

SESSION 2007CLASSES DE TERMINALE

SCIENCE S P H Y S I Q U E S

THEME : INTERACTION.

Il y a quelques années les physiciens pensaient qu'il était nécessaire de faire appel à quatre types de forces pour expliquer la structure de l'Univers : interaction gravitationnelle, interaction électromagnétique, interaction faible et interaction forte (ces deux dernières agissant dans le noyau). Des théoriciens cherchant à réduire ce nombre de forces (Théorie unitaire de l'Univers), ont réussi à le ramener à trois. La cohésion de la matière est assurée par :

- l'interaction gravitationnelle à l'échelle astronomique,
- l'interaction électromagnétique à l'échelle des atomes et des molécules ou de la matière perçue par l'homme,
- l'interaction forte à l'échelle du noyau.

NB : Le candidat s'inspirera, au besoin, des rappels et compléments indiqués à la dernière page de l'épreuve.

PREMIERE PARTIE : INTERACTION GRAVITATIONNELLE.

Les mouvements des planètes ont fait l'objet de nombreuses observations depuis l'antiquité. Le centre d'inertie de la Terre, par exemple, suit une trajectoire elliptique autour du Soleil dans le repère de Copernic. La somme vectorielle des forces appliquées à la Terre n'est pas nulle, car si elle était nulle le mouvement de la Terre serait rectiligne uniforme. Des conclusions semblables sont suggérées par l'observation des mouvements des planètes autour du Soleil, du mouvement de la Lune ou des satellites artificiels autour de la Terre [...]. De nombreux satellites artificiels tournent actuellement autour de la Terre, mais aussi autour d'autres planètes du système solaire. Certains satellites sont dits géostationnaires. Ils tournent dans le repère géocentrique autour de la Terre mais paraissent immobiles par rapport à tout point de la surface de celle-ci. Cette caractéristique est particulièrement importante pour les satellites de télécommunication.

A : Champs gravitationnels. (15 Points)

A-1 La loi de l'attraction universelle due à Newton a permis une interprétation remarquablement précise des mouvements évoqués ci-dessus.

Elle s'énonce ainsi : Deux objets ponctuels A et B, de masses m et m' , séparés par une distance r , exercent l'un sur l'autre des forces attractives dirigées suivant la droite qui les joint et de même

intensité $f = f' = G \frac{mm'}{r^2}$ soit, en vecteurs : $\vec{f} = -\vec{f}' = G \frac{mm'}{r^2} \vec{u}$

G est une constante et \vec{u} un vecteur unitaire pris sur la droite joignant les deux objets.

A-1-1 G est la constante de gravitation universelle. Donner son unité dans le système international.

A-1-2 On considère deux corps ponctuels A et B, de masses respectives 100 kg et 2 kg, distants de 1 m l'un de l'autre.

- Calculer l'intensité de la force de gravitation \vec{f} exercée par B sur A. On prendra $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ SI

.../... 2

- Cette force peut s'écrire : $\vec{f} = m\vec{g}$ où \vec{g} est le vecteur champ de gravitation créé par B au point où est placé A. Donner l'expression du vecteur \vec{g} et préciser ses caractéristiques.

Faire un schéma où seront représentés les corps A, B ainsi que \vec{f} et \vec{g} .

A-2 Pratiquement, les seuls champs de gravitation qui se manifestent de manière sensible sont ceux des astres.

On peut admettre avec une très bonne précision que ceux-ci sont des solides constitués chacun par des couches sphériques de même centre ; chaque couche étant homogène ; on dit qu'ils ont une répartition de masses à symétrie sphérique.

On démontre que le vecteur champ de gravitation créé par un solide à répartition de masses à symétrie sphérique en tout point de l'espace est le même que celui créé par un point matériel de même masse confondu avec son centre.

A-2-1 Donner les caractéristiques du vecteur champ de gravitation terrestre \vec{g}_T en un point situé à une distance $r = 149,5 \cdot 10^6$ km du centre de la Terre (cette valeur de r représente la distance Terre - Soleil). En déduire l'intensité de la force d'interaction Terre - Soleil.

Masse du Soleil : $M_s = 1,98 \cdot 10^{30}$ kg ; masse de la Terre : $M_T = 5,98 \cdot 10^{24}$ kg.

A-2-2 La Lune est un satellite naturel de la Terre, sa masse $M_L = 7,34 \cdot 10^{22}$ kg, la distance qui sépare son centre d'inertie à celui de la Terre vaut $d = 3,84 \cdot 10^8$ m.

Comparer les champs gravitationnels créés par la Terre et la Lune en un point C situé à 10^4 km du centre de la Terre.

Quelle est l'influence du champ gravitationnel lunaire sur le mouvement d'un satellite artificiel de la Terre ?

B- Mouvement d'un satellite de la Terre.

(10 points)

On considère un satellite de la Terre. Le satellite est à l'altitude h et décrit une orbite circulaire de rayon r . La masse de la Terre sera notée M_T et celle du satellite m.

B-1 Le satellite n'étant soumis qu'à la seule force de gravitation terrestre, montrer que son mouvement est uniforme.

B-2 Etablir, en fonction G, M_T et r, l'expression de la vitesse v et celle de la période T du satellite. Faire l'application numérique avec les données suivantes :

Masse de la Terre : $M_T = 5,98 \cdot 10^{24}$ kg; Rayon de la Terre : $R_T = 6370$ km,

Altitude du satellite : $h = 320$ km

B-3 Après avoir précisé le plan du mouvement d'un satellite géostationnaire, calculer son altitude. En quoi la caractéristique essentielle évoquée dans le texte pour le satellite géostationnaire est particulièrement importante ?

B-4 La navette spatiale Columbia a été placée sur une orbite circulaire à l'altitude de 250 km. Calculer sa vitesse et sa période.

Le plan de l'orbite de Columbia passait le 28 Novembre 1983 par Cherbourg et Nice, ces deux villes sont distantes de 940 km. Calculer l'intervalle de temps séparant les passages de Columbia au dessus de ces deux villes (on néglige la rotation terrestre).

DEUXIEME PARTIE : INTERACTION ELECTROMAGNETIQUE A L'ECHELLE DES MOLECULES ET DES ATOMES.

L'interaction électromagnétique se manifeste à divers niveaux :

- Les molécules des corps sont constituées d'atomes électriquement neutres. Cependant l'existence de charges positives au sein du noyau et de charges négatives dans le cortège électronique fait que chaque molécule exerce un ensemble de forces d'interaction avec des molécules voisines. Ce qui donne au fluide moléculaire une certaine cohésion.
- Sur un autre plan, la formation d'une molécule à partir de deux atomes est due au fait que l'énergie potentielle d'interaction de ces deux atomes, fonction de la distance qui les sépare, présente une valeur minimale. Cette valeur minimale de l'énergie est responsable du phénomène de liaison chimique entre les deux atomes.
- Aussi, lorsqu'un rayonnement traverse la matière, l'énergie interne de celle-ci est modifiée par suite de l'interaction du rayonnement avec les atomes constitutifs de la matière.

C : Interaction molécule – molécule. (10 points)

L'expérience montre que l'ensemble des forces d'interaction d'une molécule avec les molécules voisines est relié à une énergie potentielle d'interaction entre deux molécules donnée par la relation suivante :

$$E_p(r) = \frac{-C}{r^6} + \frac{B}{r^{12}}$$

C et B sont des constantes positives, r est la distance entre deux molécules (supposées ponctuelles).

C-1 Donner l'expression de la force d'interaction entre deux molécules. Quel nom donne-t-on souvent à cette force ?

C-2 Déterminer en Å la valeur r_0 de r pour laquelle cette force change de signe. On donne :

$$\frac{B}{C} = 5.10^2 \text{ Å}^6$$

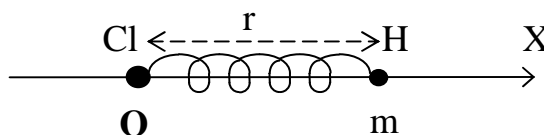
C-3 Préciser la nature de cette force selon les valeurs de r par rapport à r_0 .

C-4 Esquisser la courbe d'énergie potentielle et montrer que pour des faibles valeurs de r autour de r_0 le système oscille.

D : Interaction atome - atome (dans une molécule) : (15 points)

On étudie l'interaction atome – atome au sein d'une molécule diatomique telle que la molécule de chlorure d'hydrogène H-Cl. On peut faire une étude approchée du mouvement de vibration de la molécule à partir de considérations d'énergie, si on ramène ce mouvement à une dimension et si on se limite à des oscillations de faible amplitude. Il sera admis que la masse de l'atome de chlore Cl peut-être considérée infiniment grande vis-à-vis de la masse de l'atome d'hydrogène H (suivant cette hypothèse le centre de gravité de la molécule est ainsi constamment confondu avec le noyau de l'atome de chlore).

Les conditions suggérées amènent à représenter la molécule de chlorure d'hydrogène HCl selon le modèle suivant (Cl considéré comme fixe, H mobile) :



Il existe une position d'équilibre pour H, correspondant à l'abscisse $r = r_0$.

Pour toute autre position $r = r_0 + x$ de H, nous admettrons que l'énergie potentielle $E_p(x)$ de la

molécule est bien représentée par : $E_p(x) = \frac{1}{2}K x^2 + Cte$.

K est une constante positive. $K = 4,61.10^2$ SI

D-1 Expliquer pourquoi la valeur algébrique de la force agissant sur l'atome d'hydrogène H est $F(x) = -Kx$

D-2 Etablir l'équation différentielle régissant l'abscisse $x(t)$ décrivant le mouvement de l'atome d'hydrogène le long de l'axe OX (l'origine O de l'axe est confondu avec le centre d'inertie de l'atome de chlore Cl)

Déterminer la solution générale de cette équation.

Préciser les valeurs de la période T, de la fréquence ν et de la pulsation ω du mouvement.

D-3 Il est d'usage d'exprimer les fréquences des vibrations moléculaires en cm^{-1} c'est-à-dire en donnant l'inverse de la longueur d'onde d'une radiation électromagnétique de même fréquence ν .

D-3-1 Montrer que 1 cm^{-1} correspond à une fréquence 3.10^{10} Hz et à une énergie de $1,24.10^{-4}$ eV

D-3-2 Les fréquences de vibrations de molécules diatomiques sont connues (compte non tenu d'anharmonicité) : $\nu(H_2) = 4401\text{ cm}^{-1}$; $\nu(D_2) = 3112\text{ cm}^{-1}$

D-3-2-1 Donner l'énergie correspondant à ces modes de vibrations pour chaque type de molécule. A quoi correspondent ces énergies ?

D-3-2-2 Calculer les valeurs des constantes K correspondant aux molécules H_2 et D_2

Données : $h = 6,6210^{-34}$ J.s $N = 6,022.10^{23}$ mol⁻¹ $H = 1$ g/mol

$D = 2$ g/mol $C = 3.10^8$ m/s

E : Interaction rayonnement – matière. (40 points)

E-1 Loi d'atténuation

Un rayonnement traversant la matière en ressort généralement atténué par suite d'interaction avec les atomes de la matière traversée.

Si N_0 représente le nombre de photons incidents tombant normalement sur la surface d'un matériau absorbant d'épaisseur x , le nombre de photons transmis est : $N = N_0 e^{-\mu x}$

Dans cette relation μ est le coefficient linéaire d'atténuation (ou d'absorption) du matériau.

La couche de demi – atténuation (CDA) de ce matériau est l'épaisseur $x_{1/2}$ pour laquelle la moitié des photons incidents est absorbée.

Soit $N = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\mu x_{1/2}}$ d'où : $x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$

E-1-1 : La C.D.A d'un faisceau monochromatique de rayons RX est de 0,2 cm de plomb.

Quelle épaisseur de ce métal faut-il interposer pour réduire l'énergie transportée par ce faisceau au 1/1000 de sa valeur ?

CLASSES DE TERMINALE

E-1-2 Une épaisseur de plomb de 2,3 cm réduit au 1/100 le débit de fluence énergétique d'un faisceau parallèle étroit de photons mono énergétiques de 1 MeV.

Calculer le coefficient linéaire d'atténuation de plomb pour cette énergie.

E-1-3 Le coefficient d'atténuation μ du fer vaut $3,10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ pour une énergie des photons de 1 MeV. Quelle épaisseur de ce métal réduirait au 1/100 le débit de fluence énergétique d'un faisceau parallèle étroit de ces photons ? Commenter.

E-1-4 : Pourquoi selon- vous ceux qui manipulent des produits radioactifs à forte teneur (de RX par exemple) doivent porter des gants et des vêtements imbibés de sel de plomb ?

E-2 – Les trois processus d'interaction rayonnement - matière.

Trois composantes fondamentales de l'interaction rayonnement - matière sont à distinguer : l'effet photoélectrique, l'effet Compton et l'effet de matérialisation. Etudions quelques aspects liés à ces processus.

E-2-1 L'effet photo électrique.

L'effet photoélectrique externe est le phénomène d'émission d'électrons par un métal éclairé par une radiation lumineuse de fréquence convenable. Il résulte d'une interaction des photons constituant la radiation avec les électrons du métal. Lorsqu'un photon incident « efficace » entre en collision avec un électron lié (des couches K, L...) de l'atome, il disparaît totalement.

La loi de conservation de l'énergie s'écrit :

$$h\nu = W_0 + E_c$$

Dans cette relation $h\nu$ représente l'énergie du photon incident, E_c est l'énergie cinétique de l'électron expulsé et W_0 l'énergie d'extraction de cet électron.

On a : $W_0 = h\nu_0$ si ν_0 est la fréquence seuil, soit : $h\nu = h\nu_0 + \frac{1}{2}mv^2$

E-2-1-1 Une cathode au césium est éclairée successivement par des radiations de longueur d'onde 5890 \AA et 6160 \AA . L'énergie cinétique des électrons extraits vaut respectivement 0,295 eV et 0,202 eV. Calculer la longueur d'onde seuil photo électrique du césium.

E-2-1-2 Quelle valeur de la constante de Planck peut-on en déduire ?

Vitesse de la lumière : $C = 3.10^8 \text{ m/s}$; charge de l'électron : $q_e = -1,6.10^{-19} \text{ C}$.

E-2-1-3 L'effet photoélectrique interne est le phénomène de transition des niveaux moins excités aux niveaux les plus excités des particules (atomes, molécules, ions) sous l'action d'une radiation convenable. Le plus souvent cette absorption est suivie de l'émission d'une radiation de même fréquence.

La spectroscopie, dont l'objet est l'étude et l'interprétation des spectres d'émission et d'absorption, a permis des progrès considérables dans la connaissance de l'infiniment petit (structure de l'atome) et de l'infiniment grand (les astres et les étoiles).

a) L'analyse du spectre d'émission d'une lampe à vapeurs de sodium révèle la présence de raies de longueur d'onde bien définies.

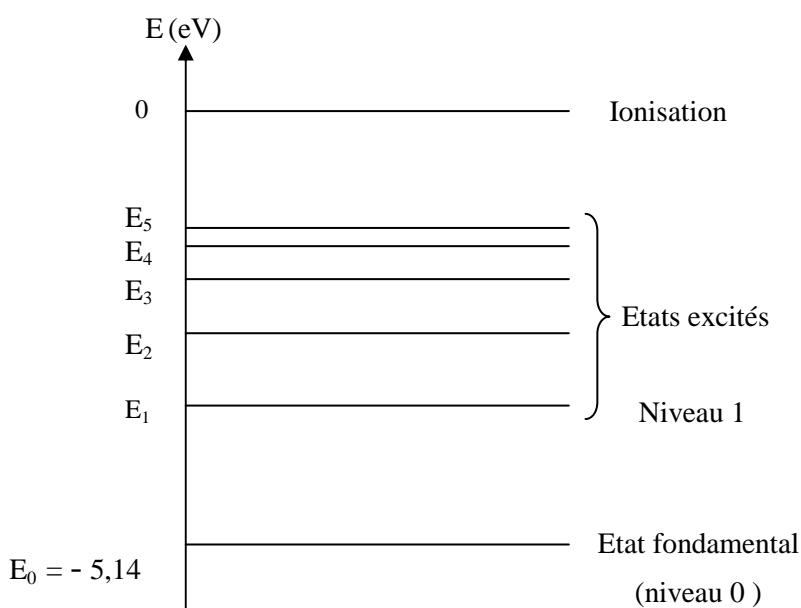
Pourquoi utilise-t-on dans cette expérience d'observation de raies la vapeur de sodium plutôt que le métal ?

b) La figure ci-après représente le diagramme simplifié des niveaux d'énergie de l'atome de sodium (sur ce schéma l'échelle des énergies n'est pas respectée).

A partir du tableau ci-après donnant la longueur d'onde de la raie émise lors d'une transition entre deux niveaux, calculer l'énergie des différents niveaux. Le résultat sera donné à chaque fois avec deux chiffres significatifs après la virgule.

c) Un photon d'énergie 3,00 eV arrive sur un atome de sodium au repos dans l'état fondamental. Est-il absorbé ? Pourquoi ?

d) Montrer que si un atome de sodium est excité dans son premier niveau E_1 , il suffit d'un photon d'énergie supérieure à 3,03 eV pour l'ioniser. Constante de Planck : prendre $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s

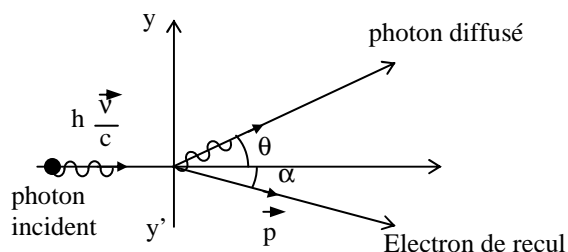


Niveau excité	4	5	1	3	2
Niveau de désexcitation	0	1	0	1	1
Longueur d'onde de la raie émise (en nm)	330,3	568,8	589,3	815,9	1138,2

E-2-2 Effet Compton

Le physicien Arthur Holly Compton a étudié en 1922 l'action des rayons X de fréquence ν élevée sur des cibles de graphite. Il a observé qu'à la sortie de la cible, les rayons X sont diffusés et que les rayons diffusés contiennent des photons dont la fréquence ν' , qui dépend de l'angle de diffusion θ , est inférieure à la fréquence ν .

Les radiations diffusées de fréquence inférieure à la fréquence incidente s'interprètent par don d'une partie de l'énergie des photons incidents aux électrons libres de la cible.



Si on considère qu'un photon incident entre en collision élastique avec un électron libre ou faiblement lié, les lois de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie s'écrivent en mécanique relativiste :

$\begin{cases} \frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} + \gamma m\vec{V} \\ mc^2 + h\nu = h\nu' + \gamma mc^2 \end{cases}$	$mc^2 = \text{Energie de l'électron au repos}$ $\gamma mc^2 = \text{énergie totale de l'électron de recul}$ $\gamma = \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} ; \quad \vec{V} = \text{vitesse de l'électron de recul}$
---	--

La résolution donne :

$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos\theta)$ <p>Si $\Delta\lambda$ est en \AA ; on a $\Delta\lambda = 0,024 (1 - \cos\theta)$ $\Delta\lambda$ est appelé décalage Compton</p>	λ' = longueur d'onde du photon diffusé λ = longueur d'onde du photo incident θ = angle de déviation du faisceau incident de photons
---	--

E-2-2-1 Lors d'un effet Compton on a constaté :

- que le photon diffusé faisait un angle de 60° avec la direction du photon incident.

- que l'énergie transférée à l'électron de recul était égale à 0,511 MeV.

Calculer en MeV l'énergie du photon incident (on n'a pas à utiliser les valeurs numériques de h et c, on rappelle que $mc^2 = 0,511 \text{ MeV}$). La solution pourra être donnée par une équation du 2^e degré.

E-2-2-2 Des rayons RX ayant une longueur d'onde de 0,04 nm subissent une diffusion Compton. Déterminer la longueur d'onde des photons diffusés aux angles 30°; 60°; 90°; 120°; 150°; 180°.

E-2-2-3 Déterminer l'énergie des photons diffusés correspondant à ces RX.

E-2-2-4 Lequel de ces angles de diffusion procure plus d'énergie à l'électron ? Justifier la réponse.

E-2-3- Effet de matérialisation.

Lors de l'interaction d'un photon de fréquence ν avec le champ coulombien d'un noyau lourd une paire « négaton – positron » prend naissance. Le négaton et le positron sont des particules de même masse m et de charge respective - e et +e

Le principe de conservation de l'énergie conduit à : $h\nu = 2 mc^2 + E^+ + E^-$

E^+ et E^- représentent des énergies cinétiques du positron et du négaton créés lors de l'interaction.

E-2-3-1 On a pu mettre en évidence la création de la paire « positron – négaton » en matérialisant les trajectoires de ces particules à l'aide d'un dispositif approprié, une chambre à bulles. Dans la chambre à bulles règne un champ magnétique \vec{B}_T intense. Sous l'action du champ

magnétique une particule de charge q, de masse m, décrit un arc de cercle de rayon $R = \frac{p}{q/B_T}$

, relation où p représente la quantité de mouvement de la particule. Cette relation est valable en mécanique relativiste.

Sur la figure ci-contre est reproduite la trajectoire du positron à l'échelle 1/10. Nous admettrons que le rayon de la trajectoire en B est tel que $r_B = \frac{AC}{2}$, de même que $r_D = \frac{CE}{2}$,

Déterminer les rayons successifs $r_B, r_D, r_F \dots$

E-2-3-2 Sachant que B_T vaut 1 T quelles sont les quantités de mouvement aux points B, D, F ?

E-2-3-3 Quelles sont les énergies cinétiques du positron aux points B, D, F ..?

On se rappellera que :

- L'énergie totale E d'une particule relativiste de masse m et sa quantité de mouvement p

sont liées par : $E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$

- Aussi $E = E_C + E_0$ avec E_C = énergie cinétique de la particule et $E_0 = mc^2$ son énergie au repos.

On donne la masse du positron : $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

TROISEME PARTIE : INTERACTION FORTE.

L'atome est constitué d'un noyau central autour duquel gravitent des électrons. Alors que le diamètre de l'atome est de l'ordre de 10^{-10} m, celui du noyau n'est que de l'ordre de 10^{-15} m.

A l'intérieur du noyau se trouvent des neutrons et des protons. D'après la loi de Coulomb les protons se repoussent et devraient faire éclater le noyau. Si le noyau est stable, c'est qu'entre les nucléons qui le constituent s'exerce un nouveau type de force attractive : l'interaction forte.

L'interaction forte est aussi responsable des réactions nucléaires (réacteurs, bombes, étoiles comme le Soleil). Cette interaction forte est de très loin plus intense que la force électrique mais son rayon d'action est très petit, de l'ordre de 10^{-15} m (dimension du noyau). C'est la plus intense des interactions connues.

F : Interaction nucléon - nucléon (10 points)

On prend généralement pour expression de l'énergie potentielle d'interaction nucléon– nucléon :

$$E_p(r) = \frac{-C}{r} \cdot e^{-r/r_0}, \quad C = 10^{-26} \text{ J.m} \quad r_0 = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m.}$$

F-1 Dédire de $E_p(r)$ l'expression de la force $F(r)$ agissant sur un nucléon dans le champ de force d'un autre nucléon.

F-2 Calculer $F(r_0)$ et $F(4r_0)$. Que peut – on dire sur la portée des forces nucléaires ?

F-3 On désire comparer les forces d'interaction au sein des noyaux et les forces d'interaction entre le noyau et le cortège électronique de l'atome.

F-3-1 Donner l'expression de la force d'interaction coulombienne entre le proton et l'électron de l'atome. Calculer l'intensité de cette force si on considère que la distance r entre les deux particules est de l'ordre du rayon moyen de l'atome, soit : $r = 0,53 \text{ \AA}$.

On donne la charge du proton : $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; et $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$

F-3-2. Partant des résultats trouvés pour les questions F-2) et F-3-1) et en tenant compte des données relatives aux distances, que peut-on dire des forces d'interaction nucléaire par rapport aux forces d'interaction coulombienne ? L'affirmation faite dans le texte introductif de la troisième partie sur le rapport entre les intensités des deux types de forces est-elle justifiée ?

Prendre pour le nombre e (exponentiel) : $e = 2,71$.

Rappels et compléments sur l'énergie potentielle.

Une force appliquée en un point M est conservative si son travail, dans un référentiel donné, entre deux positions quelconques M_1 et M_2 , ne dépend que de ces deux positions et pas du chemin suivi pour aller de M_1 à M_2 .

Si la force \vec{F} est conservative, alors il existe une fonction $E_p(M)$ du point M , appelée énergie potentielle, dont la variation entre M_1 et M_2 est égale à l'opposé du travail de la force \vec{F} entre ces deux points :

$$\Delta E_p = E_p(M_2) - E_p(M_1) = -W(\vec{F})$$

$E_p(M)$ n'est fonction que des coordonnées de position du point M , c'est à dire ne dépend que de la position de M .

Si le mouvement de M est repéré uniquement à l'aide du paramètre x (paramètre de position en mètre), on peut écrire : $F(x) = - \frac{dE_p(x)}{dx}$