste constante mais que l'intensité décroisse comme i(t) = 0,50 e^(−t/60), avec t en secondes. L'énergie sur les mêmes 180 secondes vaut l'intégrale de 4 i(t), soit 120(1 − e⁻³) J, environ 114 J. Multiplier la puissance initiale par la durée donnerait 360 J et surestimerait fortement le transfert. Une puissance initiale n'est pas une puissance moyenne.

La puissance moyenne sur cette durée est environ 0,633 W. Cette moyenne ne signifie pas que le dispositif a réellement fourni cette puissance à chaque instant. Elle produit le même bilan global d'énergie sur l'intervalle étudié. L'intégrale décrit l'accumulation ; la fonction décrit l'évolution locale.

Avant d'utiliser des indications commerciales de batterie ou de chargeur, on distinguerait puissance, énergie, tension nominale, capacité en charge et conditions de fonctionnement. L'exercice n'établit aucune autonomie d'un appareil réel. Il apprend à demander les informations nécessaires plutôt qu'à convertir une valeur isolée en promesse d'usage.

D. Un problème inverse peut admettre plusieurs explications

Une intensité sonore diminue lorsque le récepteur s'éloigne. Cette observation peut être compatible avec une répartition géométrique sur des surfaces croissantes, une absorption du milieu, une orientation de la source ou une combinaison de ces effets. Connaître deux valeurs ne suffit pas toujours à identifier séparément les contributions.

Dans le modèle isotrope sans absorption, $I(r) = P/(4\pi r^2)$. Si l'intensité à deux mètres vaut $2{,}0 \times 10^{-6}$ W·m^{-2}, la prévision à quatre mètres est $5{,}0 \times 10^{-7}$ W·m^{-2}. Une mesure de cette valeur est compatible avec le modèle, mais un modèle plus compliqué pourrait aussi la reproduire avec certains paramètres. La compatibilité n'est pas l'unicité de l'explication.

Pour distinguer les modèles, on multiplie les distances d'observation, on conserve les autres conditions, on examine les directions et on évalue les incertitudes. On recherche une prédiction différente entre les hypothèses. Une nouvelle donnée utile n'est pas seulement une répétition au même endroit ; elle peut être choisie pour départager les mécanismes proposés.

Ce raisonnement vaut aussi pour une courbe de refroidissement, une trajectoire ou un spectre. Un ajustement réussi montre que le modèle reproduit certaines données avec certains paramètres. Une mise à l'épreuve plus exigeante vérifie des données qui n'ont pas servi à choisir ces paramètres. La distinction évite d'appeler validation une simple adaptation aux observations déjà utilisées.

E. Comparer deux estimations d'une énergie lumineuse

Un faisceau monochromatique fictif de 500 nm délivre 0,50 mJ. Une première méthode utilise la puissance moyenne connue pendant la durée ; une seconde compte un nombre estimé de photons. L'énergie du photon est environ $3{,}97 \times 10^{-19}$ J. Le nombre associé à 0,50 mJ vaut donc environ $1{,}26 \times 10^{15}$.

Si le comptage corrigé des pertes donne $1{,}20 \times 10^{15}$ photons, son estimation énergétique vaut environ 0,477 mJ. Les valeurs ne sont pas identiques. Avant de conclure à une contradiction, on examinerait les incertitudes du comptage et de la mesure de puissance, le caractère monochromatique de la source et la définition de la durée. Le calcul seul ne donne pas leur compatibilité si les incertitudes ne sont pas fournies.

Une correction de détection doit être liée à une efficacité connue dans les conditions considérées. Diviser arbitrairement le nombre mesuré par un pourcentage choisi pour retrouver l'énergie souhaitée serait circulaire. On doit pouvoir expliquer comment l'efficacité a été déterminée et si elle dépend de la longueur d'onde ou du flux.

L'exercice relie une énergie macroscopique et une description microscopique. Il ne confond pas nombre de photons, puissance et énergie individuelle. La même énergie totale peut être répartie entre davantage de photons moins énergétiques ou moins de photons plus énergétiques ; le spectre détermine cette répartition.

F. Lire une critique et améliorer une réponse

Réponse initiale : « La vitesse est constante parce que la résultante est nulle. » Cette phrase est correcte si elle désigne le vecteur vitesse dans un référentiel galiléen et si les conditions du modèle sont réunies. Si le contexte ne précise pas le référentiel, la justification est incomplète. Si elle désigne seulement la norme de la vitesse, elle peut être mal utilisée dans un mouvement circulaire où la résultante est non nulle malgré une norme constante.

Réponse améliorée : « Dans le référentiel galiléen choisi, la résultante des forces est nulle ; la deuxième loi de Newton donne donc une accélération nulle et un vecteur vitesse constant. » Elle est légèrement plus longue, mais chaque précision joue un rôle. Ajouter ensuite toutes les formules du chapitre n'apporterait pas nécessairement une meilleure réponse.

Réponse initiale : « Le rendement est de 80 %, donc 20 % de l'énergie disparaît. » La seconde partie est incorrecte. L'énergie non utile au critère retenu peut être transférée sous d'autres formes ou à d'autres systèmes. Une formulation correcte précise l'énergie d'entrée, l'énergie utile et la frontière du bilan. L'échec n'est pas arithmétique ; il vient de l'interprétation de la conservation.

Réponse initiale : « Les résultats sont proches, donc le modèle est vrai. » La proximité doit être comparée à une incertitude et à un critère de décision. Même une bonne compatibilité ne transforme pas un modèle en description exhaustive. Une conclusion défendable peut être : « Les données fournies ne mettent pas en évidence d'écart significatif selon le critère et les incertitudes annoncés. » La nuance est une exigence de preuve, pas un manque de confiance.

G. Préparer un oral avec une question qui ouvre une discussion

Choisissez un problème assez limité pour être expliqué sans cacher les hypothèses. Une question comme « Pourquoi une vitesse limite apparaît-elle dans un modèle de chute avec frottement ? » permet de présenter un système, une force, une équation différentielle, une solution et une comparaison au cas sans frottement. Elle ouvre aussi une discussion sur le choix d'un frottement linéaire ou quadratique.

Préparez un dessin où les forces et les axes sont identifiables, puis une équation centrale dont chaque terme possède un sens. Une illustration numérique doit être annoncée comme fictive si elle l'est. Une courbe doit avoir des axes et des unités. La présentation ne doit pas laisser croire qu'une simulation du modèle serait une mesure expérimentale.

Anticipez trois questions : quel phénomène avez-vous négligé, quelle donnée pourrait contredire votre modèle et quelle conclusion demeure valable si un paramètre change ? Ces questions conduisent à distinguer la structure du raisonnement et son exemple numérique. Elles permettent de montrer une maîtrise transférable au lieu d'une récitation.

H. Évaluer sa compréhension sans se donner une note automatique

Pour un chapitre, tentez de définir une notion, de justifier une relation, de refaire un calcul et de proposer un cas où la relation ne s'applique plus. Si l'une de ces tâches échoue, identifiez ce qui manque : vocabulaire, représentation, manipulation ou compréhension des hypothèses. Le diagnostic détermine une révision ciblée.

Une impression de familiarité pendant la lecture n'est pas une preuve de maîtrise. Relire une correction peut sembler facile parce que les étapes sont déjà choisies. Résoudre un énoncé nouveau, expliquer un signe ou critiquer une réponse fautive fournit une information plus exigeante. L'effort demandé ne doit pas être confondu avec la longueur de la copie.

Le guide offre des outils de travail et des corrections, mais sa lecture ne garantit aucune note d'examen. Pour apprécier votre progrès, expliquez une méthode sans la recopier, contrôlez un résultat par une autre voie et identifiez les limites du modèle. La clarté d'une explication, l'exactitude d'un calcul et la pertinence des hypothèses se complètent sans se remplacer.