

Objectif	Corpus de documents pour travailler sur le thème : Que se passe-t-il quand une théorie physique ne permet pas de prévoir la réalité observée ? Cas des lois en mécanique : une solution législative.
Niveau concerné	Collège : cycle 4 (niveau troisième) et Lycée (niveau seconde et première spécialité).
Auteur(s)	Pascal DOURNON – Cité scolaire Stendhal

A l'aide des documents et des extraits des livres de Galilée mis à disposition :

- intégrer un ou plusieurs extraits à une séquence d'enseignements (niveau d'enseignement, partie du programme, expériences, activités proposées aux élèves),
- questionner les élèves à partir de ces extraits,

Remarque : les niveaux sont donnés à titre indicatif

Document N°1. La physique d'Aristote.

« Tout ce qui est en mouvement est nécessairement mû par quelque chose. Si donc il n'a pas en lui-même le principe de son mouvement – comme les êtres vivants il est évidemment mû par un autre ». (Physique (VII, I)).

« Un corps en mouvement s'arrête quand la force qui le pousse ne peut plus agir de façon à le pousser. » (Mécaniques)

Les deux livres écrits par Aristote « Physique » et « sur les Cieux » eurent une très grande influence, et dominèrent les sciences jusqu'à l'époque de Galilée (1564-1642). Des mots comme la "quintessence" ou "sublunaire" sont dérivés des théories exposées dans ces livres.

Le mouvement

Pour les Grecs, cherchant à rendre compte scientifiquement du mouvement, la vue purement mécanique ne leur venait pas à l'esprit, sauf dans le cas de rares génies comme Démocrite ou Archimède. Deux ensembles de phénomènes semblaient importants : le mouvement des animaux, et le mouvement des corps célestes.

Il semblait donc naturel d'assimiler des mouvements apparemment sans vie avec ceux des animaux. Un enfant distingue encore les animaux vivants des autres choses par le fait que les animaux se déplacent de manière autonome ; pour de nombreux Grecs, et particulièrement pour Aristote, cette particularité était la base d'une théorie générale de la physique.

Quand un chien va prendre un os, il semble de bon sens de dire que le chien bouge tandis que l'os est au repos (tant que le chien ne l'a pas pris) ; il semble aussi naturel de dire que le mouvement du chien à un objectif, prendre l'os, et que c'est "dans la nature du chien".

Mais il s'est avéré que cette façon de voir ne peut pas être appliquée à la matière inerte, et que dans les études scientifiques la notion de "finalité" n'est d'aucune utilisée ; la notion de mouvement, en science, ne peut pas être traitée autrement que de manière relative.

Mais qu'en était-il des corps célestes ? Ils sont différents des animaux en ce que leurs mouvements sont réguliers, mais peut-être sont dûs seulement à leur perfection supérieure. Tout philosophe grec avait appris dans sa jeunesse à regarder le soleil et la lune comme étant des dieux ; Anaxagore a été poursuivi pour impiété car il pensait qu'ils n'étaient pas en vie. Il était naturel qu'un philosophe qui ne pouvait plus regarder les corps célestes comme eux-mêmes divins en arrive à penser qu'ils étaient mus par la volonté d'un Etre Divin habité par l'amour hellénique de l'ordre et de la simplicité géométrique.

Ce que dit Aristote

La physique, chez Aristote, est la science que les Grecs appelaient "phusis" (ou "physis"), un mot que se traduit pas "nature", mais n'a pas exactement le sens qu'on lui donne aujourd'hui. Nous parlons encore de "sciences naturelles" ou d' "histoire naturelle" [ou même de "philosophie naturelle"], mais "nature" par lui-même, bien qu'un mot très ambigu, signifie rarement exactement la même chose que ce que signifiait "phusis".

"Phusis" avait à voir avec la croissance ; on peut dire que c'est la "nature" d'un gland de devenir un chêne, et dans ce cas nous serions en train d'utiliser le mot nature dans le même sens qu'Aristote. La "nature" d'une chose, dit Aristote, est sa finalité, ce pour quoi il existe.

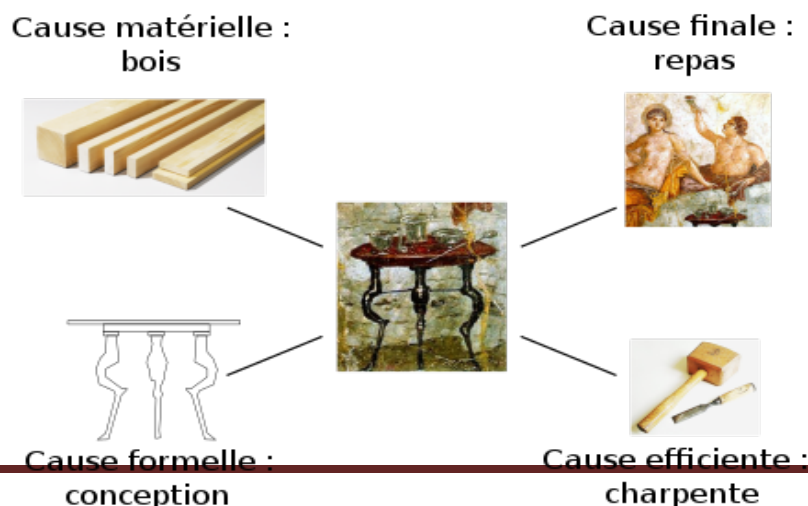
Explications causales

Aristote développe une pensée physique et métaphysique complexe. Il cherche à comprendre les causes et leurs effets. Il distingue quatre causes, qui chacune président au réel. La cause n'est pas entendue par le philosophe dans son sens mécaniciste moderne ; Aristote prend également en compte la volonté d'agir, c'est-à-dire la finalité de l'action.

Les quatre causes qu'il identifie sont les suivantes :

- **cause matérielle** (la matière qui constitue une chose), le comportement d'un objet est lié à son essence, à la nature des matériaux qui le constituent. Exemples : un bonbon n'a pas d'ombre, car on le mange la terre n'a pas d'ombre car elle est trop grande quand un homme marche au soleil il a une ombre, la moto n'a pas d'ombre car elle va trop vite l'oiseau n'a pas d'ombre car il n'est pas debout la lune n'a pas d'ombre parce qu'elle est jaune être chaud est une propriété de la laine, être froid est une propriété du fer.
- **cause formelle** (l'essence de cette chose), la causalité formelle elle permet d'expliquer en quoi la matière peut induire la forme des objets qui en seraient constitués et issus. Exemple 1: il est normal que la descendance d'un animal présente les mêmes caractéristiques que ses géniteurs. Exemple 2: les dimensions de l'ombre sont identiques à celles de l'objet (cf dessin d'enfant CP-CM2).
- **cause efficiente** (le principe de changement) quand on peut mettre en jeu une explication qui a deux propriétés essentielles: elle s'exerce tant que l'effet a lieu. elle s'exerce toujours au contact de deux objets et produit des effets là où elle s'exerce. Elle est souvent utilisée quand il y a un changement brusque : allumage ou extinction d'une ampoule, mise en mouvement d'un objet immobile. Exemple: C'est parce que je pousse le landau qu'il avance, il s'arrête quand je ne pousse plus.
- **cause finale** (ce « en vue de quoi » la chose est faite) " la cause signifie la fin " Elle est utilisée lorsque l'existence d'un objet est justifiée de par sa fonction présente ou future. Elle est souvent utilisée avec la causalité formelle. Exemple : la bouteille thermos garde la chaleur parce qu'elle est faite pour ça.

A titre d'illustration, on peut dire que la *cause matérielle* d'une écuelle est le bois ou le métal, la *cause formelle* le fait de contenir des aliments, sa *cause efficiente* le procédé par lequel on l'a fabriquée et sa *cause finale* son usage en alimentation.



Conséquences sur les âges qui suivirent

Cette théorie présenta de nombreuses difficultés pour les époques ultérieures. Les comètes qui étaient reconnues comme destructibles, devaient être assignées à la sphère sublunaire, mais au XVII^e siècle on découvrit qu'elles suivaient des trajectoires autour du soleil, et étaient très rarement aussi près de la terre que ne l'était la lune. Etant donné que le mouvement naturel des corps terrestres est rectiligne, on pensait qu'un projectile lancé horizontalement suivait une trajectoire horizontale pendant un moment, puis soudainement tombait verticalement. La découverte par Galilée que le projectile suivait une parabole choqua ses collègues aristotéliens. Copernic, Kepler et Galilée durent combattre Aristote tout autant que la Bible pour établir que la terre n'était pas le centre de l'univers, mais tournait sur elle-même en 24 heures et autour du soleil en une année.

Conclusion

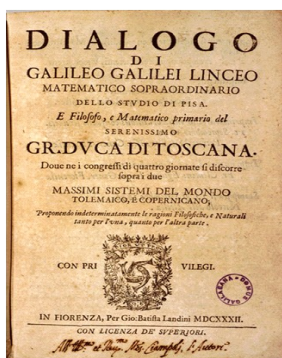
Pour en venir à des considérations plus générales : la physique aristotélienne est incompatible avec la "première loi du mouvement" de Newton, déjà énoncée par Galilée. Cette loi stipule que chaque corps laissé à lui-même [i.e. sans force s'exerçant sur lui], s'il est déjà en mouvement, continuera en ligne droite à vitesse constante. Ainsi, des causes extérieures sont nécessaires non pas pour expliquer le mouvement, mais pour expliquer un *changement* dans le mouvement, soit en vitesse soit en direction. Le mouvement circulaire, qu'Aristote pensait être celui "naturel" des corps célestes, implique un changement continu de direction, et une force centripète vers le centre [ou un foyer pour un mouvement elliptique], comme dans la loi de la gravitation de Newton.

Finalement : la vue selon laquelle les corps célestes sont éternels et incorruptibles dut être abandonnée. Le soleil et les étoiles ont des durées de vie très longues, mais rien ne vit pour toujours. Les étoiles (dont le soleil) sont formées dans des nébuleuses, et à la fin elles explosent ou meurent en quelque sorte de froid. Rien dans le monde visible n'est exempté de changement et de disparition ; la croyance aristotélienne en le contraire, bien qu'acceptée par les chrétiens du Moyen Âge, est un produit des cultes païens du soleil, de la lune et des planètes.

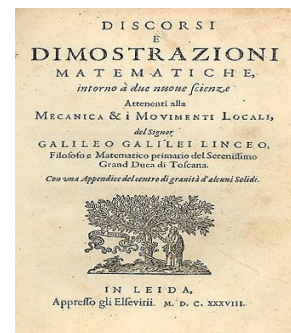
Document N°2 : Textes historiques de Galilée en lien avec les programmes de mécanique de cycle 4, 2de et spécialité SPC.

Il s'agit d'une sélection de textes écrits par Galilée, extraits de deux ouvrages, pour rendre compte de ses travaux en mécanique et une nette remise en cause de la mécanique aristotélienne enseignée jusqu'alors par les Jésuites (Concile de Trente).

Dialogue sur les deux principaux systèmes du monde (Dialogo sopra i duo sistemi del mondo)
1632



Discours concernant deux sciences nouvelles (Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze)
1638



Ces ouvrages ont pour particularités d'être écrits en italien (et non en latin) et de se présenter sous la forme de dialogues, qui mettent en scène deux ou trois personnages.

Simplicio
 qui défend les conceptions d'Aristote, il représente les théories officielles de l'époque... il est un peu limité et dogmatique... et abdique (assez) facilement après quelques résistances !

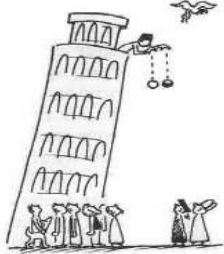


Salviati
 qui parle au nom de Galilée. A l'image du savant, il manque légèrement de modestie. (ce qui lui a été souvent reproché dans ses correspondances.)

Sagredo
 l'honnête homme curieux (il sert de faire-valoir à Salviati)

Document N°3. Niveau cycle 4 et seconde.

Une boule de liège et une boule de plomb lâchées ensemble du haut de la tour de Pise touchent-elles le sol en même temps ?



1. L'extrait (Discours concernant deux sciences nouvelles (1^{ère} journée))

Simplicio Aristote a démontré que, dans un même milieu, des objets de masses différentes tombent à des vitesses différentes et que ces vitesses sont proportionnelles aux masses des objets. [...] Vous n'avez tout de même pas l'intention de nous prouver qu'une boule de liège tombe à la même vitesse qu'une boule de plomb ? [...]

Salviati Je doute fort qu'Aristote se base sur une expérience pour affirmer cela. [...]

Simplicio J'ai de la peine à croire qu'une larme de plomb puisse tomber aussi vite qu'un boulet de canon.

Salviati Je ne voudrais pas, signor Simplicio, qu'à l'exemple de tant d'autres, vous vous concentriez sur telle chose que j'ai dite et qui s'écarte de la vérité de l'épaisseur d'un cheveu, pour éviter de voir l'erreur aussi grosse qu'une amarre, qu'Aristote a commise. Aristote écrit : « Une boule de fer de cent livres, tombant d'une hauteur de cent coudées, arrive au sol avant qu'une boule d'une livre soit descendue d'une seule coudée ». Je dis, moi, qu'elles arrivent en même temps. Vous n'avez qu'à faire l'expérience, et vous constaterez qu'au moment où la grosse boule touche terre, l'autre en est éloignée de deux doigts seulement. Et vous voudriez maintenant, derrière ces deux doigts, cacher les quatre-vingt dix neuf coudées d'Aristote, et, relevant mon erreur minime, passer sous silence son énorme erreur.

Simplicio Quoi qu'il en soit, je n'arrive pas à croire que dans le vide, si le mouvement y était possible, un flocon de laine tomberait aussi vite qu'un morceau de plomb.

Salviati Doucement, signor Simplicio [...], écoutez plutôt ce raisonnement qui vous éclairera. Nous recherchons ce qui arriverait à des objets de masses très différentes dans un milieu de résistance nulle. [...] Seul un espace absolument vide d'air nous permettrait de percevoir une réponse. Comme un tel espace n'existe pas, nous observerons ce qui se produit dans des milieux peu résistants, par comparaison avec des milieux plus résistants ; et si nous trouvons que des objets différents ont des vitesses de moins en moins différentes lorsque les milieux sont de plus en plus faciles à traverser, [...] alors nous pourrions admettre avec une grande probabilité, me semble-t-il, que dans le vide les vitesses seraient toutes égales. [...] L'expérience qui consiste à prendre deux objets de masses très différentes, et à les lâcher d'une certaine hauteur pour observer si leurs vitesses sont égales, comporte quelques difficultés. En effet, si la hauteur est importante, le milieu gênera beaucoup plus l'objet léger, et sur une longue distance l'objet léger demeurera alors en arrière. [...] Cependant, si l'on prend deux objets de même forme et constitués du même matériau, et que l'on diminue la masse de l'un en même temps que sa surface, il ne se produit aucune réduction de vitesse. [...] J'en arrive donc à la conclusion que si l'on éliminait complètement la résistance du milieu, tous les objets tomberaient à vitesse égale.

2. Des expériences possibles

- Etude d'une chute libre (enregistrement réalisé par les élèves, utilisation d'un logiciel de pointage, exploitation à l'aide d'un tableur...)
- Tube de Newton (plume et bille en acier par exemple)
- Lâcher d'une balle de tennis et d'une boule de pétanque dans du sable ou de l'argile (prolongement possible sur les conversions d'énergie et l'énergie cinétique...)

3. Des vidéos, des simulations

- Vidéo de l'expérience de Galilée réalisée par David Scott sur la Lune :
<https://www.youtube.com/watch?v=vb2GDgTGa3g>



- Extrait du documentaire « Galilée la naissance d'une étoile » (4'00 à 6'15) :
<https://www.youtube.com/watch?v=YEiSyEpPRZ0>



- Extrait du film « Galilée ou l'amour de Dieu » (52'00 à 59'10) :
<https://www.youtube.com/watch?v=19cUtss1ga8>



- Simulateur de chute libre (demande à être paramétré) :
<https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Meca/R.F.D/chute1.php>

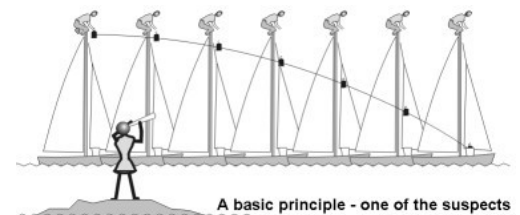


Document N°4. Niveau cycle 4 et seconde.

Si on lâche une pierre du haut du mât d'un bateau qui avance, tombe-t-elle exactement au pied du mât ou bien un peu en arrière ?

Trois extraits des Discours (2^e journée) et du Dialogue

1er extrait



Salviati : Commençons donc nos spéculations par cette remarque : quel que soit le mouvement qu'on attribue à la Terre, pour nous, qui habitons cette Terre et donc participons à son mouvement, il doit rester totalement imperceptible et comme inexistant, du moins tant que nous considérons seulement les choses terrestres. Mais inversement, ce mouvement doit aussi nous apparaître comme entièrement commun à tous les corps et objets visibles, qui, séparés de la Terre ne participent pas à son mouvement. Par conséquent, la vraie méthode pour chercher si on peut attribuer un mouvement à la Terre - et si oui, lequel - c'est d'examiner et observer si les corps séparés de la Terre paraissent avoir un mouvement qui leur appartienne également à tous ; car un mouvement qu'on ne constaterait que pour la Lune, par exemple, et qui semblerait totalement étranger à Vénus, à Jupiter ou aux autres étoiles, ne pourrait en aucune façon appartenir à la Terre ou à autre chose que la Lune. Or, il y a un mouvement très général, le plus important de tous : le Soleil, la Lune, les autres planètes et les étoiles fixes, tout l'univers en un mot, à la seule exception de la Terre, nous paraissent se mouvoir universellement d'est en ouest en vingt-quatre heures ; en première apparence du moins, rien ne s'oppose à ce que ce mouvement puisse appartenir à la Terre seulement plutôt qu'à tout le reste du monde, la Terre exceptée ; qu'on suppose l'un ou l'autre, on doit voir les mêmes apparences. [...]

Sur ce point, je vais, pour commencer par le plus général, présenter les raisons qui semblent appuyer la mobilité de la Terre; nous écouterons ensuite le *signor Simplicio* nous présenter les raisons qui s'y opposent.

Considérons d'abord simplement l'immense masse que constitue la sphère étoilée comparée à la petitesse du globe terrestre, qui y est contenu plusieurs millions de fois, pensons en outre quelle vitesse doit avoir son mouvement de révolution complète en un jour et une nuit; pour ma part, je ne puis me persuader que ce soit plus raisonnable et facile à croire : la sphère céleste ferait le tour et le globe terrestre resterait immobile !

Sagredo : Admettons que les deux suppositions doivent entraîner exactement les mêmes conséquences pour tous les effets qui peuvent naturellement dépendre de ces mouvements, alors, à première vue et de façon générale, celui qui jugerait plus raisonnable de faire se mouvoir tout l'univers afin de maintenir la stabilité de la Terre me paraîtrait plus déraisonnable encore que l'homme qui, montant au sommet de votre Coupole* pour donner un coup d'oeil à la ville et à sa campagne, exigerait alors, pour ne pas se fatiguer en tournant la tête, qu'on fasse tourner tout le paysage autour de lui. Si cette

supposition égale ou dépasse en absurdité l'exemple que je viens d'évoquer, l'autre pourrait bien, elle, présenter de nombreux avantages importants et m'amener à la trouver plus crédible. Mais Aristote, Ptolémée et le *signor Simplicio* ont dû sans doute trouver aussi des avantages : s'il y en a, il serait bon de nous les présenter ; sinon, il sera clair à mes yeux qu'il n'y en a pas et ne peut en avoir.»

** Il s'agit de la Coupole de Brunelleschi à Santa Maria del Fiore.*

2eme extrait

- Salviati** Comparons simplement l'immense masse de la sphère étoilée et la petitesse du globe terrestre. Si la Terre était immobile, il faudrait que la lourde sphère étoilée, dans son mouvement de rotation complète en un jour et une nuit, ait une vitesse bien considérable. C'est pourquoi je n'arrive pas à comprendre pourquoi ce serait plus raisonnable de croire que le globe terrestre est immobile et que l'ensemble des étoiles tourne.
- Sagredo** Moi je suis d'accord avec vous. Celui qui trouve raisonnable de faire tourner tout l'univers afin de maintenir la stabilité de la Terre me paraît finalement encore plus insensé que le seigneur qui monte au sommet d'une coupole pour donner un coup d'œil à sa ville et à sa campagne et qui exigerait alors, pour ne pas se fatiguer en tournant la tête, qu'on fasse tourner tout le paysage autour de lui ! [...]
- Simplicio** Il y a pourtant l'expérience si caractéristique de la pierre qu'on lâche du haut du mât d'un navire : quand le navire est au repos, elle tombe au pied du mât ; quand le navire est en route, elle tombe à une distance égale à celle dont le navire a avancé pendant le temps de la chute de la pierre ; et cela fait un bon nombre de coudées quand la course du navire est rapide. [...]
- Salviati** Si j'ai bien compris votre raisonnement, vous dites : quand le navire est à l'arrêt, la pierre tombe au pied du mât, et quand le navire est en mouvement, elle tombe loin du mât ; donc réciproquement, selon vous, si la pierre tombe au pied du mât, on peut en conclure que le navire est à l'arrêt, et si elle tombe loin du mât, c'est que le navire est en mouvement. Et puisque ce qui se produit sur le navire doit pareillement se produire sur la Terre, alors, si une pierre lâchée du haut d'une tour tombe au pied de la tour, on devrait nécessairement en conclure que le globe terrestre est immobile. Est-ce bien là votre raisonnement ?
- Simplicio** C'est cela, vous l'avez résumé avec clarté.
- Salviati** Très bien. Mais avez-vous jamais fait l'expérience du navire ?
- Simplicio** Je ne l'ai pas faite mais je crois que les savants qui en parlent en ont soigneusement fait l'observation ; de plus, cela est tellement évident qu'il n'y a là aucun doute quant au résultat.
- Salviati** Vous admettez donc que des savants aient pu décrire cette expérience sans la réaliser, et vous vous en remettez à leur bonne foi. Et si ça se trouve, ces mêmes savants se sont basés aussi sur les dires de leurs prédécesseurs sans réaliser eux-même cette expérience. En fait, je doute que l'on puisse trouver qui que ce soit qui l'ait faite. Car quiconque la ferait trouverait que l'expérience montre tout le contraire de ce que l'on trouve écrit : en effet, la pierre tombe toujours au même endroit du navire, que celui-ci soit à l'arrêt ou qu'il avance à n'importe quelle vitesse. Et comme le raisonnement vaut autant pour le navire que pour la Terre, si une pierre tombe toujours verticalement au pied d'une tour, on ne peut rien en conclure quant au mouvement ou au repos de la Terre. [...]
- Simplicio** Je sens que le doute en moi n'est pas entièrement dissipé. Peut-être est-ce de ma faute, car je ne puis comprendre aussi vite et aussi facilement que le signor Sagredo. En fait, il me semble que si la pierre fixée en haut du mât conservait en elle ce mouvement du navire même après qu'elle se soit séparée du navire, il faudrait alors aussi que la balle que laisserait tomber un cavalier chevauchant à bonne allure continue son mouvement et suive la course du cheval sans rester derrière lui. Je ne crois pas qu'on puisse observer un tel effet, à moins que le cavalier ne lance violemment la balle dans la direction où il avance. [...]
- Salviati** Je crois que vous vous trompez lourdement et je suis persuadé que l'expérience démontrera, au contraire, que la balle [...] courra avec le cheval et ne restera pas en arrière. La raison de tout cela me semble très claire : si vous étiez immobile et que vous lanciez cette balle, ne continuerait-elle pas son mouvement après avoir quitté votre main ? [...]
- Simplicio** Si je lui donne de l'élan avec mon bras, cela ne fait aucun doute ! Mais dans le cas présent, nous supposons que le cavalier la laisse simplement tomber.
- Salviati** C'est bien ainsi que je l'ai compris. Mais quand vous lancez la balle avec le bras, que reste-t-il dans la balle, une fois qu'elle a quitté votre main ? Ne conserve-t-elle pas le mouvement conçu par votre bras, qui lui fait continuer son mouvement en avant ? Or quelle importance pourrait avoir le fait que ce mouvement lui soit transmis par votre bras ou par le cheval ? Quand vous chevauchez, votre main ne court-elle pas, ainsi que la balle, à la même allure que le cheval ? Si, évidemment ! Par conséquent, lorsque vous ouvrez simplement la main, la balle continuera à avancer avec le mouvement qu'elle a acquis du cheval lui-même et qui vous est communiqué à vous, à votre bras, à votre main, et à la balle enfin. [...]

D'ailleurs, ils sont bien vaniteux ceux qui prétendent pouvoir, à cheval, lancer une épée en l'air, la rejoindre et la rattraper ; ils sont bien vaniteux, dis-je, car pour que ce qu'on a lancé vous retombe dans les mains, il faut le jeter droit en l'air, comme lorsqu'on est immobile ; alors, même si la course est très rapide, dans la mesure où elle est uniforme, l'objet retombera toujours dans les mains de celui qui l'a lancé, à quelque hauteur qu'il l'ait lancé.

3eme extrait

Salviati Enfermez-vous avec un ami dans la plus vaste cabine d'un grand navire et faites en sorte que s'y trouvent également des mouches, des papillons et d'autres petits animaux volants, ainsi qu'un grand récipient rempli d'eau dans lequel on aura mis des petits poissons. Suspendez également à bonne hauteur un petit seau et disposez-le de manière à ce que l'eau se déverse goutte à goutte dans un autre récipient à col étroit que vous aurez disposé en dessous. Puis, alors que le navire est à l'arrêt, observez attentivement comment ces petits animaux volent avec des vitesses égales quel que soit l'endroit de la cabine vers lequel ils se dirigent. Si vous lancez un objet à votre ami, vous ne devrez pas fournir un effort plus important selon que vous le lancerez dans telle ou telle direction. Et si vous sautez à pieds joints, vous franchirez des espaces semblables dans toutes les directions.

Une fois que vous aurez observé attentivement tout cela – si le navire est à l'arrêt, c'est évident que les choses doivent se passer ainsi – recommencez lorsque le navire se déplace, même à une très grande vitesse pourvu que le mouvement soit uniforme et ne fluctue pas de-ci de-là. Alors, vous n'observerez aucun changement dans les effets nommés, et aucun d'entre eux ne vous permettra de savoir si le navire avance ou bien s'il est arrêté. Si vous sautez, vous franchirez sur le plancher les mêmes distances qu'auparavant. Et si le navire se déplace, vous ne ferez pas pour autant des sauts plus grands vers la poupe que vers la proue, bien que, pendant que vous êtes en l'air, le plancher en dessous ait glissé dans la direction opposée à celle de votre saut. Si vous jetez un objet à votre ami, il ne faudra pas le lancer avec plus de force pour qu'il lui parvienne, que votre ami se trouve vers la proue et vous vers la poupe ou que ce soit le contraire. Les gouttes d'eau tomberont comme auparavant dans le récipient qu'on aura mis en dessous, sans qu'une seule goutte ne tombe du côté de la poupe, bien que, pendant le temps où la goutte est en l'air, le navire ait parcouru plus d'un empan. Les poissons dans leur aquarium nageront sans plus d'effort vers l'une ou l'autre partie du récipient et ils se dirigeront avec aisance vers la nourriture quel que soit l'endroit du bocal où elle aura été placée. Enfin, les papillons et les mouches continueront à voler indifféremment dans toutes les directions. Et on ne les verra jamais s'accumuler du côté de la cloison qui fait face à la poupe, ce qui ne manquerait pas d'arriver s'ils devaient s'épuiser à suivre le navire dans sa course rapide.

2. Des expériences possibles

- Expériences permettant de valider les observations réalisées sur le bateau (enregistrement fait par les élèves lâcher d'une balle en faisant de la trottinette, du skate board... utilisation d'un logiciel de pointage, exploitation à l'aide d'un tableur...)
- Expériences utilisant une caméra sport (relativité du mouvement, lien avec l'EPS...)
- Analyses de vidéos (skate, cycliste, chariot...)

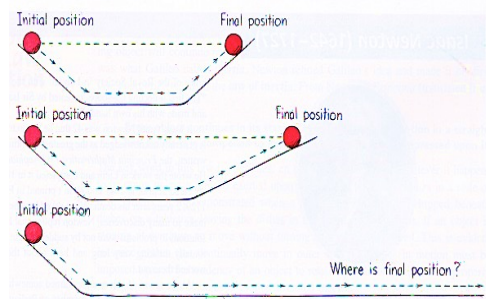
3. Des vidéos, des simulations

- Extrait du film « Galilée ou l'amour de Dieu » (9'00 à 13'20):
<https://www.youtube.com/watch?v=19cUtss1ga8>
- Relativité du mouvement :
http://www.ostralo.net/3_animations/animations_phys_mecanique.htm
<http://sciences.colleges.free.fr/Mouvement.html>
- Utilisation au cinéma :
<https://physique-chimie.discip.ac-caen.fr/spip.php?article1019>



Document N°5. Niveau seconde.

Peut-on avoir un mouvement éternel ?



1. L'extrait (Dialogue sur les deux principaux systèmes du monde)

Salviati Au fait, supposez une surface plane, polie comme un miroir, faite d'un matériau dur comme l'acier, et qui ne soit pas parallèle à l'horizon, mais légèrement inclinée. Vous posez dessus une bille parfaitement sphérique, d'un matériau lourd et très dur, en bronze par exemple. Si vous lâchez la bille, que croyez-vous qu'elle fera ? Pensez-vous qu'elle restera immobile ?

Simplicio Si cette surface est inclinée ?

Salviati Oui, dans le cas où la surface est inclinée.

Simplicio Je ne crois pas qu'elle va rester immobile ; au contraire, je suis sûr que spontanément elle ira dans le sens de la pente.

Salviati Et jusqu'à quand la bille roulera-t-elle ? Comment évoluera sa vitesse ? Remarquez bien que je parle d'une bille parfaitement ronde sur une surface parfaitement lisse afin de négliger tous les obstacles possibles ; et aussi, je veux que vous fassiez abstraction de la résistance de l'air.

Simplicio J'ai compris. A votre question, je réponds que cette bille continuera à se déplacer à l'infini, pourvu que la surface s'étende ainsi. Et son mouvement sera continuellement accéléré.

Salviati Supposons maintenant qu'on veuille que la bille remonte la pente. Le pourra-t-elle ?

Simplicio Pas spontanément ; elle n'ira vers le haut que si on la lance, et son mouvement ralentira.

Salviati Donc, vous avez décrit les mouvements de la bille dans deux situations différentes : vous dites que sur le plan incliné vers le bas, la vitesse de la bille augmente constamment ; mais que sur le plan ascendant, sa vitesse diminue... Alors dites-moi : qu'arriverait-il à la bille sur une surface qui ni ne monterait ni ne descendrait ?

Simplicio Ici, il faut que je réfléchisse un peu à la réponse. Puisqu'il n'y a pas de pente vers le bas, il ne peut y avoir d'accélération, et, puisqu'il n'y a pas de pente vers le haut, il ne peut y avoir non plus de ralentissement. Alors il me semble que la bille sera indifférente à l'accélération comme au ralentissement ; il me semble par conséquent que la bille devrait naturellement rester arrêtée.

Salviati Je suis d'accord avec vous pourvu que la bille soit posée à l'arrêt sur le plan. Mais si on lui donnait de l'élan dans une certaine direction sur cette surface horizontale, que se produirait-il ?

Simplicio Elle irait dans cette direction.

Salviati Mais comment serait son mouvement ? Accéléré comme sur le plan incliné vers le bas, ou bien ralenti comme sur le plan incliné vers le haut ?

Simplicio Comme la surface n'est pas inclinée, je ne vois aucune cause d'accélération ni de ralentissement.

Salviati En effet, et donc si rien ne cause l'accélération ou le ralentissement de la bille, elle roulera à vitesse constante. Mais alors, pendant combien de temps estimez-vous qu'elle continuera à se déplacer si elle ne ralentit pas ?

Simplicio Aussi longtemps que durera cette surface qui ni ne s'abaisse ni ne s'élève.

Salviati Par conséquent, si la surface était infinie, le mouvement serait éternel ?

Simplicio En effet, c'est ce qu'il me semble.

2. Des expériences

- Analyse classique d'une vidéo (curling par exemple) utilisation d'un logiciel de pointage, exploitation à l'aide d'un tableur...)
- Expérience avec des glaçons ou sur la table à coussin d'air (enregistrement fait par les élèves et exploitation)

3. Des vidéos, des simulations

- Simulation avec Interactive Physics :

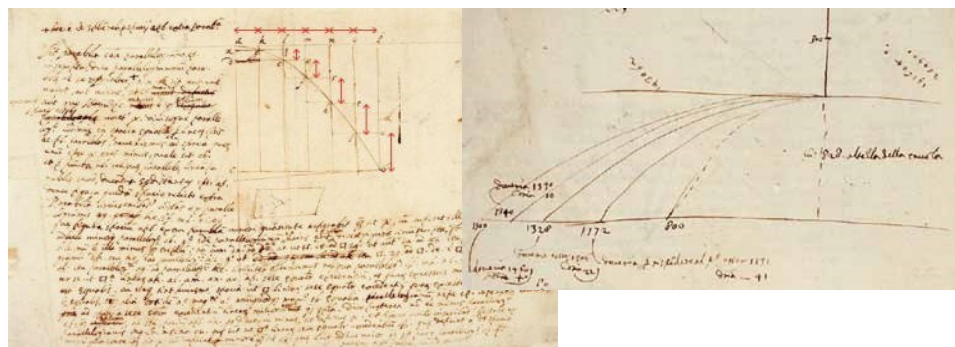
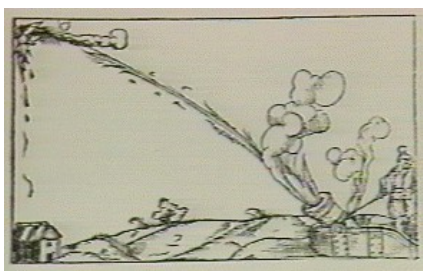
https://phet.colorado.edu/sims/html/forces-and-motion-basics/latest/forces-and-motion-basics_fr.html





Document N°6. Niveau cycle 4, seconde, spécialité.

Quelle est la trajectoire d'un boulet de canon ?



1. L'extrait (Discours concernant deux sciences nouvelles).

Salviati Nos précédentes conversations ont porté sur les propriétés des mouvements uniformes et accélérés sur des plans d'inclinaisons diverses. A présent, j'aimerais mettre en lumière certaines propriétés particulièrement intéressantes des objets animés d'un double mouvement, à savoir un mouvement uniforme et un mouvement naturellement accéléré : c'est le genre de mouvement que possède un projectile.

Donc, imaginons qu'une balle soit lancée sur un plan horizontal d'où l'on a écarté tout obstacle. D'après ce que l'on a dit précédemment, son mouvement se poursuivra uniformément et éternellement sur ce plan, pourvu qu'on le prolonge à l'infini. Supposons maintenant que le plan ne soit pas infini qu'il soit placé en hauteur : une fois que la balle sera parvenue à l'extrémité du plan en continuant sa course, il s'ajoutera à son précédent mouvement uniforme, la tendance vers le bas que lui confère la gravité. Le résultat sera ce mouvement composé d'un mouvement horizontal uniforme et d'un mouvement naturellement accéléré vers le bas. [...] Et la trajectoire de cette balle sera semi-parabolique.

Sagredo Cette manière de voir les choses est originale, mais votre raisonnement n'est basé que sur des suppositions. En effet, il faut faire l'hypothèse que le mouvement transversal demeure toujours uniforme, et que le mouvement vers le bas se fait avec une accélération constamment proportionnelle au carré des temps. Il faut aussi supposer que ces deux mouvements, en se combinant, ni ne s'altèrent ni ne se gênent, de sorte que la trajectoire du projectile, tout au long du mouvement, est bien régulière. Or cela, à mon avis, est impossible. [...] La trajectoire d'un projectile doit être une courbe fort différente d'une parabole.

Simplicio Pour ma part, j'ai d'autres difficultés. Nous considérons un plan horizontal, qui n'est incliné ni vers le haut ni vers le bas, comme si chaque point de ce plan était équidistant du centre de la Terre. Or il n'en est rien : si on part du centre de ce plan et qu'on va vers une de ses extrémités, on s'éloignera de plus en plus du centre de la Terre, et on s'élèvera donc constamment : par conséquent, sur un tel plan, le mouvement ne saurait se conserver, il ne pourrait d'ailleurs pas y demeurer uniforme, et il irait toujours en s'affaiblissant. En outre, il est à mon avis impossible de supprimer la résistance du milieu, au point qu'elle n'altère plus l'uniformité du mouvement transversal. Toutes ces difficultés font que votre raisonnement, établi sur des suppositions fragiles, ne peut se révéler exact dans la pratique.

Salviati Les difficultés et les objections que vous venez de formuler sont si bien fondées qu'il me paraît impossible de les écarter. Je suis d'accord avec vous pour dire que les conclusions théoriques sont modifiées dans la réalité : dans la pratique, le mouvement transversal n'est pas exactement uniforme, l'accélération naturelle ne s'effectue pas exactement selon la proportion admise, et la trajectoire du projectile n'a pas exactement la forme d'une parabole. Cependant, je vous fait remarquer que les longueurs mises en cause sont si petites en comparaison de la distance considérable qui nous sépare du centre de la Terre, que nous pouvons, à juste titre, assimiler la surface d'une table à un plan. Si dans la pratique on devait tenir compte de tels détails, on devrait commencer par reprendre les architectes lorsqu'ils croient, avec un fil à plomb, élever de hautes tours aux parois parallèles. J'ajoute d'ailleurs qu'Archimède et les autres supposaient déjà dans leurs travaux qu'ils étaient infiniment éloignés du centre de la Terre pour établir des propriétés géométriques. [...] Dans le cas qui nous intéresse d'un tir d'artillerie, comme la portée des projectiles n'excède pas quatre de ces milles alors que tant de milliers nous séparent du centre de la Terre, la forme parabolique de leur trajectoire est peu modifiée.

2. Des expériences

- Analyse d'une vidéo avec Pymecavidéo, Tracker

3. Des vidéos, des simulations

- Simulation de la trajectoire d'un boulet de canon :

<https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Meca/R.F.D/chute1.php>



Document N°7. Niveau spécialité.

Si on lâche une balle du deuxième étage, met-elle deux fois plus de temps à tomber que si on la lâche du premier étage ?



1. L'extrait (Discours concernant deux sciences nouvelles (3^e journée))

Simplicio Pouvez-vous nous dire si vos expériences donnent des résultats conformes à vos conclusions théoriques ? [...] C'est l'occasion, me semble-t-il, pour m'éclairer et pour éclairer tous ceux qui pensent comme moi, de rapporter maintenant l'une de vos nombreuses expériences [...].

Salviati Votre demande est celle d'un véritable homme de science ! C'est ainsi qu'il convient de procéder dans les sciences : toujours confirmer les conclusions théoriques par des expériences judicieuses. Je ne voudrais donc pas que cela semble du temps perdu si je consacre un peu de temps à décrire l'une de ces expériences. [...]

Afin d'établir la loi qui décrit la chute des objets, je me suis retrouvé à faire l'expérience suivante. Dans une règle, ou plus exactement dans un chevron de bois, long d'environ 12 coudées, large d'une demi-coudée et épais de 3 doigts, nous avons creusé un petit canal parfaitement rectiligne d'une largeur à peine supérieure à un doigt. Après l'avoir garni d'une feuille de parchemin bien lustrée pour le rendre aussi glissant que possible, nous y avons fait rouler une boule de bronze très dure, parfaitement arrondie et polie. Plaçant alors l'appareil dans une position inclinée, en élevant l'une de ses extrémités d'une coudée ou deux au-dessus de l'horizon, nous avons laissé rouler la boule dans le canal, en notant le temps nécessaire à une descente complète. Nous avons recommencé l'expérience plusieurs fois afin de déterminer exactement la durée de la chute, mais nous n'avons jamais mesuré de différence supérieure au dixième d'un battement de pouls.

Ensuite, nous avons fait descendre la même boule sur le quart du canal seulement : le temps mesuré était toujours rigoureusement égal à la moitié du temps précédent. Nous avons alors modifié l'expérience pour comparer le temps requis pour parcourir la longueur entière du canal avec le temps requis pour parcourir sa moitié, ou les deux tiers, ou les trois quarts, ou toute autre fraction. Dans ces expériences répétées une bonne centaine de fois, nous avons toujours trouvé que les distances parcourues étaient proportionnelles aux carrés des temps, et cela quelle que soit l'inclinaison du canal dans lequel on laissait descendre la boule. [...]

Pour mesurer le temps, nous avons pris un grand seau rempli d'eau que nous avons suspendu en hauteur ; par un orifice étroit pratiqué dans son fond s'échappait un mince filet d'eau que l'on recueillait dans un petit récipient, tout le temps que la boule descendait dans le canal. A chaque fois, les quantités d'eau ainsi recueillies étaient pesées à l'aide d'une balance très sensible, et les proportions entre les masses nous ont donné les proportions entre les temps. La précision du dispositif était telle que, comme je l'ai dit, aucune discordance significative n'apparut jamais entre ces expériences maintes et maintes fois répétées.

Simplicio J'aurais vraiment aimé assister à ces expériences. Mais comme je suis sûr du soin avec lequel vous les avez faites, et de la fidélité avec laquelle vous les rapportez, je me déclare satisfait.

2. Des expériences

- Rail d'optique et billes

3. Des vidéos, des simulations

- Extrait du documentaire « Galilée la naissance d'une étoile » (9'00 à 13'30) :

<https://www.youtube.com/watch?v=YEiSyEpPRZ0>



Document N°8. Extraits des programmes.

Programme cycle 4 (extraits)

Mouvement et interactions

Attendus de fin de cycle

- Caractériser un mouvement.
- Modéliser une **action exercée sur un objet** par une force caractérisée par **un point d'application**, une direction, un sens et une valeur.

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève
Caractériser un mouvement	
<p>Caractériser le mouvement d'un objet. Utiliser la relation liant vitesse, distance et durée dans le cas d'un mouvement uniforme.</p> <ul style="list-style-type: none">- Vitesse : direction, sens et valeur.- Mouvements rectilignes et circulaires.- Mouvements uniformes et mouvements dont la vitesse varie au cours du temps en direction ou en valeur.- Relativité du mouvement dans des cas simples.	<p>L'ensemble des notions de cette partie peut être abordé à partir d'expériences simples réalisables en classe, de la vie courante ou de documents numériques. Utiliser des animations des trajectoires des planètes, qu'on peut considérer dans un premier modèle simplifié comme circulaires et parcourues à vitesse constante. Comprendre la relativité des mouvements dans des cas simples (train qui démarre le long d'un quai) et appréhender la notion d'observateur immobile ou en mouvement.</p>
Modéliser une action exercée sur un objet par une force caractérisée par un point d'application, une direction, un sens et une valeur	
<p>Identifier les actions mises en jeu (de contact ou à distance) et les modéliser par des forces. Associer la notion d'interaction à la notion de force. Exploiter l'expression littérale scalaire de la loi de gravitation universelle, la loi étant fournie.</p> <ul style="list-style-type: none">- Action de contact et action à distance.- Force : direction, sens et valeur.- Force de pesanteur et son expression $P=mg$.	<p>L'étude mécanique d'un système peut être l'occasion d'utiliser les diagrammes « objet-interaction ». Expérimenter des situations d'équilibre statique (balance, ressort, muscles). L'étude de la loi de gravitation est l'occasion d'aborder qualitativement la notion d'interaction. Pesanteur sur Terre et sur la Lune, différence entre poids et masse (unités). L'impesanteur n'est abordée que qualitativement.</p>

1. Décrire un mouvement	
<p>Système. Échelles caractéristiques d'un système. Référentiel et relativité du mouvement.</p> <p>Description du mouvement d'un système par celui d'un point. Position. Trajectoire d'un point.</p>	<p>Identifier les échelles temporelles et spatiales pertinentes de description d'un mouvement. Choisir un référentiel pour décrire le mouvement d'un système. Expliquer, dans le cas de la translation, l'influence du choix du référentiel sur la description du mouvement d'un système.</p> <p>Décrire le mouvement d'un système par celui d'un point et caractériser cette modélisation en termes de perte d'informations. Caractériser différentes trajectoires. Capacité numérique : représenter les positions successives d'un système modélisé par un point lors d'une évolution unidimensionnelle ou bidimensionnelle à l'aide d'un langage de programmation.</p>
<p>Vecteur déplacement d'un point. Vecteur vitesse moyenne d'un point. Vecteur vitesse d'un point. Mouvement rectiligne.</p>	<p>Définir le vecteur vitesse moyenne d'un point. Approcher le vecteur vitesse d'un point à l'aide du vecteur déplacement $\overline{MM'}$, où M et M' sont les positions successives à des instants voisins séparés de Δt ; le représenter. Caractériser un mouvement rectiligne uniforme ou non uniforme. <i>Réaliser et/ou exploiter une vidéo ou une chronophotographie d'un système en mouvement et représenter des vecteurs vitesse ; décrire la variation du vecteur vitesse.</i> Capacité numérique : représenter des vecteurs vitesse d'un système modélisé par un point lors d'un mouvement à l'aide d'un langage de programmation. Capacités mathématiques : représenter des vecteurs. Utiliser des grandeurs algébriques.</p>
2. Modéliser une action sur un système	
<p>Modélisation d'une action par une force. Principe des actions réciproques (troisième loi de Newton). Caractéristiques d'une force. Exemples de forces : - force d'interaction gravitationnelle ; - poids ; - force exercée par un support et par un fil.</p>	<p>Modéliser l'action d'un système extérieur sur le système étudié par une force. Représenter une force par un vecteur ayant une norme, une direction, un sens. Exploiter le principe des actions réciproques. Distinguer actions à distance et actions de contact. Identifier les actions modélisées par des forces dont les expressions mathématiques sont connues <i>a priori</i>. Utiliser l'expression vectorielle de la force d'interaction gravitationnelle. Utiliser l'expression vectorielle du poids d'un objet, approché par la force d'interaction gravitationnelle s'exerçant sur cet objet à la surface d'une planète. Représenter qualitativement la force modélisant l'action d'un support dans des cas simples relevant de la statique.</p>
3. Principe d'inertie	
<p>Modèle du point matériel. Principe d'inertie. Cas de situations d'immobilité et de mouvements rectilignes uniformes. Cas de la chute libre à une dimension.</p>	<p>Exploiter le principe d'inertie ou sa contraposée pour en déduire des informations soit sur la nature du mouvement d'un système modélisé par un point matériel, soit sur les forces. Relier la variation entre deux instants voisins du vecteur vitesse d'un système modélisé par un point matériel à l'existence d'actions extérieures modélisées par des forces dont la somme est non nulle, en particulier dans le cas d'un mouvement de chute libre à une dimension (avec ou sans vitesse initiale).</p>

Mouvement et interactions

3. Mouvement d'un système	
<p>Vecteur variation de vitesse. Lien entre la variation du vecteur vitesse d'un système modélisé par un point matériel entre deux instants voisins et la somme des forces appliquées sur celui-ci. Rôle de la masse.</p>	<p>Utiliser la relation approchée entre la variation du vecteur vitesse d'un système modélisé par un point matériel entre deux instants voisins et la somme des forces appliquées sur celui-ci :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pour en déduire une estimation de la variation de vitesse entre deux instants voisins, les forces appliquées au système étant connues ; - pour en déduire une estimation des forces appliquées au système, le comportement cinématique étant connu. <p><i>Réaliser et/ou exploiter une vidéo ou une chronophotographie d'un système modélisé par un point matériel en mouvement pour construire les vecteurs variation de vitesse. Tester la relation approchée entre la variation du vecteur vitesse entre deux instants voisins et la somme des forces appliquées au système.</i></p> <p>Capacité numérique : Utiliser un langage de programmation pour étudier la relation approchée entre la variation du vecteur vitesse d'un système modélisé par un point matériel entre deux instants voisins et la somme des forces appliquées sur celui-ci.</p> <p>Capacité mathématique : Sommer et soustraire des vecteurs.</p>

L'énergie : conversions et transferts

2. Aspects énergétiques des phénomènes mécaniques	
<p>Cette partie prolonge le thème « Mouvement et interactions » dont les situations d'étude peuvent être analysées du point de vue de l'énergie. Le travail des forces est introduit comme moyen d'évaluer les transferts d'énergie en jeu et le théorème de l'énergie cinétique comme bilan d'énergie, fournissant un autre lien entre forces et variation de la vitesse. Les concepts d'énergie potentielle et d'énergie mécanique permettent ensuite de discuter de l'éventuelle conservation de l'énergie mécanique, en particulier pour identifier des phénomènes dissipatifs.</p> <p>Notions abordées au collège (cycle 4) Énergie cinétique, énergie potentielle (dépendant de la position), bilan énergétique pour un système simple, conversion d'un type d'énergie en un autre.</p>	
Notions et contenus	Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i>
<p>Énergie cinétique d'un système modélisé par un point matériel. Travail d'une force. Expression du travail dans le cas d'une force constante. Théorème de l'énergie cinétique. Forces conservatives. Énergie potentielle. Cas du champ de pesanteur terrestre. Forces non-conservatives : exemple des frottements. Énergie mécanique. Conservation et non conservation de l'énergie mécanique. Gain ou dissipation d'énergie.</p>	<p>Utiliser l'expression de l'énergie cinétique d'un système modélisé par un point matériel.</p> <p>Utiliser l'expression du travail $W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overline{AB}$ dans le cas de forces constantes. Énoncer et exploiter le théorème de l'énergie cinétique. Établir et utiliser l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur pour un système au voisinage de la surface de la Terre. Calculer le travail d'une force de frottement d'intensité constante dans le cas d'une trajectoire rectiligne. Identifier des situations de conservation et de non conservation de l'énergie mécanique. Exploiter la conservation de l'énergie mécanique dans des cas simples : chute libre en l'absence de frottement, oscillations d'un pendule en l'absence de frottement, etc. Utiliser la variation de l'énergie mécanique pour déterminer le travail des forces non conservatives. <i>Utiliser un dispositif (smartphone, logiciel de traitement d'images, etc.) pour étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique d'un système dans différentes situations : chute d'un corps, rebond sur un support, oscillations d'un pendule, etc.</i> Capacité numérique : Utiliser un langage de programmation pour effectuer le bilan énergétique d'un système en mouvement. Capacité mathématique : Utiliser le produit scalaire de deux vecteurs.</p>

Mouvement et interactions

<p>Mouvement dans un champ uniforme</p> <p>Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme.</p> <p>Champ électrique créé par un condensateur plan.</p> <p>Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme.</p> <p>Principe de l'accélérateur linéaire de particules chargées.</p> <p>Aspects énergétiques.</p>	<p>Montrer que le mouvement dans un champ uniforme est plan.</p> <p>Établir et exploiter les équations horaires du mouvement.</p> <p>Établir l'équation de la trajectoire.</p> <p>Discuter de l'influence des grandeurs physiques sur les caractéristiques du champ électrique créé par un condensateur plan, son expression étant donnée.</p> <p>Décrire le principe d'un accélérateur linéaire de particules chargées.</p> <p>Exploiter la conservation de l'énergie mécanique ou le théorème de l'énergie cinétique dans le cas du mouvement dans un champ uniforme.</p> <p><i>Utiliser des capteurs ou une vidéo pour déterminer les équations horaires du mouvement du centre de masse d'un système dans un champ uniforme. Étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique.</i></p> <p>Capacité numérique : Représenter, à partir de données expérimentales variées, l'évolution des grandeurs énergétiques d'un système en mouvement dans un champ uniforme à l'aide d'un langage de programmation ou d'un tableur.</p> <p>Capacités mathématiques : Résoudre une équation différentielle, déterminer la primitive d'une fonction, utiliser la représentation paramétrique d'une courbe.</p>
---	--