



Fiche : Interactions fondamentales et notion de champ

FICHE • P01 • PREMIÈRE

Spécialité de première, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	3

L'essentiel

- Il existe quatre interactions fondamentales : gravitationnelle, électromagnétique, forte et faible.
- La charge électrique est quantifiée (multiple de $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C) et conservée ; électriser un corps, c'est déplacer des électrons.
- La loi de Coulomb donne la force entre deux charges ponctuelles : elle est attractive pour des charges de signes contraires, répulsive pour des charges de même signe.
- La loi de la gravitation universelle donne la force entre deux masses : elle est toujours attractive.
- Les deux lois ont la même forme en $1/d^2$, mais à l'échelle des particules la force électrostatique est environ 10^{39} fois plus intense que la force gravitationnelle.
- Les deux forces d'une interaction sont opposées : même droite d'action, même valeur, sens contraires.
- Un astre à symétrie sphérique agit à l'extérieur comme si toute sa masse était en son centre : on mesure les distances depuis le centre.
- Le champ électrostatique en un point est défini par $\vec{E} = \vec{F}/q$; il ne dépend pas de la charge test.
- Une charge positive subit une force dans le sens du champ, une charge négative une force de sens opposé.
- Le champ de gravitation est défini par $\vec{g} = \vec{F}/m$; près de la Terre, il se confond avec le champ de pesanteur, uniforme à petite échelle.
- Une ligne de champ est tangente au champ en chacun de ses points et orientée dans son sens ; deux lignes ne se coupent jamais.
- Les lignes de champ électrostatique partent des charges positives et aboutissent aux charges négatives ; plus elles sont serrées, plus le champ est intense.
- Un champ uniforme a des lignes parallèles et également espacées.



- Entre deux plaques parallèles soumises à une tension U , le champ est uniforme, perpendiculaire aux plaques, dirigé de la plaque + vers la plaque -, de valeur U/d .
- La cohésion du noyau est due à l'interaction forte, celle des atomes, molécules et solides à l'interaction électromagnétique, celle des systèmes astronomiques à la gravitation.
- La gravitation domine à grande échelle parce que la matière est globalement neutre et que la gravitation, toujours attractive, ne peut pas être compensée.

Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Unité	Condition de validité
Force de Coulomb	$F = k \times qA \times qB / d^2$, en valeur absolue	N	charges ponctuelles, immobiles
Constante de Coulomb	$k = 1/(4\pi \epsilon_0) \approx 8,99 \times 10^9$	$N \cdot m^2 \cdot C^{-2}$	vide ou air
Force de gravitation	$F = G \times mA \times mB / d^2$	N	corps ponctuels ou à symétrie sphérique
Constante de gravitation	$G = 6,67 \times 10^{-11}$	$N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}$	universelle
Champ électrostatique	$E \rightarrow = F \rightarrow / q$	$V \cdot m^{-1} (= N \cdot C^{-1})$	en tout point
Champ d'une charge ponctuelle	$E = k \times Q / r^2$, en valeur absolue	$V \cdot m^{-1}$	r distance à la charge
Champ de gravitation	$g \rightarrow = F \rightarrow / m$	$N \cdot kg^{-1} (= m \cdot s^{-2})$	en tout point
Champ d'un astre	$g = G \times M / r^2$	$N \cdot kg^{-1}$	r supérieur ou égal au rayon R
Champ en altitude	$g(h) = g_0 \times R^2 / (R + h)^2$	$N \cdot kg^{-1}$	astre à symétrie sphérique
Champ entre deux plaques	$E = U / d$	$V \cdot m^{-1}$	loin des bords des plaques
Charge élémentaire	$e = 1,60 \times 10^{-19}$	C	$q = n \times e$

Pièges à éviter

- Oublier de convertir μC , nC , cm ou km en unités SI avant de calculer.
- Utiliser l'altitude h au lieu de la distance au centre $R + h$.
- Garder un signe négatif dans la valeur d'une force : la valeur est toujours positive, le signe des charges sert seulement au sens.
- Donner à la force subie par un électron le sens du champ : pour une charge négative, elle est opposée.
- Orienter le champ entre les plaques de la plaque - vers la plaque + : c'est l'inverse.



- Confondre champ ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ou $\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$) et force (N).
- Dessiner des lignes de champ qui se croisent.

Je me teste

1. $|E = k \times Q / r^2|$, en valeur absolue $| \text{V}\cdot\text{m}^{-1} |$ r distance à la charge |ue devient la force de Coulomb si la distance est doublée ? → Elle est divisée par 4.
2. $|E = k \times Q / r^2|$, en valeur absolue $| \text{V}\cdot\text{m}^{-1} |$ r distance à la charge |uel est le sens de la force gravitationnelle entre deux masses ? → Toujours attractive.
3. Valeur de la charge élémentaire ? → $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$.
4. Unité du champ électrostatique ? → Le $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$, équivalent au $\text{N}\cdot\text{C}^{-1}$.
5. Sens de la force sur un électron dans un champ $E \rightarrow$? → Opposé au champ.
6. Champ entre deux plaques distantes de 5,0 mm sous 10 V ? → $E = 10 / 5,0 \times 10^{-3} = 2,0 \times 10^3 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$.
7. Vers quelle plaque se dirige un cation entre deux plaques chargées ? → Vers la plaque négative.
8. Valeur du champ de pesanteur au sol ? → Environ $9,81 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$.
9. $|E = k \times Q / r^2|$, en valeur absolue $| \text{V}\cdot\text{m}^{-1} |$ r distance à la charge |uelle interaction assure la cohésion du noyau ? → L'interaction forte.
10. Pourquoi la gravitation domine-t-elle à l'échelle des astres ? → La matière est globalement neutre, les forces électriques se compensent.



Fiche : Description d'un mouvement et principe d'inertie

FICHE • P02 • PREMIÈRE

Spécialité de première, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	3

L'essentiel

- Le système est l'objet étudié, souvent modélisé par un point matériel qui porte toute sa masse.
- Le référentiel est l'objet de référence, muni d'un repère et d'une horloge : terrestre, géocentrique ou héliocentrique.
- La trajectoire et la vitesse dépendent du référentiel : c'est la relativité du mouvement.
- Le vecteur position $\overrightarrow{OM}$ a pour coordonnées $(x ; y)$; une chronophotographie donne les positions à intervalles de temps égaux.
- Le vecteur vitesse au point M s'obtient par $\vec{v} \approx \overrightarrow{MM_{t+\Delta t}} / \Delta t$; il est tangent à la trajectoire et orienté dans le sens du mouvement.
- Un mouvement est rectiligne, circulaire ou curviligne selon la trajectoire, et uniforme, accéléré ou ralenti selon la valeur de la vitesse.
- Dans un mouvement circulaire uniforme, la valeur de la vitesse est constante mais le vecteur vitesse change de direction.
- Le vecteur variation de vitesse est $\Delta \vec{v} = \vec{v}(t_{i+1}) - \vec{v}(t_i)$.
- Pour une masse constante et une durée courte, $m \times \Delta \vec{v} / \Delta t \approx \Sigma \vec{F}$: la somme des forces a la direction et le sens de $\Delta \vec{v}$.
- La masse mesure l'inertie : à somme des forces égale, plus la masse est grande, plus la vitesse varie lentement.
- Principe d'inertie : dans un référentiel galiléen, un système est immobile ou en mouvement rectiligne uniforme si et seulement si les forces qui s'exercent sur lui se compensent.
- Contraposée : si la trajectoire est courbe ou si la valeur de la vitesse varie, la somme des forces n'est pas nulle.
- Une force sert à modifier un mouvement, pas à l'entretenir.
- Le référentiel terrestre est considéré comme galiléen pour des expériences courtes ; un véhicule qui freine ou tourne ne l'est pas.



- Les forces usuelles sont le poids, la réaction d'un support (normale et frottement), la tension d'un fil et les frottements fluides.
- Deux forces d'actions réciproques s'exercent sur deux systèmes différents et ne se compensent jamais dans un même bilan.

Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Unité	Condition de validité
Vecteur vitesse	$\vec{v} \approx \Delta \vec{M} / \Delta t$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Δt petit
Valeur de la vitesse	$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	mouvement plan
Conversion	$1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 3,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$		
Vitesse circulaire	$v = 2\pi R f$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	f en tours par seconde
Variation de vitesse	$\Delta \vec{v} = \vec{v}(t_1) - \vec{v}(t_0)$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
Lien forces et vitesse	$m \times \Delta \vec{v} / \Delta t \approx \Sigma \vec{F}$	N	masse constante, Δt petit, référentiel galiléen
Poids	$P = m \times g$	N	$g \approx 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$ sur Terre
Poids sur un plan incliné	$m g \sin \alpha$ le long de la pente, $m g \cos \alpha$ perpendiculairement	N	pente d'angle α
Projection d'une force	$F_x = F \cos \theta, F_y = F \sin \theta$	N	θ angle avec (Ox)

Pièges à éviter

- Parler d'immobilité ou de vitesse sans préciser le référentiel.
- Croire qu'un mouvement circulaire à vitesse de valeur constante a une somme des forces nulle.
- Ajouter une « force du lancer » à un objet qui n'est plus en contact avec le lanceur.



- Orienter la somme des forces comme la vitesse : elle est orientée comme $\Delta v \rightarrow$.
- Écrire $R_N = P$ sur un plan incliné.
- Mettre deux forces d'actions réciproques dans le même bilan.
- Oublier de convertir cm en m et ms en s dans un calcul de vitesse.

Je me teste

1. Qu'est-ce qu'un référentiel ? $\rightarrow$ Un objet de référence muni d'un repère et d'une horloge.
2. Direction du vecteur vitesse ? $\rightarrow$ Tangente à la trajectoire.
3. Points alignés et équidistants sur une chronophotographie ? $\rightarrow$ Mouvement rectiligne uniforme.
4. Énoncé du principe d'inertie ? $\rightarrow$ Dans un référentiel galiléen, forces compensées équivalent à repos ou mouvement rectiligne uniforme.
5. Une voiture prend un virage à vitesse constante : forces compensées ? $\rightarrow$ Non, la direction de la vitesse change.
6. Sens de $\Sigma F \rightarrow$ pour une balle qui monte verticalement ? $\rightarrow$ Vers le bas, comme $\Delta v \rightarrow$.
7. Vitesse de 2,0 tours par seconde sur un cercle de 0,50 m de rayon ? $\rightarrow v = 2\pi \times 0,50 \times 2,0 = 6,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
8. Composante du poids le long d'une pente d'angle α ? $\rightarrow m g \sin \alpha$.
9. Parachutiste à vitesse constante, frottement de l'air ? $\rightarrow$ Égal au poids.
10. Un bus qui freine est-il un référentiel galiléen ? $\rightarrow$ Non.



Fiche : Énergie mécanique : travail, énergie cinétique et potentielle

FICHE • P03 • PREMIÈRE

Spécialité de première, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	3

L'essentiel

- L'énergie cinétique d'un système de masse m et de vitesse v vaut $\frac{1}{2} m v^2$; elle varie comme le carré de la vitesse.
- Le travail d'une force constante sur un déplacement rectiligne AB est le produit scalaire $\vec{F} \cdot \vec{AB} = F \times AB \times \cos \alpha$.
- Le travail est moteur si l'angle entre la force et le déplacement est inférieur à 90° , nul à 90° , résistant au-delà.
- Une force perpendiculaire au déplacement, comme la réaction normale d'un support fixe ou la tension d'un fil de pendule, ne travaille pas.
- Le travail du poids vaut $m g (z_A - z_B)$: moteur à la descente, résistant à la montée, indépendant du chemin suivi.
- Le travail d'une force de frottement de valeur constante vaut $-f \times L$: toujours résistant, il dépend de la longueur du trajet.
- Une force est conservative si son travail ne dépend pas du chemin suivi : le poids et la force électrique dans un champ uniforme le sont, les frottements ne le sont pas.
- Le théorème de l'énergie cinétique énonce que, dans un référentiel galiléen, la variation de E_c entre A et B est égale à la somme des travaux des forces appliquées.
- L'énergie potentielle de pesanteur vaut $m g z$, avec un axe vertical vers le haut et une origine choisie ; seules ses variations ont un sens physique.
- Le travail du poids est l'opposé de la variation d'énergie potentielle de pesanteur.
- L'énergie mécanique est la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle.
- La variation de l'énergie mécanique est égale au travail des forces non conservatives.
- Si aucune force non conservative ne travaille, l'énergie mécanique se conserve : E_c et E_{pp} s'échangent.

- Les frottements dissipent de l'énergie mécanique, transférée principalement sous forme thermique ; l'énergie totale se conserve toujours.
- Une charge q accélérée par une tension U reçoit le travail $q \times U$, qui devient de l'énergie cinétique.

Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Unité	Condition de validité
Énergie cinétique	$E_c = \frac{1}{2} m v^2$	J	point matériel
Travail d'une force	$W = F \times AB \times \cos \alpha$	J	force constante, trajet rectiligne
Travail du poids	$W(P) = m g (z_A - z_B)$	J	axe vertical vers le haut, g uniforme
Travail d'un frottement	$W(f) = -f \times L$	J	f de valeur constante, opposée au mouvement
Travail d'une force électrique	$W = q \times U$	J	champ uniforme
Théorème de l'énergie cinétique	$E_c(B) - E_c(A) = \text{somme des travaux}$	J	référentiel galiléen
Énergie potentielle de pesanteur	$E_{pp} = m g z$	J	dénivelé faible, origine choisie
Énergie mécanique	$E_m = E_c + E_{pp}$	J	
Bilan d'énergie mécanique	$\Delta E_m = W(\text{forces non conservatives})$	J	
Vitesse après une chute h	$v = \sqrt{2 g h}$	$m \cdot s^{-1}$	départ sans vitesse, sans frottement
Puissance	$P = W / \Delta t$	W	valeur moyenne

Pièges à éviter

- Oublier le carré de la vitesse ou la conversion des $km \cdot h^{-1}$ en $m \cdot s^{-1}$.
- Inverser le signe du travail du poids : c'est départ moins arrivée.
- Compter le poids deux fois, dans E_{pp} et dans le travail des forces non conservatives.
- Attribuer un travail à la réaction normale ou à la tension d'un fil de pendule.



- Prendre l'angle avec l'horizontale au lieu de l'angle entre la force et le déplacement.
- Dire que l'énergie « disparaît » : elle est dissipée sous forme thermique.

Je me teste

1. Que devient E_c si la vitesse triple ? → Elle est multipliée par 9.
2. Travail d'une force perpendiculaire au déplacement ? → Nul.
3. Travail du poids pour une descente de 10 m d'un objet de 2,0 kg ? → $W = 2,0 \times 9,81 \times 10 = 196 \text{ J}$, moteur.
4. Le travail d'un frottement dépend-il du chemin ? → Oui, il est proportionnel à la longueur du trajet.
5. Énoncé du théorème de l'énergie cinétique ? → $\Delta E_c = \text{somme des travaux des forces extérieures, en référentiel galiléen.}$
6. Quand l'énergie mécanique se conserve-t-elle ? → Quand aucune force non conservative ne travaille.
7. Vitesse d'un objet lâché de 5,0 m sans frottement ? → $v = \sqrt{2 \times 9,81 \times 5,0} = 9,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
8. Où passe l'énergie mécanique perdue par frottement ? → En transfert thermique vers l'environnement.
9. Énergie reçue par un électron sous 1,0 kV ? → $e \times U = 1,6 \times 10^{-16} \text{ J}$.
10. Epp peut-elle être négative ? → Oui, sous l'origine des altitudes choisie.



Fiche : Énergie électrique : circuits, puissance et rendement

FICHE • P04 • PREMIÈRE

Spécialité de première, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	3

L'essentiel

- Un courant électrique est un déplacement d'ensemble de porteurs de charge : électrons dans les métaux, ions dans les solutions.
- Le sens conventionnel du courant va de la borne + vers la borne - à l'extérieur du générateur ; les électrons circulent en sens inverse.
- L'intensité est un débit de charge, $I = Q / \Delta t$, mesurée par un ampèremètre branché en série.
- La tension entre deux points est une différence de potentiel, $U(AB) = V(A) - V(B)$, mesurée par un voltmètre branché en dérivation.
- La loi des nœuds traduit la conservation de la charge : ce qui arrive à un nœud en repart.
- La loi des mailles énonce que la somme algébrique des tensions le long d'une maille est nulle.
- En série, les dipôles ont la même intensité et les tensions s'additionnent ; en dérivation, ils ont la même tension et les intensités s'additionnent.
- Un conducteur ohmique vérifie $U = R I$; en série les résistances s'additionnent, en dérivation leurs inverses s'additionnent.
- Une source réelle se modélise par une source idéale E en série avec une résistance interne r : $U = E - r I$.
- L'intensité de court-circuit d'une source réelle vaut E / r .
- La puissance électrique d'un dipôle vaut $P = U I$ et l'énergie transférée vaut $E = P \Delta t$.
- Le kilowattheure est une unité d'énergie : $1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$; l'ampère-heure est une unité de charge : $1 \text{ A} \cdot \text{h} = 3\,600 \text{ C}$.
- L'effet Joule convertit l'énergie électrique en transfert thermique ; dans un résistor, $P = R I^2 = U^2 / R$.
- Le transport de l'électricité sous haute tension réduit l'intensité, donc les pertes Joule, qui varient comme I^2 .



- Pour un générateur réel, $E I = U I + r I^2$: puissance produite = puissance fournie + pertes internes.
- Le rendement d'une conversion est $\eta = P(\text{utile}) / P(\text{reçue})$, toujours inférieur à 1 ; dans une chaîne, les rendements se multiplient.

Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Unité	Condition de validité
Intensité	$I = Q / \Delta t$	A	régime continu
Tension	$U(AB) = V(A) - V(B)$	V	
Loi des nœuds	somme des I entrants = somme des I sortants	A	
Loi des mailles	somme algébrique des tensions = 0	V	maille fermée
Loi d'Ohm	$U = R I$	V	conducteur ohmique, convention récepteur
Résistances en série	$R(\text{éq}) = R_1 + R_2$	Ω	
Résistances en dérivation	$1/R(\text{éq}) = 1/R_1 + 1/R_2$	Ω	
Source réelle	$U = E - r I$	V	convention générateur
Circuit à une maille	$I = E / (R + r)$	A	source réelle et résistor R
Puissance	$P = U I$	W	
Énergie	$E = P \Delta t$	J ou kWh	puissance constante
Effet Joule	$P = R I^2 = U^2 / R$	W	conducteur ohmique
Bilan du générateur	$E I = U I + r I^2$	W	
Rendement	$\eta = P(\text{utile}) / P(\text{reçue})$	sans unité	$0 \leq \eta < 1$ pour un convertisseur réel
Chaîne de conversions	$\eta = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3$	sans unité	convertisseurs successifs

Pièges à éviter

- Additionner des résistances montées en dérivation : ce sont leurs inverses qui s'additionnent.
- Prendre $U = E$ pour une source qui débite un courant.
- Mélanger W, kW, s et h : des W et des s donnent des J, des kW et des h donnent des kWh.

- Confondre ampère-heure (charge) et wattheure (énergie).
- Croire que la puissance Joule double quand l'intensité double : elle quadruple.
- Trouver un rendement supérieur à 1 : utile et reçu ont été inversés.
- Additionner les rendements d'une chaîne au lieu de les multiplier.

Je me teste

1. Charge transportée par 2,0 A pendant 10 s ? $\rightarrow Q = 20 \text{ C}$.
2. Comment brancher un voltmètre ? $\rightarrow$ En dérivation.
3. Résistance équivalente à 6,0 Ω et 3,0 Ω en dérivation ? $\rightarrow 2,0 \Omega$.
4. Tension aux bornes d'une source $E = 9,0 \text{ V}$, $r = 2,0 \Omega$ débitant 0,50 A ? $\rightarrow U = 8,0 \text{ V}$.
5. Intensité de court-circuit de cette source ? $\rightarrow 4,5 \text{ A}$.
6. Combien de joules dans 1 kWh ? $\rightarrow 3,6 \times 10^6 \text{ J}$.
7. Puissance Joule dans 10 Ω traversé par 2,0 A ? $\rightarrow P = 10 \times 2,0^2 = 40 \text{ W}$.
8. Pourquoi transporter l'électricité sous haute tension ? $\rightarrow$ Pour réduire l'intensité et donc les pertes Joule, proportionnelles à I^2 .
9. Rendement d'un moteur recevant 50 W et fournissant 40 W ? $\rightarrow 0,80$, soit 80 %.
10. Rendement global de deux convertisseurs de 0,90 et 0,80 ? $\rightarrow 0,72$.



Fiche : Ondes mécaniques progressives

FICHE • P05 • PREMIÈRE

Spécialité de première, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	3

L'essentiel

- Une onde mécanique progressive est la propagation d'une perturbation dans un milieu matériel, avec transport d'énergie et sans transport global de matière.
- Une onde mécanique ne se propage pas dans le vide : il lui faut un milieu matériel.
- Une onde est transversale si les points du milieu bougent perpendiculairement à la propagation (corde, ola), longitudinale s'ils bougent parallèlement (ressort comprimé, son).
- La célérité v est la vitesse de propagation de la perturbation ; elle dépend du milieu, pas de l'amplitude ni de la forme de la perturbation.
- Le son va à environ $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans l'air, $1\,500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans l'eau, $1\,540 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans les tissus mous, plusieurs milliers de $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans un solide.
- Un point situé à la distance d de la source reproduit le mouvement de la source avec le retard $\tau = d / v$.
- Une onde périodique a une double périodicité : temporelle (période T) et spatiale (longueur d'onde λ).
- La longueur d'onde est la plus petite distance entre deux points qui vibrent en phase, et la distance parcourue par l'onde en une période.
- La fréquence est imposée par la source et reste la même quand l'onde change de milieu ; la longueur d'onde change alors comme la célérité.
- Deux points distants de $k\cdot\lambda$ vibrent en phase ; distants de $(k + 1/2)\cdot\lambda$, ils vibrent en opposition de phase.
- Le son est une onde longitudinale de compression et de dilatation ; l'oreille humaine perçoit de 20 Hz à 20 kHz.
- En dessous de 20 Hz ce sont des infrasons, au-dessus de 20 kHz des ultrasons (sonar, écholocation, échographie).
- Avec un écho, la durée mesurée correspond à un aller-retour : $D = v\cdot\Delta t / 2$.



- Une petite longueur d'onde, donc une fréquence élevée, permet de distinguer des détails plus fins : c'est pourquoi l'échographie utilise des mégahertz.

Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Unités	Condition
Célérité	$v = d / \Delta t$	$m \cdot s^{-1}$, m, s	milieu homogène
Retard	$\tau = d / v$	s, m, $m \cdot s^{-1}$	sans amortissement, même direction de propagation
Mouvement d'un point	$y_M(t) = y_S(t - \tau)$		sans amortissement
Fréquence	$f = 1 / T$	Hz, s	onde périodique
Longueur d'onde	$\lambda = v \cdot T = v / f$	m, $m \cdot s^{-1}$, s, Hz	onde périodique
Distance par écho	$D = v \cdot \Delta t / 2$	m, $m \cdot s^{-1}$, s	émetteur et récepteur au même endroit
Étendue d'une perturbation	$L = v \cdot \Delta t$	m	Δt : durée de passage en un point

Pièges à éviter

- Confondre la célérité de l'onde avec la vitesse des points du milieu, qui oscillent sur place.
- Croire que la longueur d'onde se conserve lors d'un changement de milieu : c'est la fréquence qui se conserve.
- Oublier le facteur 2 dans un calcul d'écho.



- Oublier de convertir μs , kHz, MHz et cm en unités SI avant le calcul.
- Recopier tel quel un profil spatial en profil temporel : la forme est retournée d'une représentation à l'autre.
- Mesurer une seule période ou une seule longueur d'onde au lieu de plusieurs.

Je me teste

1. Une onde mécanique transporte-t-elle de la matière ? → Non, elle transporte de l'énergie sans transport global de matière.
2. Le son est-il une onde transversale ou longitudinale ? → Longitudinale.
3. Retard d'un point à 3,0 m de la source si $v = 1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$? → $\tau = 2,0 \text{ s}$.
4. Relation entre λ , v et f ? → $\lambda = v / f$.
5. λ d'un son de 680 Hz dans l'air ($340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) ? → 0,50 m.
6. Quelle grandeur reste constante quand le son passe de l'air à l'eau ? → La fréquence.
7. Domaine des sons audibles par l'être humain ? → De 20 Hz à 20 kHz.
8. Deux points distants de $2,5 \lambda$? → Ils vibrent en opposition de phase.
9. Profondeur si l'écho revient après 0,20 s dans l'eau ($1\,500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) ? → 150 m.
10. Pourquoi l'échographie utilise-t-elle des fréquences élevées ? → Pour avoir une petite longueur d'onde et distinguer des détails fins.



Fiche : Lentilles minces, images et vision

FICHE • P06 • PREMIÈRE

Spécialité de première, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	2

L'essentiel

- Une lentille mince convergente, plus épaisse au centre qu'aux bords, fait converger un faisceau parallèle vers son foyer image F' .
- Le foyer objet F est le symétrique de F' par rapport au centre optique O .
- La distance focale $f' = OF'$ est positive pour une lentille convergente ; la vergence vaut $C = 1/f'$, en dioptries ($\delta = m^{-1}$), avec f' en mètres.
- Un rayon passant par O n'est pas dévié ; un rayon parallèle à l'axe ressort par F' ; un rayon passant par F ressort parallèle à l'axe.
- Deux rayons particuliers issus de B suffisent pour construire son image B' .
- Une image réelle se recueille sur un écran ; une image virtuelle se voit à travers la lentille mais ne se recueille pas.
- Avec une lentille convergente et un objet réel, l'image est virtuelle, droite et agrandie seulement si l'objet est entre F et O (loupe) ; sinon elle est réelle et renversée.
- Les distances sur l'axe sont algébriques, orientées dans le sens de la lumière : un objet réel avant la lentille a $OA < 0$.
- La relation de conjugaison relie positions de l'objet et de l'image : $1/OA' - 1/OA = 1/OF'$.
- Le grandissement $\gamma = A'B'/AB = OA'/OA$ donne le sens (signe) et la taille relative (valeur absolue) de l'image.
- Un objet à l'infini donne une image dans le plan focal image ; un objet dans le plan focal objet donne une image à l'infini.
- L'œil réduit comprend un diaphragme (iris), une lentille convergente de vergence variable (cristallin) et un écran (rétine) à distance fixe, environ 17 mm.
- L'accommodation est l'augmentation de la vergence de l'œil quand l'objet se rapproche ; elle va du punctum remotum (infini pour un œil normal) au punctum proximum (environ 25 cm).
- L'appareil photo fait la mise au point en déplaçant l'objectif, l'œil en changeant sa vergence.



Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Unité	Condition
Vergence	$C = 1/f'$	δ (m^{-1}), f' en m	lentille mince
Relation de conjugaison	$1/OA' - 1/OA = 1/OF'$	m^{-1}	conditions de Gauss, mesures algébriques
Grandissement	$\gamma = A'B'/AB = OA'/OA$	sans unité	conditions de Gauss
Lentilles accolées	$C = C_1 + C_2$	δ	centres optiques confondus
Vergence de l'œil	$C = 1/d - 1/OA$	δ	d : distance lentille-rétine

Pièges à éviter

- Oublier le signe moins de OA pour un objet réel placé avant la lentille.
- Prendre l'inverse terme à terme au lieu de calculer $1/OA'$ puis de l'inverser.
- Garder des centimètres dans un calcul de vergence en dioptries.
- Confondre le foyer objet F et le foyer image F'.
- Dire que l'œil déplace son cristallin pour faire la mise au point : c'est sa vergence qui change.
- Oublier que γ négatif signifie image renversée.

Je me teste

1. Vergence d'une lentille de focale 25 cm ? $\rightarrow 4,0 \delta$.
2. Que devient un rayon parallèle à l'axe ? $\rightarrow$ Il ressort en passant par F'.
3. Où se forme l'image d'un objet à l'infini ? $\rightarrow$ Dans le plan focal image.
4. Signe de OA pour un objet réel avant la lentille ? $\rightarrow$ Négatif.
5. $f' = 10$ cm, $OA = -20$ cm : OA' ? $\rightarrow 20$ cm.
6. Grandissement dans ce cas ? $\rightarrow -1$, image renversée de même taille.
7. Où placer l'objet pour une utilisation en loupe ? $\rightarrow$ Entre le foyer objet et la lentille.
8. Que modélise la rétine dans l'œil réduit ? $\rightarrow$ L'écran.
9. Que fait la vergence de l'œil quand un objet se rapproche ? $\rightarrow$ Elle augmente (accommodation).
10. Vergence de l'œil réduit (17 mm) au repos ? $\rightarrow$ Environ $58,8 \delta$.

Fiche : Couleurs, lumière et photon

FICHE • P07 • PREMIÈRE

Spécialité de première, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	3

L'essentiel

- Le spectre visible s'étend d'environ 400 nm (violet) à 800 nm (rouge) ; en dessous se trouve l'ultraviolet, au-dessus l'infrarouge.
- La rétine possède trois types de cônes, sensibles surtout au bleu, au vert et au rouge : la couleur perçue vient de la comparaison de leurs signaux (trichromie).
- En synthèse additive (écrans), les primaires sont rouge, vert, bleu : $R + V = \text{jaune}$, $V + B = \text{cyan}$, $R + B = \text{magenta}$, $R + V + B = \text{blanc}$.
- Deux couleurs sont complémentaires si leur superposition donne du blanc : rouge et cyan, vert et magenta, bleu et jaune.
- En synthèse soustractive (filtres, encres), les primaires sont cyan, magenta, jaune ; chacune absorbe sa couleur complémentaire.
- Jaune + cyan donne vert, jaune + magenta donne rouge, cyan + magenta donne bleu, les trois donnent noir.
- Un objet opaque a la couleur de la lumière qu'il diffuse, un objet transparent celle de la lumière qu'il transmet ; tout dépend aussi de la lumière qui l'éclaire.
- La lumière est une onde électromagnétique de célérité $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans le vide, avec $\lambda = c/\nu$.
- La lumière est aussi constituée de photons, particules de masse nulle d'énergie $E = h \cdot \nu = h \cdot c/\lambda$: c'est la dualité onde-particule.
- Plus la longueur d'onde est courte, plus le photon est énergétique ; un photon visible porte entre 1,6 eV et 3,1 eV.
- L'énergie d'un atome est quantifiée : état fondamental, états excités, énergie 0 pour l'atome ionisé.
- Une transition entre deux niveaux émet ou absorbe un photon d'énergie exactement égale à l'écart $E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}}$.
- Un corps dense et chaud donne un spectre continu ; un gaz excité à basse pression donne des raies colorées d'émission ; un gaz froid traversé par de la lumière blanche donne des raies noires d'absorption.



- Un élément absorbe aux mêmes longueurs d'onde qu'il émet, ce qui permet d'identifier les éléments présents dans l'atmosphère d'une étoile.

Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Unités	Condition
Longueur d'onde dans le vide	$\lambda = c / \nu$	m, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, Hz	onde électromagnétique dans le vide
Énergie d'un photon	$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$	J, $\text{J} \cdot \text{s}$, Hz, m	$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Électronvolt	$1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$		
Relation pratique	$E \text{ (eV)} \approx 1240 / \lambda \text{ (nm)}$	eV, nm	
Transition atomique	$E_{\text{photon}} = E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}}$	J ou eV	émission ou absorption
Nombre de photons par seconde	$N = P / E$	s^{-1} , W, J	source monochromatique
Niveaux de l'hydrogène	$E_n = -13,6 / n^2$	eV	n entier non nul

Pièges à éviter

- Confondre synthèse additive et synthèse soustractive.
- Croire qu'un objet peut diffuser une couleur absente de la lumière qui l'éclaire.



- Oublier de convertir les nanomètres en mètres dans $E = h \cdot c / \lambda$.
- Penser qu'un photon plus énergétique qu'une transition est absorbé : il faut une égalité exacte (sauf ionisation).
- Prendre l'énergie d'un niveau au lieu de la différence entre deux niveaux.
- Croire que les raies d'absorption et d'émission d'un même élément sont à des longueurs d'onde différentes.

Je me teste

1. Rouge + vert en synthèse additive ? → Jaune.
2. Couleur complémentaire du bleu ? → Jaune.
3. Filtre cyan suivi d'un filtre jaune en lumière blanche ? → Vert.
4. Couleur d'une tomate rouge éclairée en lumière verte ? → Noire.
5. Énergie d'un photon de 620 nm en eV ? → Environ 2,0 eV.
6. Valeur de la constante de Planck ? → $6,63 \times 10^{-34}$ J.s.
7. Un photon UV est-il plus ou moins énergétique qu'un photon rouge ? → Plus énergétique.
8. Énergie du photon émis entre des niveaux à -3,40 eV et -13,6 eV ? → 10,2 eV.
9. Aspect d'un spectre d'absorption ? → Fond continu coloré barré de raies noires.
10. Quel phénomène montre l'aspect particulaire de la lumière ? → L'effet photoélectrique.



Fiche : Cinématique : vecteurs vitesse et accélération

FICHE • P08 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	3

L'essentiel

- La cinématique décrit un mouvement sans en chercher les causes.
- Un mouvement se décrit toujours dans un référentiel (terrestre, géocentrique, héliocentrique), auquel on associe un repère d'espace et une horloge.
- La trajectoire et la vitesse dépendent du référentiel choisi : le mouvement est relatif.
- Le vecteur position $\overrightarrow{OM}(t) = x(t) \cdot \vec{i} + y(t) \cdot \vec{j} + z(t) \cdot \vec{k}$ donne les équations horaires du mouvement.
- Le vecteur vitesse est la dérivée du vecteur position : il est tangent à la trajectoire et orienté dans le sens du mouvement.
- Le vecteur accélération est la dérivée du vecteur vitesse : il traduit une variation de la valeur ET de la direction de la vitesse.
- On passe de l'accélération à la position par deux intégrations successives, les constantes étant fixées par les conditions initiales.
- Sur une chronophotographie, la vitesse au point M s'estime par $\overrightarrow{M_{-1}M_{+1}}$ divisé par 2τ .
- Un mouvement rectiligne uniforme a un vecteur vitesse constant et une accélération nulle.
- Un mouvement rectiligne uniformément varié a une accélération constante portée par la trajectoire.
- Le mouvement est accéléré si $\vec{a} \cdot \vec{v} > 0$ et ralenti si $\vec{a} \cdot \vec{v} < 0$.
- Dans un mouvement circulaire uniforme, la vitesse a une valeur constante mais l'accélération est centripète, de valeur v^2/R .
- Le repère de Frenet ($\vec{t}$ tangent, $\vec{n}$ normal vers l'intérieur de la courbure) sépare la variation de valeur (a_t) et le changement de direction (a_n) de la vitesse.



Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Unité	Condition de validité
Vitesse	$\vec{v} \rightarrow = d\vec{OM} \rightarrow / dt$	$m \cdot s^{-1}$	toujours
Accélération	$\vec{a} \rightarrow = d\vec{v} \rightarrow / dt = d^2\vec{OM} \rightarrow / dt^2$	$m \cdot s^{-2}$	toujours
MRU	$x = v_0 \cdot t + x_0$	m	$\vec{a} \rightarrow = 0 \rightarrow$
MRUV : vitesse	$v = a \cdot t + v_0$	$m \cdot s^{-1}$	rectiligne, a constante
MRUV : position	$x = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + x_0$	m	rectiligne, a constante
Relation sans le temps	$v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0)$	$m^2 \cdot s^{-2}$	rectiligne, a constante
Vitesse d'un MCU	$v = R \cdot \omega$	$m \cdot s^{-1}$	ω en $rad \cdot s^{-1}$
Période, fréquence	$T = 2\pi/\omega = 2\pi R/v$; $f = 1/T$; $\omega = 2\pi f$	s ; Hz ; $rad \cdot s^{-1}$	mouvement circulaire uniforme
Repère de Frenet	$\vec{a} \rightarrow = (dv/dt) \cdot \vec{t} \rightarrow + (v^2/R) \cdot \vec{n} \rightarrow$	$m \cdot s^{-2}$	mouvement circulaire (R = rayon de courbure en général)
Accélération d'un MCU	$a = v^2/R = R \cdot \omega^2$	$m \cdot s^{-2}$	centripète
Conversion	$1 m \cdot s^{-1} = 3,6 km \cdot h^{-1}$		

Pièges à éviter

- Croire qu'une vitesse de valeur constante implique une accélération nulle : c'est faux dès que la trajectoire est courbe.
- Utiliser $v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0)$ hors d'un mouvement rectiligne uniformément varié.



- Oublier les constantes d'intégration ou les conditions initiales.
- Conclure « ralenti » d'après le seul signe de a sans regarder celui de v .
- Calculer avec des $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, des cm ou des tours par minute sans convertir en unités SI.
- Confondre T , f et ω .

Je me teste

1. Que vaut le vecteur vitesse en fonction du vecteur position ? $\rightarrow$ Sa dérivée par rapport au temps : $\vec{v} = d\vec{OM}/dt$.
2. Quelle est la direction du vecteur vitesse ? $\rightarrow$ Tangente à la trajectoire, dans le sens du mouvement.
3. Accélération d'un mouvement rectiligne uniforme ? $\rightarrow$ Nulle.
4. $72 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$? $\rightarrow 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
5. Distance de freinage de $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à 0 avec $|a| = 5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$? $\rightarrow 40 \text{ m}$.
6. Direction de l'accélération d'un mouvement circulaire uniforme ? $\rightarrow$ Vers le centre (centripète).
7. Valeur de cette accélération ? $\rightarrow a = v^2/R = R\cdot\omega^2$.
8. Lien entre ω et f ? $\rightarrow \omega = 2\pi f$.
9. Que représente la composante $a_t = dv/dt$ dans le repère de Frenet ? $\rightarrow$ La variation de la valeur de la vitesse.
10. Condition pour que le mouvement soit ralenti ? $\rightarrow \vec{a} \cdot \vec{v} < 0$.



Fiche : Deuxième loi de Newton et mouvement dans un champ uniforme

FICHE • P09 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	3

L'essentiel

- Le centre de masse G d'un système est le point dont les lois de Newton décrivent le mouvement ; on modélise le système par ce point.
- Un référentiel est galiléen si le principe d'inertie y est vérifié ; le référentiel terrestre l'est pour des mouvements courts et peu étendus.
- La deuxième loi de Newton s'écrit $\Sigma \vec{F}_{\text{ext}} = d\vec{p}/dt$, soit $\Sigma \vec{F}_{\text{ext}} = m \cdot \vec{a}$ pour un système de masse constante.
- L'accélération a la direction et le sens de la somme des forces, pas forcément ceux de la vitesse.
- La démarche suit toujours le même ordre : système, référentiel, bilan des forces, loi de Newton, projection, intégration, conditions initiales.
- En chute libre, seul le poids agit, donc $\vec{a} = \vec{g}$: le mouvement ne dépend pas de la masse.
- En chute libre, le mouvement horizontal est uniforme et le mouvement vertical uniformément varié ; la trajectoire est une parabole.
- Au sommet de la trajectoire, la composante verticale de la vitesse est nulle, mais la vitesse vaut $v_0 \cdot \cos \alpha$.
- Au même niveau de départ et d'arrivée, la portée $v_0^2 \cdot \sin(2\alpha)/g$ est maximale pour $\alpha = 45^\circ$, et deux angles complémentaires donnent la même portée.
- Entre deux plaques parallèles, le champ électrique est uniforme, dirigé de la plaque + vers la plaque -, de valeur $E = U/d$.
- Une particule chargée subit $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$; son poids est négligeable, donc $\vec{a} = q \cdot \vec{E}/m$ est constant.
- Une particule entrant perpendiculairement au champ décrit une parabole, comme un projectile ; elle repart en ligne droite à la sortie des plaques.
- Dans un accélérateur linéaire, la vitesse acquise depuis le repos vaut $\sqrt{2|q|U/m}$ et ne dépend que de la tension.



- Le théorème de l'énergie cinétique et la conservation de l'énergie mécanique donnent rapidement une valeur de vitesse, mais pas la trajectoire.

Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Unité	Condition de validité
Quantité de mouvement	$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
Deuxième loi de Newton	$\Sigma \vec{F}_{\text{ext}} = m \cdot \vec{a} = \vec{G}$	N	référentiel galiléen, masse constante
Chute libre : vitesse	$v_x = v_0 \cdot \cos \alpha$; $v_z = -g \cdot t + v_0 \cdot \sin \alpha$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	poids seul, g uniforme, axe z vers le haut
Chute libre : position	$x = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t$; $z = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + v_0 \cdot \sin \alpha \cdot t + h$	m	idem
Trajectoire	$z = -g \cdot x^2 / (2v_0^2 \cos^2 \alpha) + \tan \alpha \cdot x + h$	m	$\alpha \neq 90^\circ$
Flèche	$z_S = h + v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha / (2g)$	m	chute libre
Portée	$x_P = v_0^2 \cdot \sin(2\alpha) / g$	m	arrivée au niveau du départ
Champ entre plaques	$E = U/d$	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	plaques planes parallèles, loin des bords
Force électrique	$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$	N	
Déviation en sortie	$y_S = q \cdot E \cdot L^2 / (2 \cdot m \cdot v_0^2)$, q en valeur absolue	m	v_0 perpendiculaire à $\vec{E}$, poids négligé
Vitesse dans un accélérateur	$v = \sqrt{(2qU/m)}$, q en valeur absolue	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	départ au repos, v petite devant c
Énergie cinétique	$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$; $\Delta E_c = \Sigma W$	J	référentiel galiléen
Électronvolt	$1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$	J	

Pièges à éviter

- Croire que la vitesse est nulle au sommet de la trajectoire.
- Utiliser la formule de la portée quand le point d'arrivée n'est pas au niveau du départ.



- Penser qu'un objet plus lourd tombe plus vite en chute libre.
- Oublier que la force sur une charge négative est opposée au champ.
- Affirmer sans calcul que le poids d'une particule est négligeable.
- Inverser cosinus et sinus en projetant $v \rightarrow_0$.

Je me teste

1. Forme de la deuxième loi pour une masse constante ? $\rightarrow \Sigma F \rightarrow_{\text{ext}} = m \cdot a \rightarrow G$.
2. Accélération en chute libre ? $\rightarrow a \rightarrow = g \rightarrow$, indépendante de la masse.
3. Nature du mouvement horizontal en chute libre ? $\rightarrow$ Uniforme.
4. Angle donnant la portée maximale au même niveau ? $\rightarrow 45^\circ$.
5. Sens du champ entre deux plaques ? $\rightarrow$ De la plaque positive vers la plaque négative.
6. Valeur du champ pour $U = 400 \text{ V}$ et $d = 2,0 \text{ cm}$? $\rightarrow 2,0 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$.
7. Pourquoi néglige-t-on le poids d'un électron ? $\rightarrow$ La force électrique est environ 10^{14} fois plus grande.
8. Vitesse acquise depuis le repos sous une tension U ? $\rightarrow v = \sqrt{2|q|U/m}$.
9. Énergie d'un électron accéléré sous 1 V ? $\rightarrow 1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$.
10. Que vaut la vitesse au sommet d'un tir oblique ? $\rightarrow v_0 \cdot \cos \alpha$.

Fiche : Mouvement des satellites et des planètes

FICHE • P10 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	3

L'essentiel

- Deux corps à symétrie sphérique s'attirent avec une force de valeur $F = G \cdot m_A \cdot m_B / d^2$, d étant la distance entre leurs centres.
- Un astre de masse M crée un champ de gravitation radial, dirigé vers son centre, de valeur $g = G \cdot M / r^2$, qui décroît comme $1/r^2$.
- Un satellite de la Terre s'étudie dans le référentiel géocentrique, une planète dans le référentiel héliocentrique, tous deux supposés galiléens.
- Le rayon de l'orbite est $r = R + h$: rayon de l'astre plus altitude.
- Pour une orbite circulaire, la force de gravitation n'a pas de composante tangentielle : le mouvement est uniforme.
- La vitesse sur une orbite circulaire vaut $v = \sqrt{G \cdot M / r}$: elle ne dépend pas de la masse du satellite et diminue quand r augmente.
- L'accélération d'un satellite en orbite circulaire est centripète, de valeur $G \cdot M / r^2$, et n'est jamais nulle.
- La période vaut $T = 2\pi \cdot \sqrt{r^3 / (G \cdot M)}$, et le rapport $T^2 / r^3 = 4\pi^2 / (G \cdot M)$ est le même pour tous les satellites d'un même astre.
- Connaissant le rayon et la période de l'orbite d'un satellite, on calcule la masse de l'astre central : $M = 4\pi^2 \cdot r^3 / (G \cdot T^2)$.
- Un satellite géostationnaire a une orbite circulaire équatoriale, parcourue dans le sens de rotation de la Terre, de période égale au jour sidéral (86 164 s), à environ 35 800 km d'altitude.
- Première loi de Kepler : l'orbite d'une planète est une ellipse dont le Soleil occupe un foyer.
- Deuxième loi de Kepler : le rayon Soleil-planète balaie des aires égales en des durées égales, donc la planète va plus vite au périhélie qu'à l'aphélie.
- Troisième loi de Kepler : T^2 / a^3 est le même pour toutes les planètes d'un même astre, a étant le demi-grand axe.



- Les astronautes en orbite sont en impesanteur parce qu'ils sont en chute libre avec leur vaisseau, pas parce que la gravitation est nulle.

Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Unité	Condition de validité
Force de gravitation	$F = G \cdot m_A \cdot m_B / d^2$	N	corps ponctuels ou à symétrie sphérique
Constante de gravitation	$G = 6,67 \times 10^{-11}$	$N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}$	
Champ de gravitation	$g = G \cdot M / r^2$	$m \cdot s^{-2}$ (ou $N \cdot kg^{-1}$)	$r \geq$ rayon de l'astre
Relation au sol	$G \cdot MT = g_0 \cdot RT^2$	$m^3 \cdot s^{-2}$	rotation terrestre négligée
Vitesse orbitale	$v = \sqrt{(G \cdot M / r)}$	$m \cdot s^{-1}$	orbite circulaire
Période	$T = 2\pi r / v = 2\pi \cdot \sqrt{(r^3 / (G \cdot M))}$	s	orbite circulaire
Troisième loi de Kepler	$T^2 / a^3 = 4\pi^2 / (G \cdot M)$	$s^2 \cdot m^{-3}$	$a = r$ pour un cercle, demi-grand axe sinon
Masse de l'astre central	$M = 4\pi^2 \cdot r^3 / (G \cdot T^2)$	kg	orbite circulaire
Loi des aires aux extrémités	$r_p \cdot v_p = r_a \cdot v_a$	$m^2 \cdot s^{-1}$	au périhélie et à l'aphélie seulement
Ellipse	$r_p + r_a = 2a$	m	

Pièges à éviter

- Oublier d'ajouter le rayon de l'astre à l'altitude pour obtenir r .
- Laisser T en jours ou en heures dans une formule contenant G .



- Écrire qu'un satellite à vitesse constante n'a pas d'accélération.
- Prendre 24 h au lieu du jour sidéral pour un satellite géostationnaire, ou le placer au-dessus d'un point hors de l'équateur.
- Croire que la vitesse ou la période dépend de la masse du satellite.
- Expliquer l'impesanteur par une gravitation nulle.

Je me teste

1. Expression de la vitesse d'un satellite en orbite circulaire ? $\rightarrow v = \sqrt{G \cdot M / r}$.
2. Le mouvement circulaire d'un satellite est-il uniforme ? $\rightarrow$ Oui, la force n'a pas de composante tangentielle.
3. Si r est multiplié par 4, que devient la période ? $\rightarrow$ Elle est multipliée par 8.
4. Si r est multiplié par 4, que devient la vitesse ? $\rightarrow$ Elle est divisée par 2.
5. Énoncé de la troisième loi de Kepler ? $\rightarrow T^2/a^3$ est le même pour tous les satellites d'un même astre.
6. Où la vitesse d'une planète est-elle maximale ? $\rightarrow$ Au périhélie.
7. Période d'un satellite géostationnaire ? $\rightarrow$ Le jour sidéral, 86 164 s.
8. Altitude de l'orbite géostationnaire ? $\rightarrow$ Environ $3,58 \times 10^4$ km.
9. Comment calculer la masse d'un astre ? $\rightarrow M = 4\pi^2 \cdot r^3 / (G \cdot T^2)$ à partir d'un de ses satellites.
10. Pourquoi les astronautes flottent-ils ? $\rightarrow$ Ils sont en chute libre avec leur vaisseau.

Fiche : Mécanique des fluides

FICHE • P11 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	3

L'essentiel

- Un fluide (liquide ou gaz) se déforme et s'écoule ; on le décrit par sa masse volumique, sa pression et sa vitesse d'écoulement en chaque point.
- La masse volumique vaut $\rho = m / V$; un liquide incompressible garde la même masse volumique quelle que soit la pression.
- La force pressante exercée par un fluide sur une paroi est perpendiculaire à celle-ci, dirigée vers la paroi, de valeur $F = P \times S$.
- La pression s'explique par les chocs des entités du fluide sur la paroi ; une pression relative est l'écart à la pression atmosphérique.
- Dans un fluide incompressible au repos, la pression augmente avec la profondeur : $P(\text{bas}) = P(\text{haut}) + \rho gh$.
- Deux points d'un même fluide au repos à la même altitude ont la même pression ; dans l'eau, 10 m de profondeur ajoutent environ 1 bar.
- Dans un gaz, la pression varie si peu sur quelques mètres qu'on la considère uniforme dans un récipient.
- Tout corps immergé subit la poussée d'Archimède, verticale vers le haut, égale au poids du fluide déplacé ; elle est la résultante des forces pressantes.
- Un corps qui flotte est immergé à la fraction $\rho(\text{corps}) / \rho(\text{fluide})$ de son volume.
- Le débit volumique est le volume qui traverse une section par unité de temps : $D(v) = S \times v$.
- Pour un fluide incompressible en écoulement permanent, le débit se conserve : $S_1 v_1 = S_2 v_2$, donc le fluide accélère dans un rétrécissement.
- La relation de Bernoulli traduit la conservation de l'énergie mécanique par unité de volume d'un fluide parfait, incompressible, en écoulement permanent.
- Pour la vidange d'un grand réservoir, Bernoulli donne la vitesse de sortie $v = \sqrt{2gh}$.
- Effet Venturi : dans un rétrécissement horizontal, la vitesse augmente et la pression diminue ; il sert à mesurer un débit et explique le comportement d'une sténose.
- Un fluide réel visqueux perd de l'énergie mécanique (pertes de charge) : Bernoulli ne vaut pas dans les petits vaisseaux sanguins.



Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Unité	Condition de validité
Masse volumique	$\rho = m / V$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	toujours
Pression	$P = F / S$	Pa (1 bar = 10^5 Pa ; 1 mmHg $\approx$ 133,3 Pa)	force perpendiculaire à la surface
Statique des fluides	$P_2 - P_1 = \rho g(z_1 - z_2)$	Pa	fluide incompressible au repos, z vers le haut
Poussée d'Archimède	$\Pi = \rho(\text{fluide}) \times V(\text{immergé}) \times g$	N	fluide au repos
Fraction immergée	$V(\text{immergé}) / V = \rho(\text{corps}) / \rho(\text{fluide})$	sans unité	corps homogène en équilibre de flottaison
Débit volumique	$D(v) = V / \Delta t = S \times v$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	v vitesse moyenne perpendiculaire à S
Débit massique	$D(m) = \rho \times D(v)$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	toujours
Conservation du débit	$S_1 v_1 = S_2 v_2$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	fluide incompressible, écoulement permanent
Relation de Bernoulli	$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z = \text{constante}$	Pa	fluide parfait, incompressible, écoulement permanent, même ligne de courant
Torricelli	$v = \sqrt{2gh}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	grand réservoir ouvert, fluide parfait
Effet Venturi	$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2)$	Pa	conduite horizontale, conditions de Bernoulli

Pièges à éviter

- Oublier de convertir : $1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$, $1 \text{ mm}^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$, $1 \text{ L} = 10^{-3} \text{ m}^3$, $1 \text{ mL} = 10^{-6} \text{ m}^3$.
- Utiliser la masse volumique de l'objet au lieu de celle du fluide dans la poussée d'Archimède, ou le volume total au lieu du volume immergé.
- Confondre pression absolue et pression relative, notamment dans la loi de Boyle-Mariotte qui exige la pression absolue.
- Croire que diviser le diamètre par 2 double la vitesse : la section est divisée par 4, la vitesse multipliée par 4.
- Penser que la pression est plus forte là où le fluide va plus vite : c'est l'inverse dans un rétrécissement horizontal.

- Appliquer Bernoulli sans vérifier ses trois conditions, en particulier à un écoulement visqueux ou turbulent.

Je me teste

1. Que vaut 1 bar en pascals ? $\rightarrow 10^5 \text{ Pa}$.
2. Quelle surpression ajoutent environ 10 m d'eau ? $\rightarrow$ Environ 1 bar, soit $9,81 \times 10^4 \text{ Pa}$.
3. Pourquoi la surface libre d'un liquide au repos est-elle horizontale ? $\rightarrow$ Parce que les points d'un fluide au repos à la même altitude ont la même pression.
4. De quoi dépend la poussée d'Archimède ? $\rightarrow$ De la masse volumique du fluide, du volume immergé et de g .
5. Quelle fraction d'un glaçon ($917 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) est immergée dans l'eau douce ? $\rightarrow 0,917$, soit 91,7 %.
6. Quelle relation relie débit, section et vitesse ? $\rightarrow D(v) = S \times v$.
7. Le diamètre d'un tuyau est divisé par 3 : que devient la vitesse ? $\rightarrow$ Elle est multipliée par 9.
8. Quelles sont les conditions de la relation de Bernoulli ? $\rightarrow$ Fluide parfait, incompressible, écoulement permanent, points sur une même ligne de courant.
9. Que se passe-t-il pour la pression dans un rétrécissement horizontal ? $\rightarrow$ Elle diminue, car la vitesse augmente (effet Venturi).
10. Quelle est la vitesse de sortie d'un grand réservoir de hauteur h ? $\rightarrow v = \sqrt{2gh}$.



Fiche : Thermodynamique : énergie interne et transferts thermiques

FICHE • P12 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	3

L'essentiel

- L'état d'un système est décrit par ses variables d'état P , V , T et n ; la température absolue s'exprime en kelvins : $T = \theta + 273,15$.
- Le gaz parfait est un modèle où les entités sont ponctuelles et sans interaction à distance ; il décrit bien les gaz réels à basse pression.
- L'équation d'état du gaz parfait s'écrit $P V = n R T$, en unités SI uniquement.
- L'énergie interne U est la somme des énergies cinétiques microscopiques et des énergies potentielles d'interaction des entités ; on n'en mesure que les variations.
- Le premier principe traduit la conservation de l'énergie : pour un système fermé au repos, $\Delta U = W + Q$, avec les énergies reçues comptées positivement.
- Le travail est un transfert d'énergie d'origine macroscopique (mécanique ou électrique) ; le transfert thermique est un transfert désordonné à l'échelle microscopique, dû à un écart de température.
- Pour un solide ou un liquide sans changement d'état, $\Delta U = m c \Delta T$; l'eau a une capacité thermique massique particulièrement élevée.
- Dans un calorimètre, système isolé, la somme des variations d'énergie interne de toutes les parties est nulle.
- Un transfert thermique va spontanément du corps chaud vers le corps froid et cesse à l'équilibre thermique.
- La conduction se fait de proche en proche sans déplacement de matière, la convection par un fluide en mouvement, le rayonnement par ondes électromagnétiques, même dans le vide.
- Le flux thermique à travers une paroi vaut $\Phi = \Delta T / R(\text{th})$; les résistances thermiques de parois successives s'ajoutent.
- Selon la loi de Newton, l'écart entre la température d'un système et celle du milieu décroît exponentiellement avec la constante de temps $\tau = C / (hS)$.



- La Terre absorbe en moyenne environ $238 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ du rayonnement solaire ; sans atmosphère, sa température d'équilibre serait d'environ 255 K.
- L'effet de serre est dû aux gaz qui absorbent l'infrarouge émis par la surface et en renvoient une partie vers le sol, d'où une température moyenne de surface d'environ 288 K.

Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Unité	Condition de validité
Température absolue	$T = \theta + 273,15$	K	toujours
Gaz parfait	$P V = n R T$, $R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Pa, m^3 , mol, K	gaz à basse pression
Premier principe	$\Delta U = W + Q$	J	système fermé, au repos macroscopique
Système incompressible	$\Delta U = C \Delta T = m c \Delta T$	J	solide ou liquide, sans changement d'état
Changement d'état	$\Delta U = m L$	J	à température constante
Flux thermique	$\Phi = Q / \Delta t$	W	toujours
Résistance thermique	$\Phi = (T_1 - T_2) / R(\text{th})$; $R(\text{th}) = e / (\lambda S)$	$\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	régime permanent, paroi plane
Loi de Newton	$\Phi = h S (T - T(\text{ext}))$	W	écart de température modéré, T uniforme
Évolution de T	$T(t) = T(\text{ext}) + (T_0 - T(\text{ext})) \exp(-t/\tau)$, $\tau = C / (hS)$	K ou $^{\circ}\text{C}$; s	thermostat à $T(\text{ext})$ constante
Stefan-Boltzmann (donnée)	$p = \sigma T^4$, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	corps noir

Pièges à éviter

- Utiliser des degrés Celsius dans $P V = n R T$ ou dans σT^4 : seul le kelvin convient.
- Oublier de convertir les litres en m^3 et les bars en Pa.



- Se tromper de signe : ce que le système cède est négatif.
- Confondre capacité thermique C ($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$) et capacité thermique massique c ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).
- Additionner des conductivités au lieu des résistances thermiques pour des couches successives.
- Croire qu'au bout de τ l'équilibre est atteint : il reste 37 % de l'écart, l'équilibre est atteint vers 5τ .

Je me teste

1. Combien vaut 37°C en kelvins ? $\rightarrow 310,15\text{ K}$.
2. Quelles sont les deux hypothèses du gaz parfait ? $\rightarrow$ Entités ponctuelles et pas d'interaction à distance entre elles.
3. Que vaut le volume molaire d'un gaz parfait à 0°C sous $1,013\text{ bar}$? $\rightarrow 22,4\text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}$.
4. Écris le premier principe pour un système fermé au repos. $\rightarrow \Delta U = W + Q$.
5. Un système reçoit 200 J de travail et cède 50 J de chaleur : que vaut ΔU ? $\rightarrow +150\text{ J}$.
6. Quelle énergie faut-il pour chauffer $1,0\text{ kg}$ d'eau de 10 K ? $\rightarrow 4,18\times 10^4\text{ J}$.
7. Quel mode de transfert traverse le vide ? $\rightarrow$ Le rayonnement.
8. Comment se combinent deux résistances thermiques en série ? $\rightarrow$ Elles s'additionnent.
9. Quelle fraction de l'écart initial reste-t-il au bout de τ ? $\rightarrow$ Environ 37 %.
10. Pourquoi la surface terrestre est-elle à 288 K et non à 255 K ? $\rightarrow$ À cause de l'effet de serre, qui renvoie vers le sol une partie de l'infrarouge émis.

Fiche : Ondes sonores : intensité, niveau sonore et effet Doppler

FICHE • P13 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	3

L'essentiel

- Un son est une onde mécanique progressive : il transporte de l'énergie sans transporter de matière et ne se propage pas dans le vide.
- La longueur d'onde vaut $\lambda = c / f$; la fréquence est fixée par la source, la célérité par le milieu (environ $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans l'air, $1\,540 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans les tissus mous).
- L'oreille humaine perçoit les fréquences comprises entre environ 20 Hz et 20 kHz ; au-delà se trouvent les ultrasons.
- L'intensité sonore est la puissance reçue par unité de surface : $I = P / S$, en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.
- Pour une source ponctuelle isotrope sans absorption, $I = P / (4\pi r^2)$: l'intensité est inversement proportionnelle au carré de la distance.
- Le niveau d'intensité sonore vaut $L = 10 \log(I / I_0)$, en dB, avec $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; réciproquement, $I = I_0 \times 10^{L/10}$.
- Multiplier l'intensité par 10 ajoute 10 dB, la multiplier par 2 ajoute environ 3 dB.
- Pour plusieurs sources indépendantes, ce sont les intensités qui s'additionnent, jamais les niveaux.
- L'atténuation entre deux niveaux vaut $A = L_1 - L_2 = 10 \log(I_1 / I_2)$; doubler la distance à une source ponctuelle atténue d'environ 6 dB.
- L'absorption convertit une partie de l'énergie sonore en énergie interne du milieu ; en échographie, elle croît avec la profondeur et la fréquence.
- L'effet Doppler est la modification de la fréquence reçue quand émetteur et récepteur se déplacent l'un par rapport à l'autre : plus aiguë au rapprochement, plus grave à l'éloignement.
- Pour un émetteur mobile et un récepteur fixe, $f(R) = f(E) \times c / (c - v)$ au rapprochement et $f(R) = f(E) \times c / (c + v)$ à l'éloignement.
- Si v est très petite devant c , le décalage vaut $\Delta f \approx f(E) \times v / c$ en valeur absolue.



- Pour une onde réfléchiée par un objet mobile (radar, échographie Doppler), le décalage est doublé : $\Delta f \approx 2 f(E) v \cos \theta / c$.

Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Unité	Condition de validité
Longueur d'onde	$\lambda = c / f = c T$	m	onde périodique
Intensité sonore	$I = P / S$	$W \cdot m^{-2}$	surface perpendiculaire à la propagation
Source ponctuelle	$I = P / (4\pi r^2)$	$W \cdot m^{-2}$	source isotrope, pas d'absorption
Niveau sonore	$L = 10 \log(I / I_0), I_0 = 1,0 \times 10^{-12} W \cdot m^{-2}$	dB	toujours
Intensité depuis le niveau	$I = I_0 \times 10^{L/10}$	$W \cdot m^{-2}$	toujours
Plusieurs sources	$I(\text{totale}) = I_1 + I_2 + \dots$	$W \cdot m^{-2}$	sources indépendantes
Atténuation	$A = L_1 - L_2 = 10 \log(I_1 / I_2)$	dB	toujours
Doppler, rapprochement	$f(R) = f(E) \times c / (c - v)$	Hz	émetteur mobile, récepteur fixe, une dimension
Doppler, éloignement	$f(R) = f(E) \times c / (c + v)$	Hz	émetteur mobile, récepteur fixe, une dimension
Décalage approché	$\Delta f \approx f(E) \times v / c$ (en valeur absolue)	Hz	v très petite devant c
Radar, échographie	$\Delta f \approx 2 f(E) v \cos \theta / c$	Hz	onde réfléchiée, v très petite devant c

Pièges à éviter

- Additionner des décibels : deux sources de 70 dB donnent 73 dB, pas 140 dB.
- Confondre intensité sonore ($W \cdot m^{-2}$) et niveau d'intensité sonore (dB).
- Croire que 0 dB signifie l'absence de son : c'est le seuil d'audibilité.



- Oublier que l'intensité varie en $1/r^2$: doubler la distance retire 6 dB, pas 3 dB.
- Inverser $c - v$ et $c + v$: au rapprochement, la fréquence reçue doit être plus grande.
- Oublier le facteur 2 pour une onde réfléchie et le facteur $\cos \theta$ en échographie Doppler.

Je me teste

1. Que vaut l'intensité correspondant à 80 dB ? $\rightarrow 1,0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.
2. De combien augmente le niveau si l'intensité est multipliée par 100 ? $\rightarrow$ De 20 dB.
3. Quel niveau donnent deux sources identiques de 60 dB ? $\rightarrow$ Environ 63 dB.
4. Comment varie l'intensité quand on triple la distance à une source ponctuelle ? $\rightarrow$ Elle est divisée par 9.
5. Que signifie une atténuation de 30 dB ? $\rightarrow$ L'intensité est divisée par 1 000.
6. Une sirène s'approche : le son perçu est-il plus aigu ou plus grave ? $\rightarrow$ Plus aigu.
7. Quelle est la fréquence reçue d'un émetteur qui s'éloigne ? $\rightarrow f(R) = f(E) \times c / (c + v)$.
8. Quand peut-on écrire $\Delta f \approx f(E) v / c$? $\rightarrow$ Quand v est très petite devant c .
9. Pourquoi un facteur 2 apparaît-il pour un radar ? $\rightarrow$ L'objet reçoit l'onde en mouvement puis la renvoie en mouvement : deux décalages.
10. Quel décalage mesure-t-on avec un faisceau perpendiculaire au vaisseau ? $\rightarrow$ Aucun, car $\cos 90^\circ = 0$.



Fiche : Diffraction et interférences

FICHE • P14 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	3

L'essentiel

- La diffraction est l'étalement d'une onde après une ouverture ou un obstacle de petite dimension ; elle concerne toutes les ondes, mécaniques comme lumineuses.
- La diffraction est d'autant plus marquée que la dimension a de l'ouverture est petite, du même ordre de grandeur ou plus petite que la longueur d'onde λ .
- La diffraction ne modifie ni la fréquence, ni la célérité, ni la longueur d'onde : elle modifie la répartition de l'énergie dans l'espace.
- Pour une fente de largeur a , l'écart angulaire entre le centre de la tache centrale et la première extinction vaut $\theta = \lambda/a$, en radians.
- Un fil de diamètre a donne la même figure de diffraction qu'une fente de largeur a , ce qui permet de mesurer de petits diamètres.
- La tache centrale de diffraction a pour largeur $L = 2\lambda D/a$: elle est deux fois plus large que les taches latérales et beaucoup plus lumineuse.
- Deux ondes de même fréquence et de déphasage constant sont cohérentes : leur superposition donne des interférences stables.
- Deux sources lumineuses indépendantes ne sont pas cohérentes ; on obtient des sources cohérentes en divisant le faisceau d'une même source.
- La différence de marche en un point M vaut $\delta = d_2 - d_1$; elle correspond à un retard δ/v entre les deux ondes.
- Pour des sources en phase, l'interférence est constructive si $\delta = k \cdot \lambda$ et destructive si $\delta = (k + 1/2) \cdot \lambda$, avec k entier relatif.
- Dans le dispositif d'Young, la différence de marche en un point d'abscisse x vaut $\delta = b \cdot x/D$, et la frange centrale ($x = 0$) est brillante.
- L'interfrange, distance entre deux franges brillantes consécutives, vaut $i = \lambda D/b$.
- En lumière blanche, la frange centrale est blanche, les franges voisines sont irisées, puis apparaît un blanc d'ordre supérieur dont le spectre présente des cannelures.



- Les couleurs des bulles de savon, des taches d'huile ou des ailes de certains papillons sont des couleurs interférentielles, dues à des lames minces.
- Pour une mesure de $\lambda = i \cdot b / D$, les incertitudes relatives se combinent en racine de la somme des carrés.

Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Unités	Condition de validité
Écart angulaire (fente ou fil)	$\theta = \lambda / a$	θ en rad, λ et a en m	petits angles
Largeur de la tache centrale	$L = 2\lambda D / a$	m	D grand devant a , petits angles
Différence de marche	$\delta = d_2 - d_1$	m	
Interférence constructive	$\delta = k \cdot \lambda$	m	sources en phase
Interférence destructive	$\delta = (k + 1/2) \cdot \lambda$	m	sources en phase
Différence de marche (Young)	$\delta = b \cdot x / D$	m	D grand devant b et x
Interfrange	$i = \lambda D / b$	m	D grand devant b et x
Longueur d'onde dans un milieu d'indice n	$\lambda = \lambda_0 / n$	m	fréquence inchangée

Pièges à éviter

- Confondre a (largeur d'une fente, qui fixe la diffraction) et b (distance entre les fentes, qui fixe l'interfrange).
- Oublier le facteur 2 de $L = 2\lambda D / a$: L est la largeur totale de la tache centrale.
- Calculer avec des longueurs dans des unités différentes : tout convertir en mètres.



- Compter les franges au lieu des intervalles : n franges brillantes consécutives délimitent $n - 1$ interfranges.
- Conclure sur la nature d'une frange sans calculer δ/λ .
- Oublier que les conditions constructive et destructive s'échangent si les sources sont en opposition de phase.

Je me teste

1. Que vaut θ pour $\lambda = 600 \text{ nm}$ et $a = 0,10 \text{ mm}$? $\rightarrow \theta = 6,0 \times 10^{-3} \text{ rad}$.
2. Le rouge ou le bleu est-il le plus diffracté ? $\rightarrow$ Le rouge, car θ est proportionnel à λ .
3. Que devient L si la fente est deux fois plus large ? $\rightarrow L$ est divisée par 2.
4. Deux conditions pour que deux sources soient cohérentes ? $\rightarrow$ Même fréquence et déphasage constant.
5. Nature de l'interférence pour $\delta = 3,5 \lambda$ avec des sources en phase ? $\rightarrow$ Destructive.
6. Expression de l'interfrange dans l'expérience d'Young ? $\rightarrow i = \lambda D/b$.
7. Que devient i si l'on rapproche les fentes ? $\rightarrow$ Il augmente.
8. Couleur de la frange centrale en lumière blanche ? $\rightarrow$ Blanche, car $\delta = 0$ pour toutes les radiations.
9. Une diffraction change-t-elle la longueur d'onde ? $\rightarrow$ Non, seule la direction de propagation change.
10. Combien d'interfranges entre la 1^{ère} et la 11^{ème} frange brillante ? $\rightarrow 10$ interfranges.



Fiche : Lunette astronomique et instruments d'optique

FICHE • P15 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	3

L'essentiel

- Une lentille mince convergente est caractérisée par sa distance focale $f' = OF'$ et sa vergence $C = 1/f'$, en dioptries.
- Un objet à l'infini a son image dans le plan focal image ; un objet placé dans le plan focal objet a son image à l'infini.
- Des rayons parallèles entre eux convergent en un point du plan focal image, situé sur le rayon non dévié passant par le centre optique.
- L'œil normal voit net sans accommoder un objet à l'infini : un instrument d'observation visuelle donne donc une image à l'infini.
- Le diamètre apparent d'un objet de taille AB à la distance d vaut $\alpha \approx AB/d$, en radians.
- L'œil ne sépare deux points que s'ils sont vus sous un angle supérieur à environ 3×10^{-4} rad.
- Une lunette astronomique comporte un objectif de grande focale et un oculaire de petite focale.
- L'objectif donne de l'astre une image intermédiaire A_1B_1 dans son plan focal image, de taille $A_1B_1 = f'_1 \cdot \alpha$.
- La lunette est afocale quand $F'_1 = F_2$: l'image définitive est à l'infini et la distance entre les lentilles vaut $f'_1 + f'_2$.
- L'image donnée par une lunette astronomique est renversée.
- Le grossissement est le rapport des angles $G = \alpha'/\alpha$; pour une lunette afocale, $G = f'_1/f'_2$.
- Le cercle oculaire est l'image de la monture de l'objectif par l'oculaire ; il est situé juste après le foyer image de l'oculaire.
- Le diamètre du cercle oculaire vaut D/G : l'œil s'y place pour recevoir toute la lumière et voir tout le champ.
- La lumière collectée est proportionnelle à D^2 , et la diffraction par l'objectif limite les détails séparables à un angle de l'ordre de λ/D .
- Au-delà du grossissement utile, grossir n'apporte plus de détails nouveaux.



Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Unités	Condition de validité
Vergence	$C = 1/f'$	C en δ , f' en m	lentille mince
Relation de conjugaison	$1/OA' - 1/OA = 1/f'$	m	distances algébriques
Grandissement	$\gamma = A'B'/AB = OA'/OA$	sans unité	
Diamètre apparent	$\alpha \approx AB/d$	rad	petit angle
Condition afocale	$F'_1 = F_2, O_1O_2 = f'_1 + f'_2$	m	image à l'infini
Grossissement	$G = \alpha'/\alpha = f'_1/f'_2$	sans unité	lunette afocale, petits angles
Image intermédiaire	$A_1B_1 = f'_1 \cdot \alpha$	m	objet à l'infini
Position du cercle oculaire	$O_2C' = f'_2(f'_1 + f'_2)/f'_1$	m	lunette afocale
Diamètre du cercle oculaire	$d = D/G$	m	lunette afocale

Pièges à éviter

- Confondre grossissement (rapport d'angles) et grandissement (rapport de tailles).
- Inverser objectif et oculaire : l'objectif a la plus grande focale, donc la plus petite vergence.



- Placer l'image intermédiaire dans le plan focal objet de l'objectif : elle est dans son plan focal image.
- Situer le cercle oculaire exactement au foyer F'_2 : il est un peu après.
- Croire qu'un grand objectif augmente le grossissement : il augmente la luminosité et la résolution.
- Oublier de convertir les focales en mètres avant de calculer une vergence.

Je me teste

1. Vergence d'une lentille de focale 50 cm ? $\rightarrow 2,0 \delta$.
2. Où se forme l'image d'un astre par l'objectif ? $\rightarrow$ Dans le plan focal image de l'objectif.
3. Condition pour qu'une lunette soit afocale ? $\rightarrow F'_1 = F_2$.
4. Grossissement d'une lunette de focales 1 000 mm et 20 mm ? $\rightarrow G = 50$.
5. Longueur de cette lunette ? $\rightarrow 1\,020$ mm.
6. Définition du cercle oculaire ? $\rightarrow$ L'image de la monture de l'objectif donnée par l'oculaire.
7. Diamètre du cercle oculaire si $D = 100$ mm et $G = 50$? $\rightarrow 2,0$ mm.
8. Pourquoi l'image est-elle à l'infini ? $\rightarrow$ Pour que l'œil normal l'observe sans accommoder.
9. L'image d'une lunette astronomique est-elle droite ? $\rightarrow$ Non, elle est renversée.
10. Qu'apporte un objectif de plus grand diamètre ? $\rightarrow$ Plus de lumière et des détails plus fins, pas plus de grossissement.



Fiche : Effet photoélectrique et interactions lumière-matière

FICHE • P16 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	3

L'essentiel

- Dans ses échanges d'énergie avec la matière, la lumière se comporte comme un ensemble de photons d'énergie $E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$.
- Un électronvolt vaut $1,60 \times 10^{-19}$ J, et l'énergie d'un photon en eV vaut environ 1 240 divisé par sa longueur d'onde en nm.
- Une source monochromatique de puissance P émet $N = P / (h \cdot \nu)$ photons par seconde.
- L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons par un métal éclairé par un rayonnement électromagnétique.
- L'émission n'a lieu qu'au-dessus d'une fréquence seuil propre au métal, quelle que soit l'intensité de la lumière, et elle est instantanée.
- L'intensité lumineuse fixe le nombre d'électrons émis par seconde, la fréquence fixe leur énergie cinétique maximale.
- Le modèle ondulatoire n'explique pas ces faits ; Einstein les interprète en 1905 par l'absorption d'un photon entier par un seul électron.
- Le travail d'extraction W est l'énergie minimale pour extraire un électron du métal, et le bilan d'énergie donne $E_{c,max} = h \cdot \nu - W$.
- Le seuil correspond à $\nu_0 = W/h$, soit $\lambda_0 = h \cdot c / W$: il y a émission si $\lambda < \lambda_0$.
- La droite $E_{c,max}$ en fonction de ν a pour pente h , la même pour tous les métaux, et coupe l'axe des fréquences en ν_0 .
- Un atome n'absorbe ou n'émet un photon que si son énergie est exactement égale à l'écart entre deux de ses niveaux d'énergie.
- Un photon d'énergie supérieure à l'énergie d'ionisation peut ioniser l'atome, l'excédent devenant énergie cinétique de l'électron.
- Dans un semi-conducteur, un photon d'énergie au moins égale au gap E_g crée une paire électron-trou : c'est le principe de la photodiode et de la cellule photovoltaïque.
- Une DEL émet des photons d'énergie voisine du gap de son matériau, ce qui fixe sa couleur.



- Le rendement d'une cellule photovoltaïque vaut $\eta = U \cdot I / (E \cdot S)$; il est maximal au point de puissance maximale de sa caractéristique.

Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Unités	Condition de validité
Énergie d'un photon	$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$	J (ou eV), Hz, m	λ dans le vide
Nombre de photons par seconde	$N = P / (h \cdot \nu)$	s^{-1} , P en W	source monochromatique
Énergie cinétique maximale	$E_{c,max} = h \cdot \nu - W$	J ou eV (même unité)	$h \cdot \nu \geq W$
Fréquence seuil, longueur d'onde seuil	$\nu_0 = W/h$; $\lambda_0 = h \cdot c / W$	Hz ; m	
Vitesse maximale	$v = \sqrt{2 \cdot E_{c,max} / m}$	$m \cdot s^{-1}$, E_c en J, m en kg	non relativiste
Absorption ou émission atomique	$h \cdot \nu = E_p - E_n$	J ou eV	transition entre niveaux liés
Seuil d'un semi-conducteur	$\lambda_{max} = h \cdot c / E_g$	m	
Rendement photovoltaïque	$\eta = U \cdot I / (E \cdot S)$	sans unité, E en $W \cdot m^{-2}$, S en m^2	
Constantes	$h = 6,63 \times 10^{-34} J \cdot s$; $c = 3,00 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$; $1 eV = 1,60 \times 10^{-19} J$		

Pièges à éviter

- Croire qu'une lumière plus intense peut compenser une fréquence trop basse : sous le seuil, aucun électron n'est émis.
- Soustraire une énergie en joules et une énergie en électronvolts.
- Calculer une vitesse avec une énergie en eV au lieu de joules.



- Oublier que le seuil est une longueur d'onde maximale : l'émission exige $\lambda < \lambda_0$.
- Exiger une énergie exacte pour l'effet photoélectrique ou l'ionisation, ou accepter une énergie approximative pour une transition entre niveaux liés.
- Oublier de convertir la surface en m^2 dans le calcul d'un rendement photovoltaïque.

Je me teste

1. Énergie en eV d'un photon de 620 nm ? → Environ 2,0 eV.
2. Que fixe l'intensité de la lumière dans l'effet photoélectrique ? → Le nombre d'électrons émis par seconde.
3. Relation donnant $E_{c,\text{max}}$? → $E_{c,\text{max}} = h \cdot \nu - W$.
4. Longueur d'onde seuil d'un métal de travail d'extraction 2,48 eV ? → Environ 500 nm.
5. Que représente la pente de $E_{c,\text{max}}$ en fonction de ν ? → La constante de Planck h .
6. Qui a interprété l'effet photoélectrique, et quand ? → Einstein, en 1905.
7. Condition d'absorption d'un photon par un atome ? → $h \cdot \nu$ égal à l'écart entre deux niveaux d'énergie.
8. Longueur d'onde maximale détectée par le silicium ($E_g = 1,12 \text{ eV}$) ? → Environ 1 100 nm.
9. Rendement d'une cellule de $0,010 \text{ m}^2$ qui fournit 1,5 W sous $1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$? → 15 %.
10. Qu'est-ce qui fixe la couleur d'une DEL ? → Le gap de son semi-conducteur.

Fiche : Condensateur et circuit RC

FICHE • P17 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	3

L'essentiel

- L'intensité d'un courant est un débit de charge : $i = dq/dt$, et $Q = I \cdot \Delta t$ quand le courant est constant.
- Un condensateur est formé de deux armatures conductrices séparées par un isolant ; elles portent à chaque instant des charges opposées q et $-q$.
- La charge q de l'armature A est proportionnelle à la tension : $q = C \cdot u$, où C est la capacité en farads.
- En convention récepteur, le condensateur obéit à $i = C \cdot du/dt$.
- En régime permanent, la tension est constante, le courant est nul : le condensateur se comporte comme un interrupteur ouvert.
- La tension aux bornes d'un condensateur est toujours continue ; l'intensité, elle, peut varier brutalement.
- La capacité d'un condensateur plan vaut $C = \epsilon \cdot S/e$: elle augmente avec la surface en regard et la permittivité, et diminue avec la distance entre armatures.
- En charge dans un circuit RC série, u vérifie $RC \cdot du/dt + u = E$ et vaut $u(t) = E \cdot (1 - \exp(-t/\tau))$ si le condensateur est initialement déchargé.
- En décharge, u vérifie $RC \cdot du/dt + u = 0$ et vaut $u(t) = E \cdot \exp(-t/\tau)$; l'intensité est alors négative, le courant change de sens.
- La constante de temps $\tau = RC$ est une durée en secondes ; elle ne dépend pas de E .
- À $t = \tau$, la tension vaut 63 % de E en charge et 37 % de E en décharge.
- La tangente à l'origine coupe l'asymptote $u = E$ (charge) ou l'axe des temps (décharge) à la date τ .
- On considère le condensateur chargé ou déchargé au bout de 5τ (écart inférieur à 1 %).
- En décharge, $\ln(u)$ est une fonction affine du temps de pente $-1/\tau$, ce qui permet de mesurer τ par régression linéaire.
- Un capteur capacitif traduit une variation de distance, de surface ou de permittivité en variation de capacité, mesurée par exemple par la constante de temps d'un circuit RC.



Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Unité	Condition de validité
Intensité	$i = dq/dt ; Q = I \cdot \Delta t$	A, C, s	$Q = I \cdot \Delta t$ seulement si I est constant
Charge d'un condensateur	$q = C \cdot u$	C, F, V	q charge de l'armature vers laquelle i est orienté
Loi du condensateur	$i = C \cdot du/dt$	A	convention récepteur, C constante
Condensateur plan	$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S/e$	F	armatures parallèles, e petite devant leurs dimensions ; $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$
Constante de temps	$\tau = RC$	s	circuit RC série
Charge	$u(t) = E \cdot (1 - \exp(-t/\tau)) ; i(t) = (E/R) \cdot \exp(-t/\tau)$	V, A	$u(0) = 0$
Décharge	$u(t) = E \cdot \exp(-t/\tau) ; i(t) = -(E/R) \cdot \exp(-t/\tau)$	V, A	$u(0) = E$
Durée en décharge	$t = \tau \cdot \ln(E/u)$	s	pour atteindre la tension u
Énergie stockée (complément)	$E_e = \frac{1}{2} \cdot C \cdot u^2$	J	condensateur sous la tension u

Pièges à éviter

- Oublier de convertir μF , nF ou $\text{k}\Omega$ avant de calculer τ .



- Lire τ à 63 % sur une courbe de décharge (c'est 37 % en décharge).
- Placer la tangente à l'origine à 5τ au lieu de τ .
- Écrire la condition initiale sur l'intensité au lieu de la tension.
- Croire que la durée de charge dépend de la tension du générateur.
- Prendre le logarithme d'une somme : isole toujours l'exponentielle d'abord.

Je me teste

1. Que vaut 1 A en coulombs et secondes ? $\rightarrow 1 \text{ A} = 1 \text{ C}\cdot\text{s}^{-1}$.
2. Relation entre i et u pour un condensateur en convention récepteur ? $\rightarrow i = C\cdot du/dt$.
3. Comportement d'un condensateur en régime permanent ? $\rightarrow$ Interrupteur ouvert, courant nul.
4. Quelle grandeur est continue dans un condensateur ? $\rightarrow$ La tension à ses bornes.
5. τ pour $R = 10 \text{ k}\Omega$ et $C = 100 \mu\text{F}$? $\rightarrow \tau = 1,0 \text{ s}$.
6. Fraction de E atteinte à $t = \tau$ pendant une charge ? $\rightarrow$ Environ 63 %.
7. Fraction de E restante à $t = \tau$ pendant une décharge ? $\rightarrow$ Environ 37 %.
8. Intensité juste après la fermeture lors d'une charge ? $\rightarrow i(0) = E/R$.
9. Comment varie C si la distance entre armatures diminue ? $\rightarrow C$ augmente, car $C = \epsilon\cdot S/e$.
10. Quelle droite tracer pour mesurer τ sur une décharge ? $\rightarrow \ln(u)$ en fonction de t , de pente $-1/\tau$.

Fiche : Mesure, incertitudes et exploitation de données

FICHE • P18 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

L'essentiel	1
Formules et définitions à connaître	2
Pièges à éviter	2
Je me teste	3

L'essentiel

- Répéter un même mesurage donne des valeurs différentes : c'est la variabilité, et la valeur vraie du mesurande reste inconnue.
- L'erreur aléatoire disperse les mesures et se réduit en moyennant ; l'erreur systématique les décale toutes dans le même sens et ne se réduit pas en répétant.
- Une mesure fidèle a des valeurs peu dispersées ; une mesure juste a une moyenne proche de la référence.
- L'incertitude-type $u(x)$ caractérise la dispersion des valeurs attribuables au mesurande ; elle a l'unité de x .
- L'incertitude relative $u(x)/|x|$ permet de comparer la précision de mesures différentes.
- Évaluation de type A : la moyenne de n mesures est la meilleure estimation, et son incertitude-type vaut $s/\sqrt{n}$.
- Multiplier le nombre de mesures par 4 divise l'incertitude-type de la moyenne par 2.
- Évaluation de type B : on divise une demi-largeur d'intervalle par $\sqrt{3}$ (tolérance $\pm a$) ou on prend $g/\sqrt{12}$ pour une lecture sur une graduation g .
- Un résultat s'écrit (valeur $\pm$ incertitude-type) unité, avec une incertitude à 1 ou 2 chiffres significatifs et une valeur arrondie à la même décimale.
- Pour une somme ou une différence, les incertitudes absolues s'ajoutent en quadrature ; pour un produit ou un quotient, ce sont les incertitudes relatives.
- Un exposant n multiplie l'incertitude relative par $|n|$.
- Dans une somme quadratique, le terme le plus grand domine : c'est sur lui qu'il faut agir.
- Le quotient $z = |x - x_{\text{réf}}|/u(x)$ compare un résultat à une référence : compatible si $z \leq 2$.
- Une régression linéaire donne la pente et l'ordonnée à l'origine ; la validité du modèle se juge sur les résidus, pas seulement sur r^2 .
- Linéariser une loi (T^2 en fonction de L , $\ln(u)$ en fonction de t) permet d'en extraire un paramètre par la pente.



- Une droite d'étalonnage ne s'utilise qu'à l'intérieur du domaine des mesures.

Formules et définitions à connaître

Grandeur	Formule	Condition de validité
Moyenne	$\bar{x} = (x_1 + \dots + x_n)/n$	mesures répétées, mêmes conditions
Écart-type expérimental	$s = \sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2)/(n - 1)}$	diviser par $n - 1$
Incertitude type A	$u(\bar{x}) = s/\sqrt{n}$	mesures indépendantes
Incertitude type B, graduation	$u = g/\sqrt{12}$	une lecture, graduation g
Incertitude type B, tolérance	$u = a/\sqrt{3}$	valeur annoncée à $\pm a$
Somme, différence	$u(y) = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2}$	sources indépendantes
Produit, quotient	$u(y)/y = \sqrt{((u(x_1)/x_1)^2 + (u(x_2)/x_2)^2)}$	sources indépendantes
Puissance	$u(y)/y = \text{abs}(n) \cdot u(x)/x$	$y = x^n$
Comparaison	$z = \text{abs}(x - x_{\text{réf}})/u(x)$	compatible si $z \leq 2$
Régression	$a = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) / \sum (x_i - \bar{x})^2$; $b = \bar{y} - a \cdot \bar{x}$	modèle affine

Pièges à éviter

- Confondre s et $s/\sqrt{n}$.
- Utiliser σ_n au lieu de σ_{n-1} sur la calculatrice.
- Ajouter des incertitudes absolues pour un quotient, ou relatives pour une somme.

- Oublier le facteur 2 de l'exposant pour une grandeur au carré.
- Conclure avec l'écart relatif ou un r^2 seul au lieu de z et des résidus.
- Croire que répéter les mesures supprime une erreur systématique.
- Extrapoler une droite d'étalonnage hors du domaine mesuré.

Je me teste

1. Combien de chiffres significatifs dans 0,00450 ? $\rightarrow 3$.
2. Incertitude-type sur la moyenne de n mesures ? $\rightarrow s/\sqrt{n}$.
3. Combien de mesures pour diviser $u(\bar{x})$ par 3 ? $\rightarrow 9$ fois plus.
4. Incertitude-type pour une tolérance de $\pm 0,03$ mL ? $\rightarrow 0,03/\sqrt{3} \approx 0,017$ mL.
5. Écriture correcte de $9,8123 \pm 0,0456 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$? $\rightarrow (9,81 \pm 0,05) \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.
6. Que combine-t-on pour $R = U/I$? $\rightarrow$ Les incertitudes relatives, en quadrature.
7. Incertitude relative de $y = x^2$ si $u(x)/x = 1 \%$? $\rightarrow 2 \%$.
8. $z = 2,4$: conclusion ? $\rightarrow$ Résultat non compatible avec la référence.
9. Que tracer pour mesurer g avec un pendule ? $\rightarrow T^2$ en fonction de L , pente $4\pi^2/g$.
10. Signe d'un mauvais modèle sur les résidus ? $\rightarrow$ Des résidus de signes non aléatoires, qui dessinent une courbure.