Support de cours

Cours:

PHYS-101(f) - PG I - mécanique - MA (Sylvain Bréchet)

Vidéo:

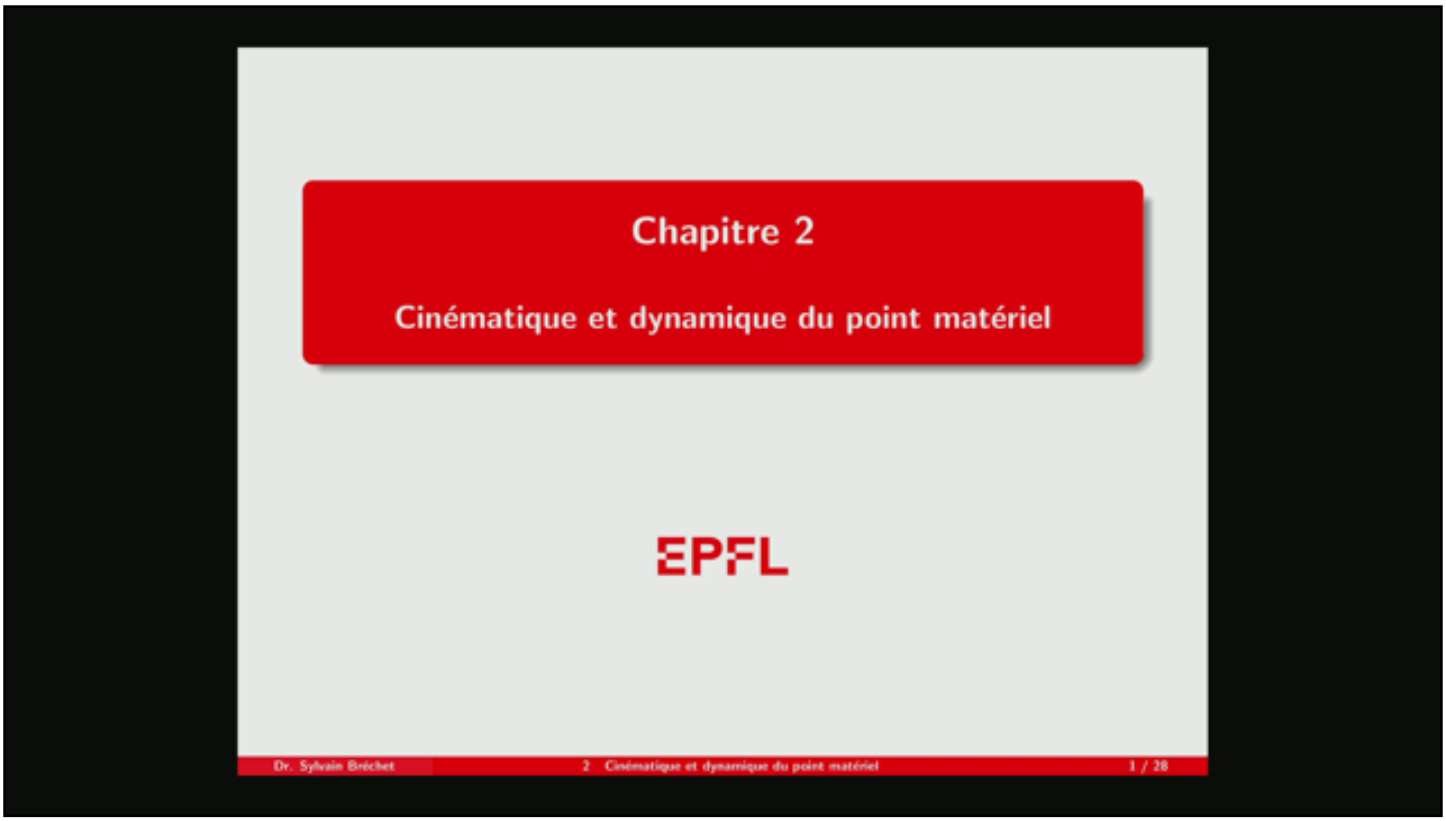
2 - Cinématique et dynamique du point matériel

Concepts (extraits des sous-titres générés automatiquement) :

Vecteur position. Vecteur vitesse. Modèle du point matériel. Cours du temps. Mouvement de ce point. Vecteur accélération. Dynamique du modèle du point. Coordonnée de position. Vitesse constante. Notion de trajectoire. Grandeurs vectorielles. Ensemble de la quantité de matière. Delta t. Petite idée. Bons gps de voitures.

vers la recherche de séquences vidéo
(dans PHYS-101(f) - PG I - mécanique - MA (Sylvain Bréchet).)

vers la vidéo

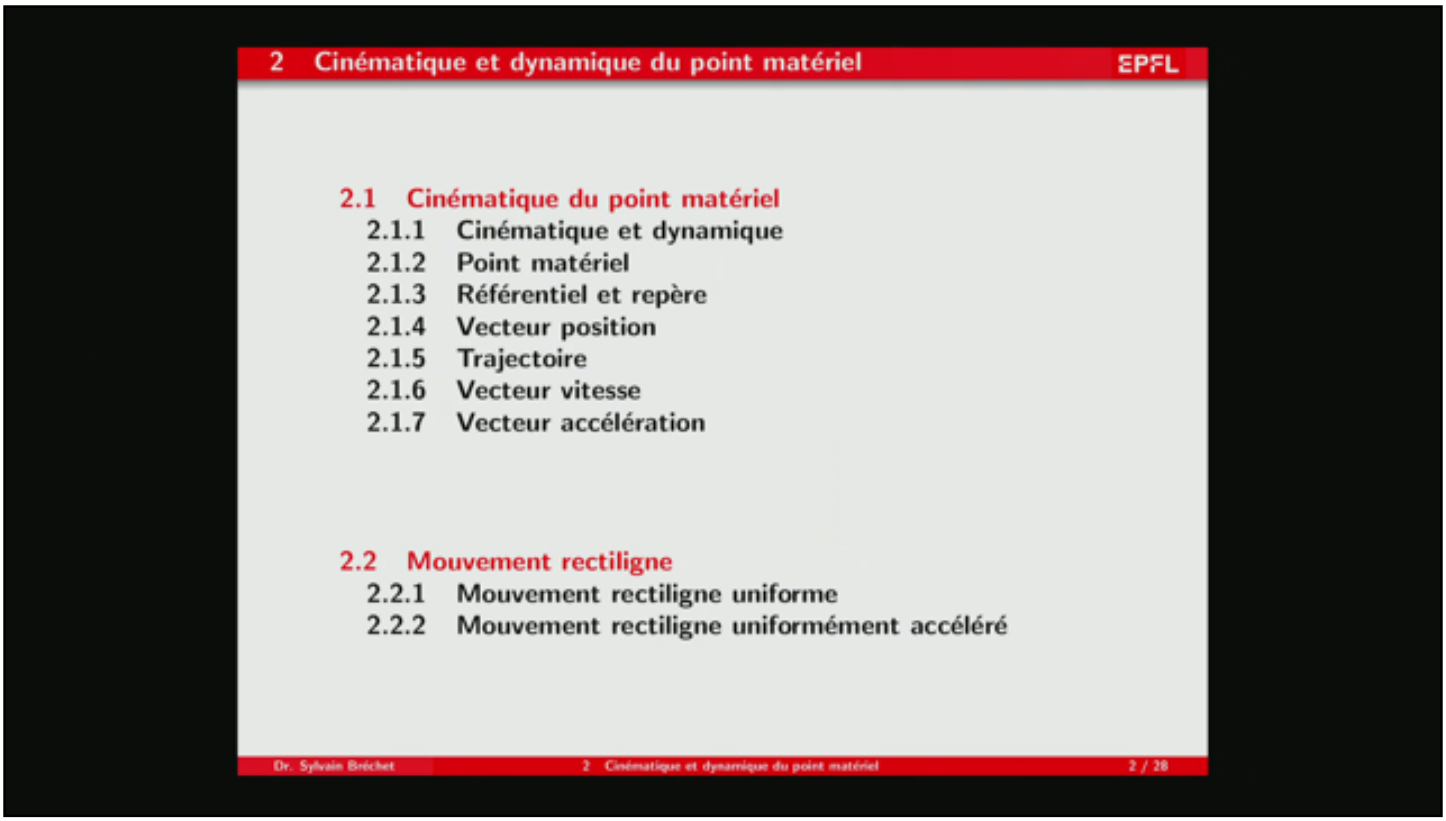


...

notes

résumé

0m 0s

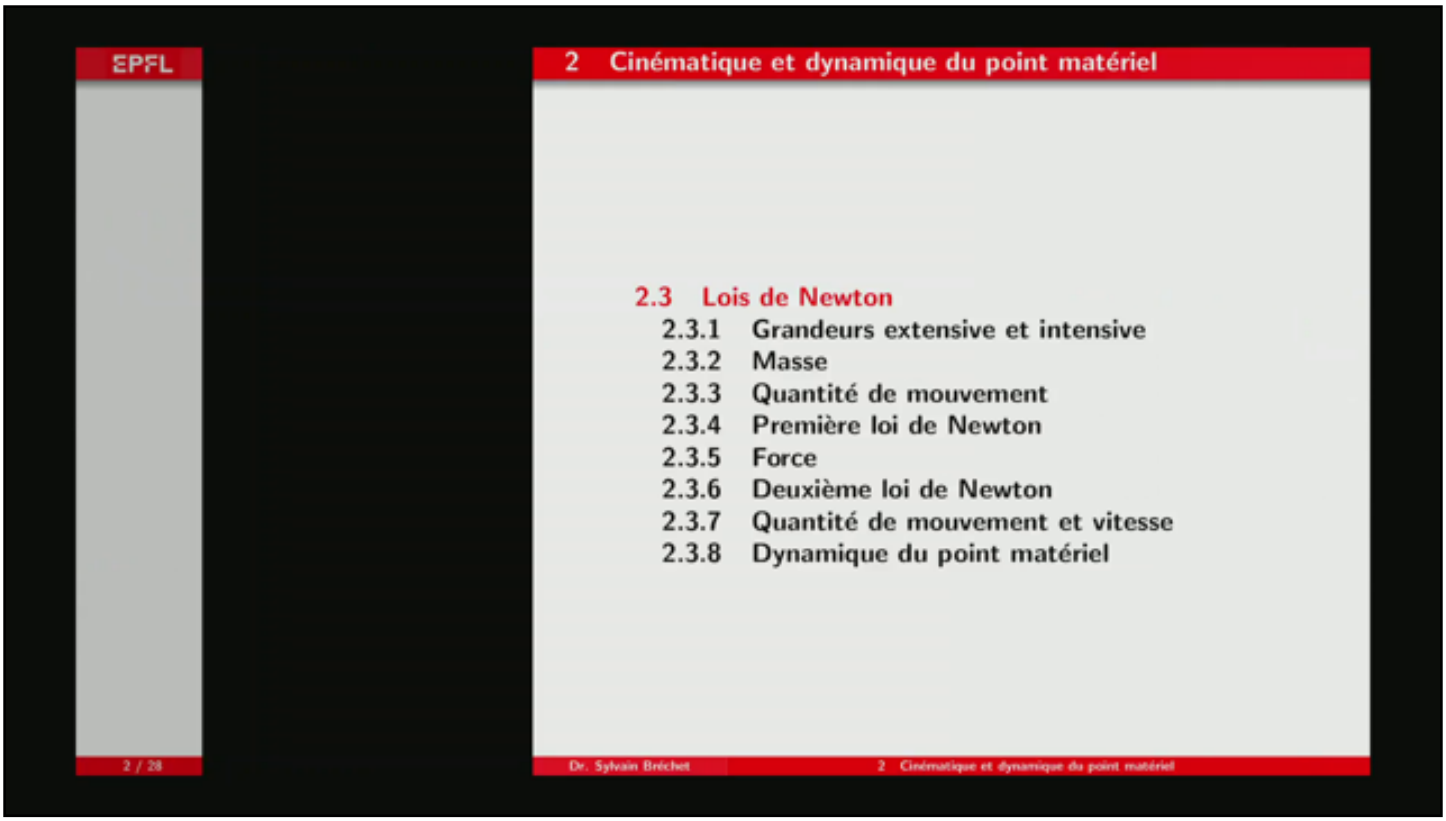


Ces sous-titres ont été générés automatiquement ... ... Voilà, bonjour à toutes et à tous. Alors avant qu'on commence le cours d'aujourd'hui, on va faire quelque chose de spécial, c'est un jour spécial. Aujourd'hui, le préparateur de cours, M. Pierre Vets, fait un événement important, c'est-à-dire un domicicicle. Alors je vous propose qu'on applaudisse. ... Comme c'est vraiment particulier, je vous propose qu'on keure, on lui change de joieuse anniversaire. Allez, à boire avec modération. Bien, ceci étant dit, la semaine passée, on a posé le cadre de la mécanique, on a commencé par une introduction au sujet, on a également discuté des outils mathématiques et vous êtes peut-être posé la question en se disant mais c'est très jolique, mais elle est où la physique ? Et bien la physique, elle arrive aujourd'hui avec de belles expériences, on va notamment aujourd'hui tirer au fusil, un vrai fusil, un flot berg, vous voyez là derrière, qui tire du 22 longrif. Mais avant d'y arriver, il faudra le mériter, on va également jouer au bière ensemble, pour voir la différence qui existe, qu'il y a entre le modèle du point matériel et le modèle du solide indéformable. Vous l'aurez compris, aujourd'hui on va s'intéresser à la cinématique et à la dynamique, et c'est la cinématique et la dynamique du modèle du point matériel qu'on va discuter,

notes

résumé

0m 1s

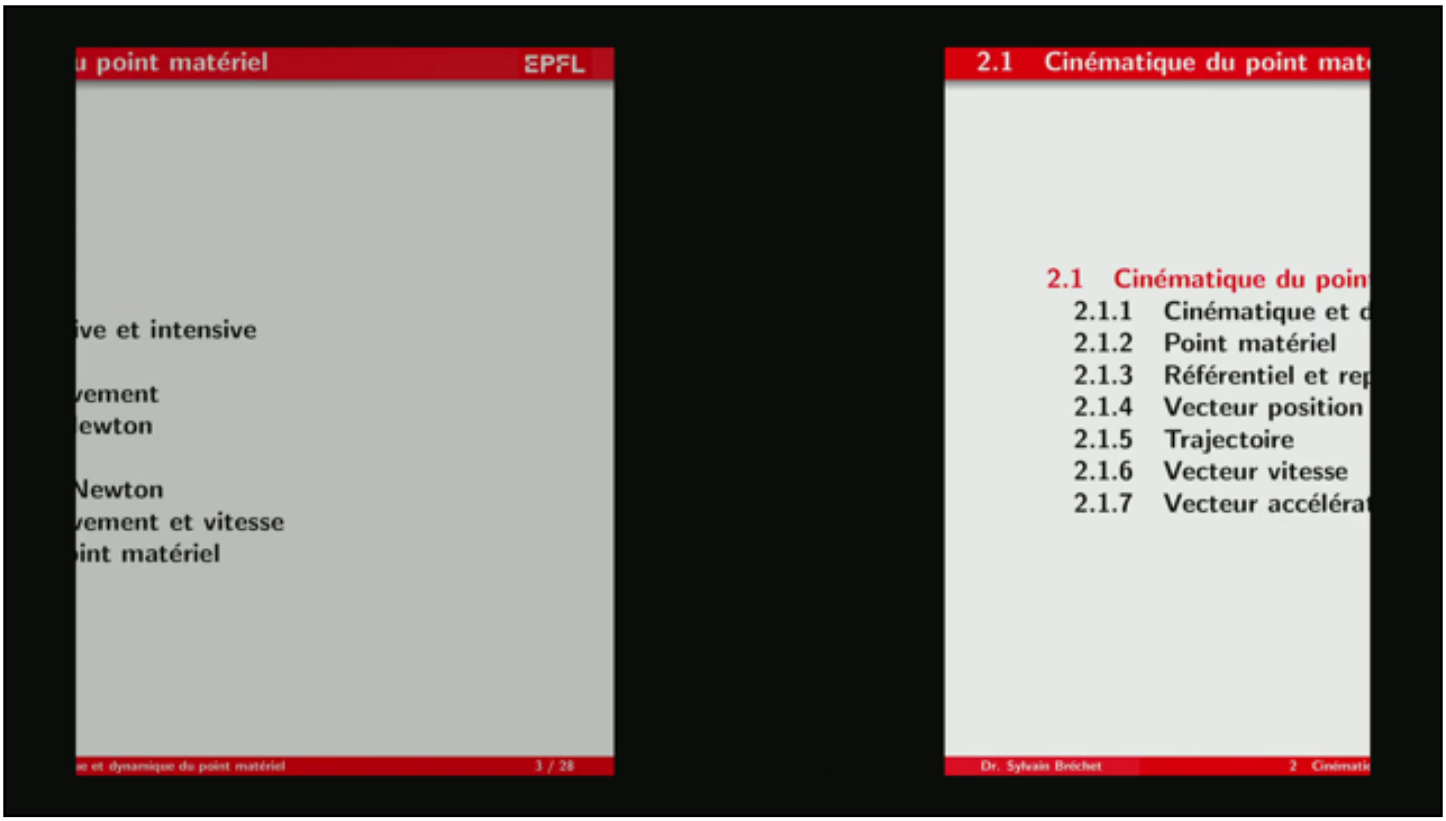


le modèle du point matériel qui est le modèle le plus simple qu'on retrouve en mécanique. Dans ce modèle, on attribue à un objet, les propriétés ponctuelles, c'est à dire qu'on considère que l'ensemble de la quantité de matière de l'objet peut se réduire en un point et on va décrire le mouvement de ce point. Donc il faudra qu'on introduise proprement la notion de référentielle et qu'on l'articule autour de la notion de repère qu'on a introduite la semaine passée. On verra que l'une est physique, l'autre est géométrique, virtuelle, donc on va ensemble faire de la réalité augmentée comme dans les bons GPS de voitures. On va définir les grandeurs vectorielles liées à la cinématique, que sont le vecteur position, sa dérivée première qui est le vecteur vitesse, sa dérivée deuxième qui est le vecteur accélération. On introduira aussi la notion de trajectoire qui est une notion éminemment géométrique, c'est un lieu géométrique qu'on va définir proprement. Donc ça, ce sera la première section de ce cours. Dans la deuxième section, on va faire un peu ce qu'a fait Galilé, on va s'intéresser aux mouvements les plus simples qui sont des mouvements de ligne droite, des mouvements rectilignes. On prendra d'abord un mouvement qui se fait à vitesse constante, donc le centre de masse se déplace à vitesse constante. Si le vecteur vitesse est constant, son orientation aussi, on a forcément un mouvement rectiligne qui plus est uniforme puisque la coordonnée de position varie uniformément, elle varie linéairement au cours du temps. On compitera ensuite la donne en prenant une accélération constante et on aura alors un mouvement rectiligne uniformément accéléré. Et la cinématique sera terminée.

notes

résumé

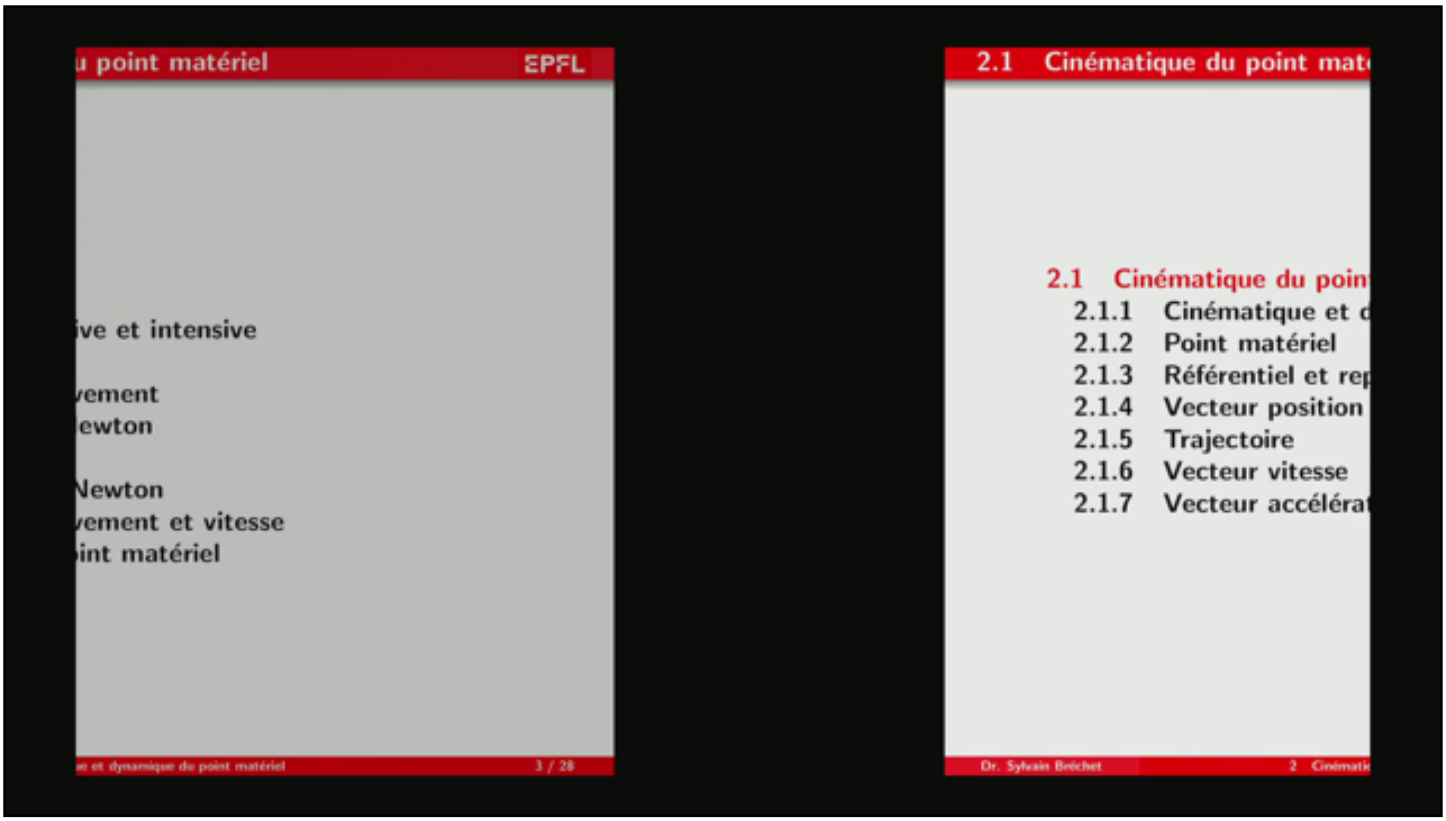
2m 19s



notes

résumé

4m 6s



mais que cette idée n'est pas générale. On verra comment on peut, dans la pratique, déterminer expérimentalement, parce que c'est de ça qu'il s'agit, la formule de la quantité de mouvement à une vitesse suffisamment faible par rapport à la vitesse de propagation de la lumière dans le vide. Et lorsqu'on aura fait ceci, on pourra alors finalement énoncer la deuxième loi de Newton sous une forme que vous connaissez tous. Mais on va l'établir ensemble à savoir que la somme des forces extérieures va s'exprimer comme le produit de la masse fois l'accélération. C'est une relation de cause à effet qui est absolument essentielle. C'est la relation la plus importante de ce cours. Vous voyez, c'est chouette parce que cette relation qui est la plus importante du cours, vous la connaissez déjà, vous n'aviez même pas à l'apprendre. D'accord ? Et c'est vraiment l'état d'esprit qu'il faut avoir dans ce cours. Il faut comprendre, comprendre autant que possible pour apprendre aussi peu que possible. D'accord ? Et c'est comme ça que ces concepts vous resteront à vie. Parce que si vous apprenez, deux ans plus tard, vous posez des questions, vous avez oublié la plus grande partie de ce que vous avez appris pour quoi parce que vous ne l'avez pas pratiqué. Donc, c'est important de comprendre. D'accord ?

notes

résumé

2.1.1 Cinématique et dynamique

EPFL

1. **Cinématique :** description du mouvement d'un corps (solide, liquide, gaz) sans en considérer les causes
   - Vecteur position :
   - Vecteur vitesse :
   - Vecteur accélération :
2. **Dynamique :** étude des causes mécaniques du mouvement d'un corps (solide, liquide, gaz)
   - Vecteur force :
   - Vecteur quantité de mouvement :
   - Vecteur moment cinétique :

Galileo Galilei
1564 – 1642



Sir Isaac Newton
1643 – 1727

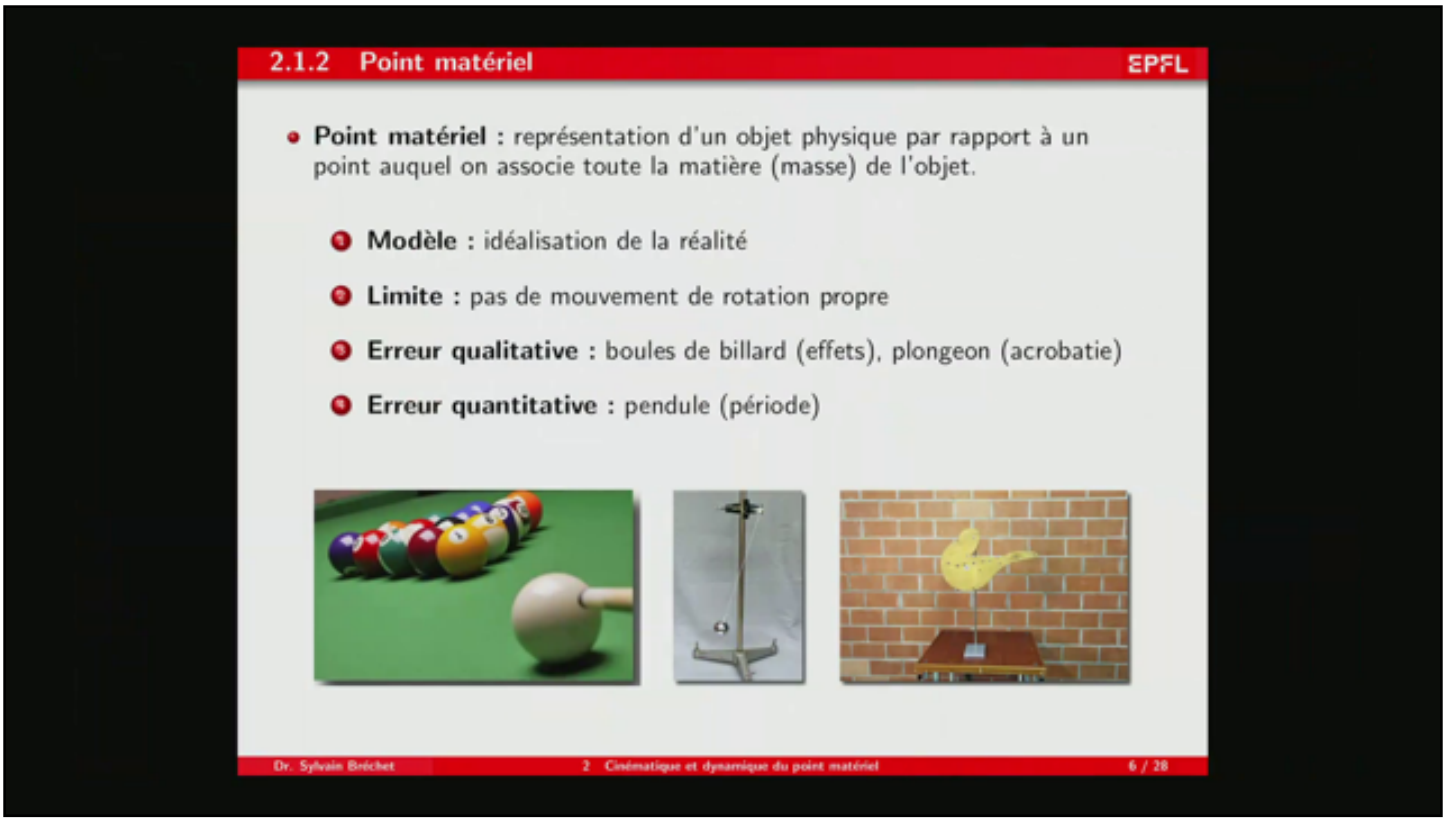


En maths aussi, c'est essentiel de comprendre.

notes

résumé

6m 57s

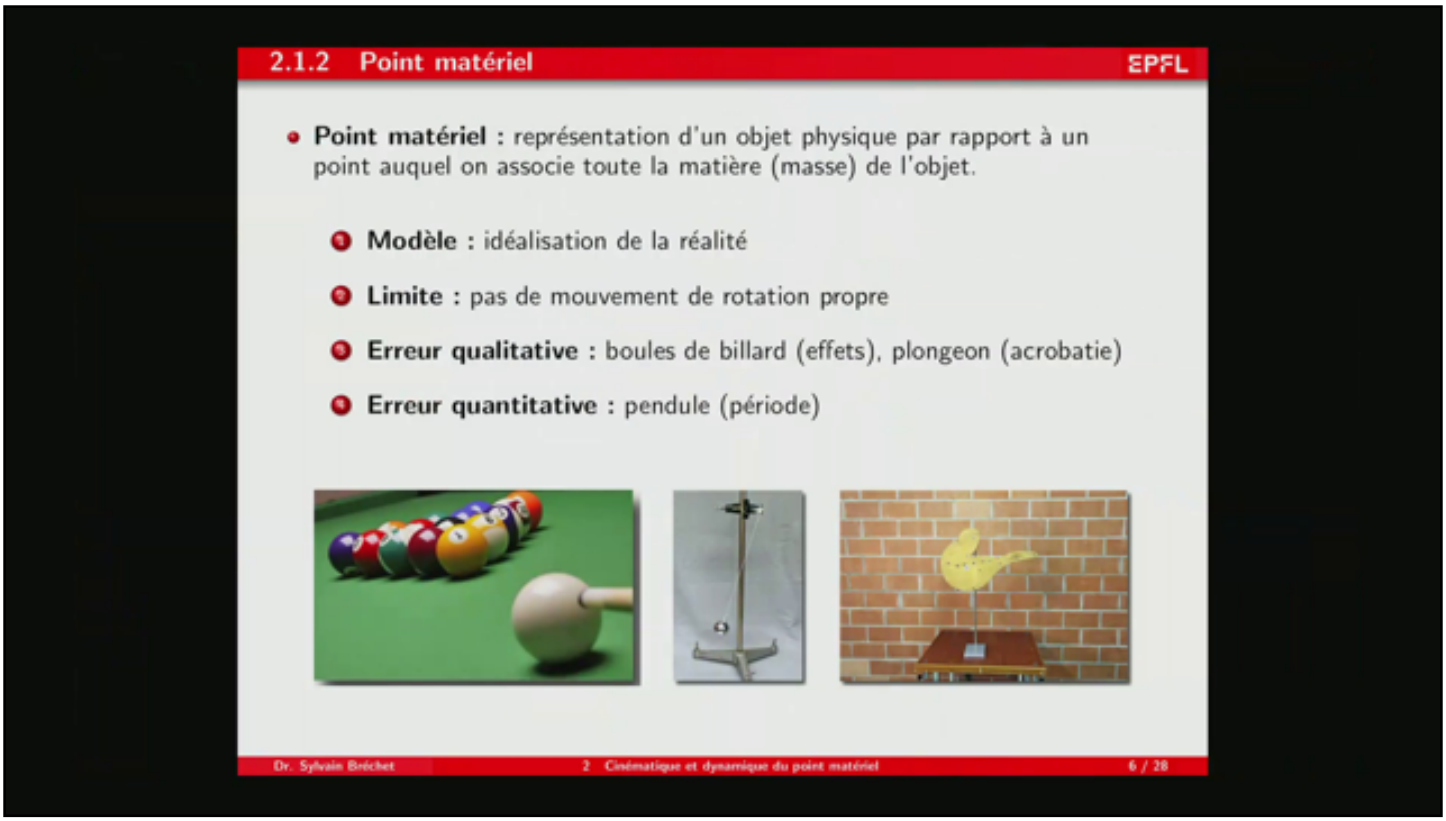


Bon, alors commençons par la cinématique du point matériel et commençons surtout par la distinction qu'il y a entre la cinématique et la dynamique. La cinématique, c'est quoi ? C'est la branche de la mécanique qui va étudier le mouvement d'un corps. Un objet qui peut être un objet solide, qui peut aussi être un objet liquide. On peut imaginer qu'on a une petite quantité d'eau, par exemple, ou d'air qui se déplace. D'accord ? Ça peut être un gaz. En cinématique, on décrit le mouvement d'un objet sans se préoccuper des causes particulières qui donnent lieu à un mouvement donné. D'accord ? Cette description va se faire à l'aide de trois grandeurs vectorielles fondamentales. Le vecteur position, tout d'abord, qu'on va noter avec un R. On peut poser la question mais pourquoi R pour position, pourquoi pas P ? Ben P, ça sera la quantité de mouvement. Puis surtout, R se rapporte à la position de repos. D'accord ? Et si on dérive le vecteur position par rapport au temps, on trouve alors le vecteur vitesse, qui est une fonction du temps, dans le cas général. Quand on dérive encore une fois le vecteur vitesse par rapport au temps, on trouve le vecteur accélération. D'accord ? Alors pourquoi est-ce qu'on peut affirmer ceci ? Intuitivement, vous avez vu la semaine passée, que la dérivé temporelle de la coordonnée de position, c'était la coordonnée de vitesse, que la dérivé temporelle de la coordonnée de vitesse par rapport au temps, c'était la coordonnée d'accélération. Alors maintenant, si vous prenez un vecteur position, vous pouvez l'exprimer comme combinaison linéaire des vecteurs unitaires d'un repère, un repère cartésien par exemple. Et alors, vous allez avoir des coordonnées de position, que vous allez pouvoir dériver par rapport au temps pour trouver les coordonnées de vitesse. Vous le refaites une deuxième fois, vous avez les coordonnées d'accélération, ce qui permet d'affirmer cette dérivation par rapport

notes

résumé

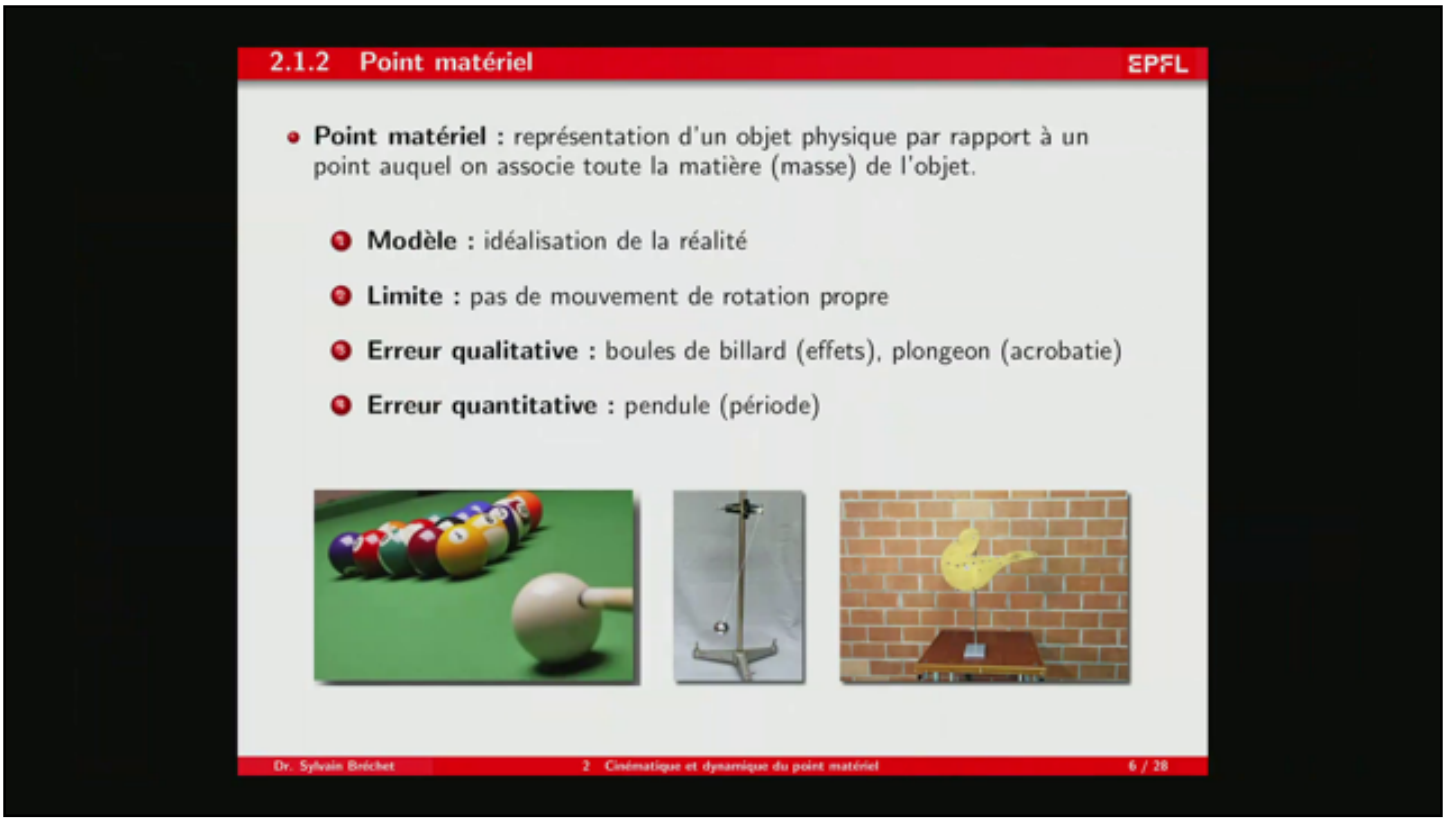
7m 3s



au temps en termes des vecteurs eux-mêmes. Et les vecteurs sont un grand bien fait. D'accord ? On a tout simplifié ces vecteurs. Le calcul vectoriel de manière générale a été introduit assez tard dans l'histoire des mathématiques et dans l'histoire de la physique, puisque les vecteurs sont apparus uniquement à la fin du XIe siècle. En réalité, Albert Einstein, dans son papier célèbre sur les bases de la relativité restreinte de l'électrodynamique des corps en mouvement, a encore tout décrit en composant, c'était encore la coutume à l'époque. Mais les vecteurs, c'est beaucoup mieux comme on va le voir. Donc si la cinématique décrit le mouvement sans se préoccuper des causes qui donnent lieu à un mouvement, la dynamique, elle, se charge de cette étude-là. Elle veut savoir quelles sont les causes particulières qui vont donner lieu à un mouvement particulier. D'accord ? Alors, les causes en général seront les forces. On note avec la lettre F qui peut être des fonctions du temps. D'accord ? On verra que ces forces vont permettre de faire varier une grandeur extensive liée à tout mouvement, qui est la quantité de mouvement qu'on note avec la lettre P. Alors pourquoi sans souvenir qu'il n'y a pas de P dans quantité de mouvement ? Mais il y a un P dans le mot impulsion qui est parfois utilisé de manière interchangeable, en anglais surtout, pour le mot quantité de mouvement. Bon, il y a encore une autre grandeur qui joue un rôle important par la suite, qui est elle associée à des mouvements de rotation. Cette grandeur qui en fait joue un rôle analogue à la quantité de mouvement pour la rotation, c'est ce qu'on appelle le moment cinétique, plus exactement, le moment cinétique orbital. On met donc un L comme le L qui est la fin de orbital, puisqu'il y a aussi un autre moment cinétique qui est le moment cinétique intrinsèque

notes

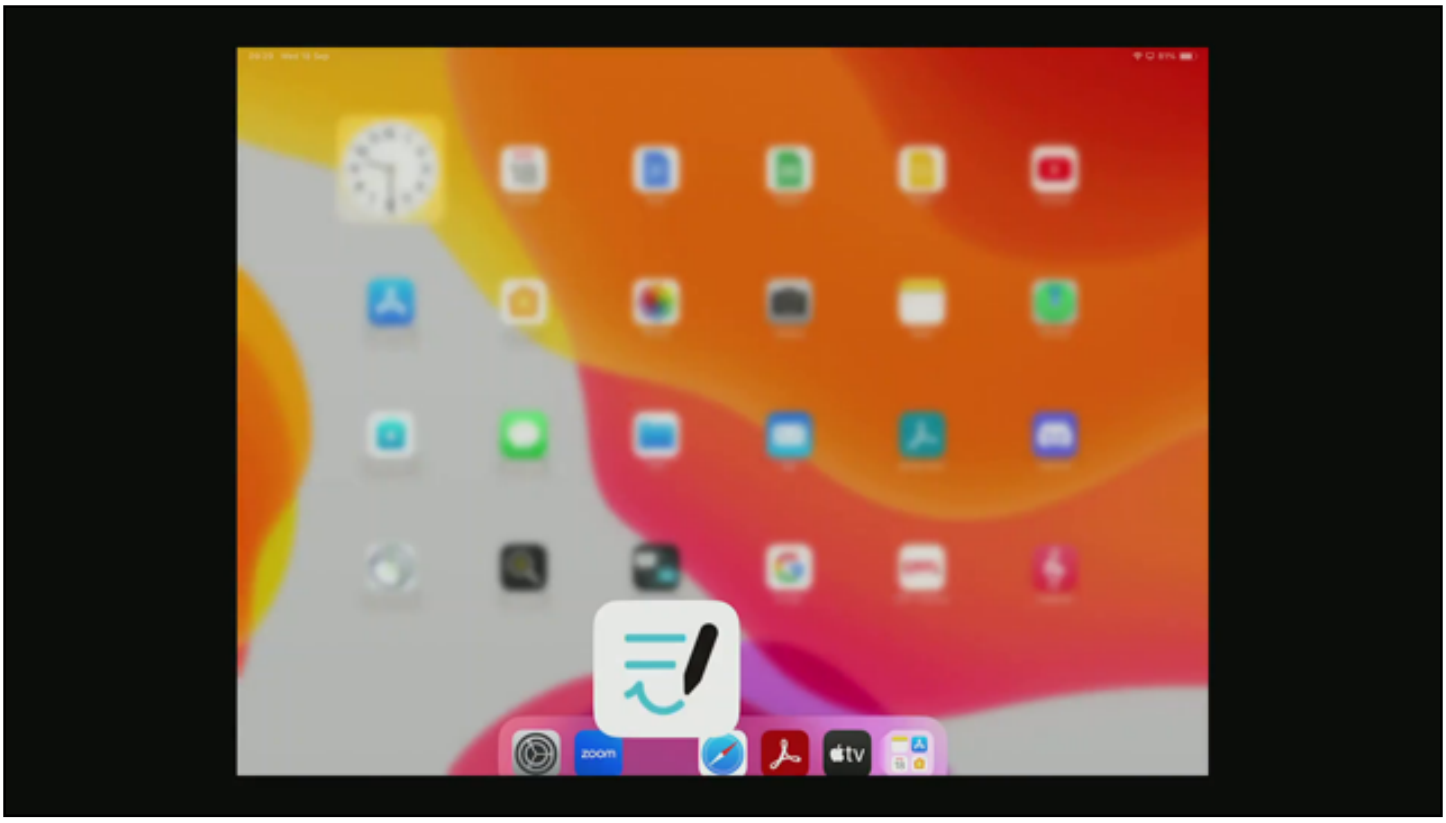
résumé



qui lui s'appelle le spin. Toutes les particules fondamentales ou presque ont un spin. D'accord ? Voilà.

notes

résumé

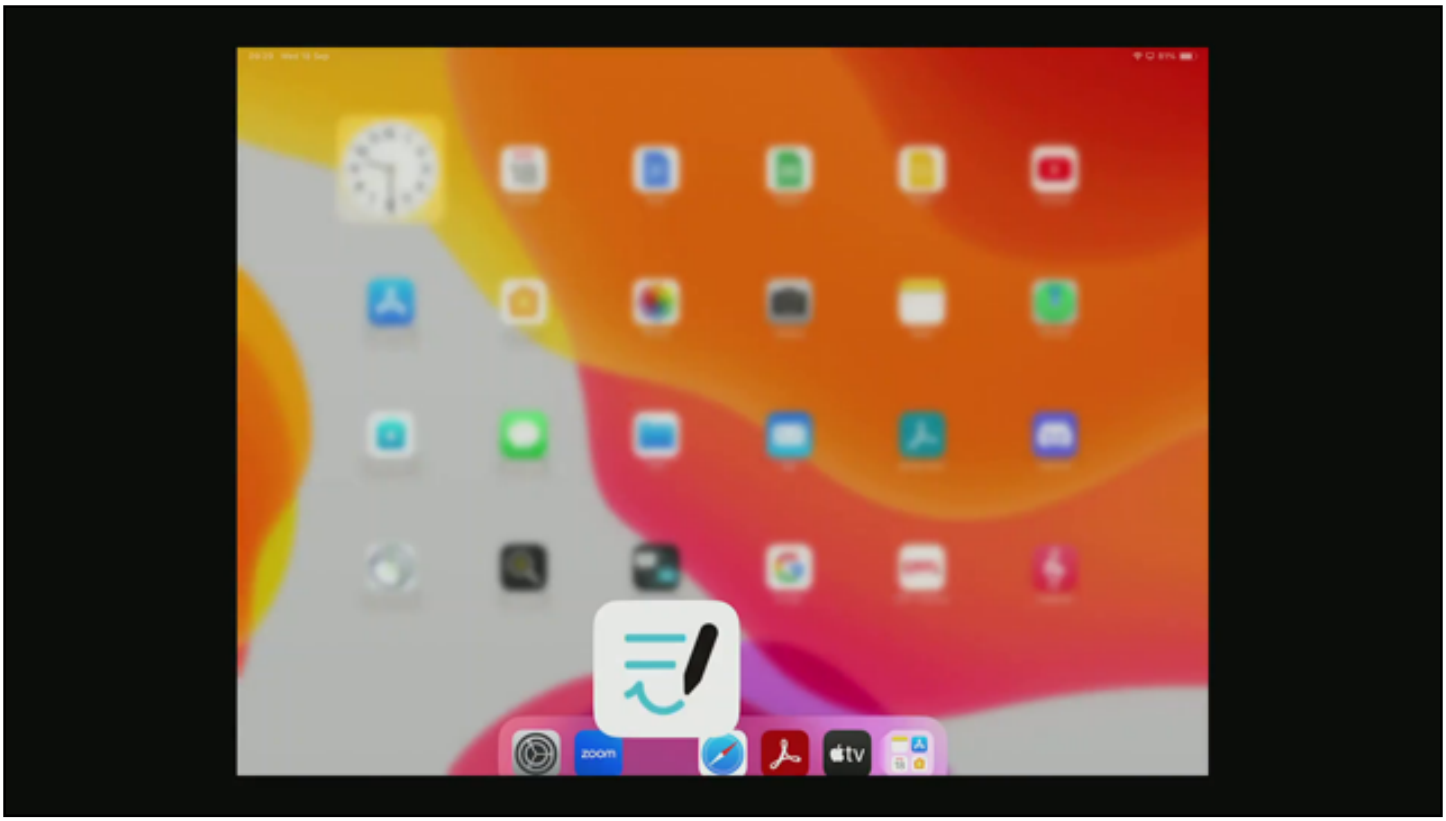


Alors, passons maintenant au modèle le plus simple qui existe en mécanique, qui est le modèle du point matériel. Ce modèle va donc nous occuper pendant une dizaine de semaines. On le complétera plus tard en introduisant le modèle du solide indéformable. On ira au-delà du point matériel. Donc le point matériel, c'est un modèle dans lequel, si vous prenez n'importe quel objet, prenez par exemple ce stylet, prenez cette bouteille d'avion ou encore ce poc qui a une forme de ballon de foot. D'accord ? Tous ces objets, vous allez les décrire à l'aide d'un point. Alors, vous pouvez dire oui mais une bouteille d'avion a une certaine forme dans l'espace. On parle de quel point ? On verra plus tard que ce point, c'est le baris centre, le centre de gravité, le centre de masse de l'objet. On verra comment on le détermine. D'accord ? Alors, ce modèle, il a des limites. Comme je disais la semaine passée, modéliser, c'est idéaliser et lorsqu'on idéalise, on sacrifie ce qu'on considère comme accessoire. Ce qui est accessoire dans le modèle du point matériel, c'est le mouvement de rotation. Si je prends cette bouteille d'avion, que je la fais tourner autour de son axe, si maintenant je la décris comme un point qui est au centre de la bouteille, au centre de masse de la bouteille, le mouvement de rotation propre de l'objet sur lui-même ne va pas apparaître dans le modèle du point matériel. D'accord ? On ne pourra pas le décrire. On ne veut pas, dans un premier temps, le décrire. Ok ? Oui mais ça, c'est quelque chose qui est problématique dans certains cas de figure puisque on va faire des erreurs qui sont à la fois qualitatives et quantitatives. Alors pour vous démontrer les erreurs qualitatives, on va maintenant jouer ensemble au bière. D'accord ? Donc voilà, une table de bière. On va placer la boule jaune

notes

résumé

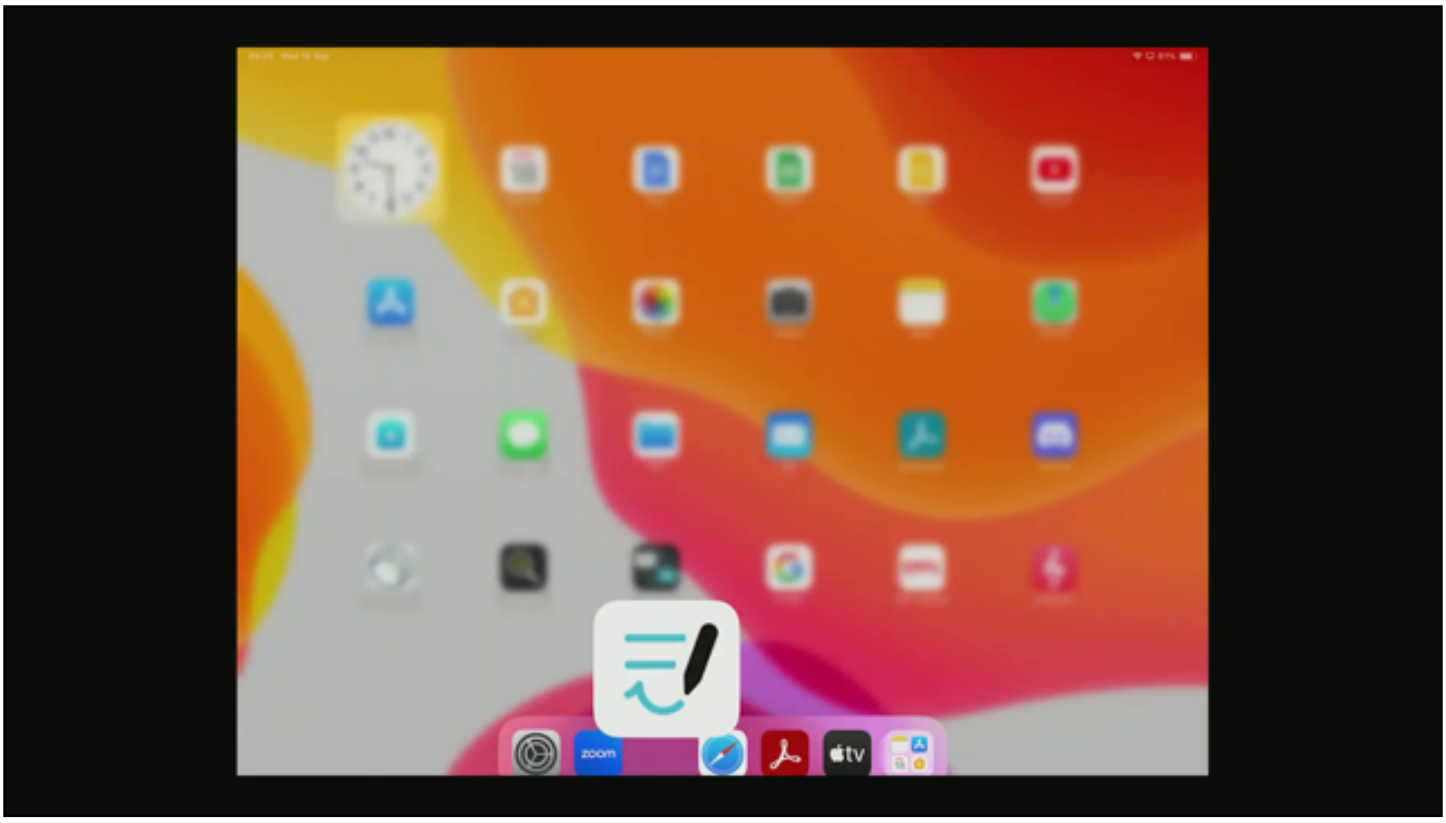
10m 47s



ici. Je préfère éviter de passer la noire parce que je n'ai pas tout de suite envie de perdre la partie, vous comprenez ? Voilà puisque ce sont les règles du bière. Bref, si je prends cette queue de bière et que je tape avec la queue à la hauteur du sang de masse de la boule blanche, si maintenant la canne est alignée avec la boule de couleur, que va-t-il se passer ? Eh bien on va voir un résultat qu'on peut décrire avec le modèle du point matériel. C'est-à-dire que la boule blanche va faire quoi ? Quelqu'un a une idée ? Elle va s'arrêter exactement, à vérifier. Ouais, à peu près quoi. D'accord ? On va la refaire peut-être que si je me mets vraiment bien dans l'axe pour être sûr de voir ce qui se passe, on va le faire ici. Voilà. On retente à la hauteur du sang de masse au centre, à peu près. D'accord ? C'est le mieux qu'avant. Bon, alors ça on peut le décrire dans le cadre du modèle du point matériel. En revanche, si on aime jouer au bière, on aime parfois donner des effets au bout. Par exemple, on pourrait frapper la boule blanche en-dessus du sang de masse. D'accord ? C'est ce que je vais faire ici. Que va-t-il se passer ? Elle va rouler avec la boule jaune. Et qu'est-ce qui risque de se passer qu'elle termine dans la pochette avec ? Regardons. Oui, pas tout à fait, j'aurais dû taper encore un peu plus fort. Mais l'accompagner. D'accord ? Ceci on ne peut pas le décrire dans le cadre du modèle du point matériel, puisque l'effet de rotation devient essentiel. Alors, c'est un petit bière. C'est pour ça que c'est difficile avec la cam de donner une orientation correcte. Ceux qui ont essayé tout à l'heure, Luc et Ryan pourront témoigner, ce n'est pas une chose

notes

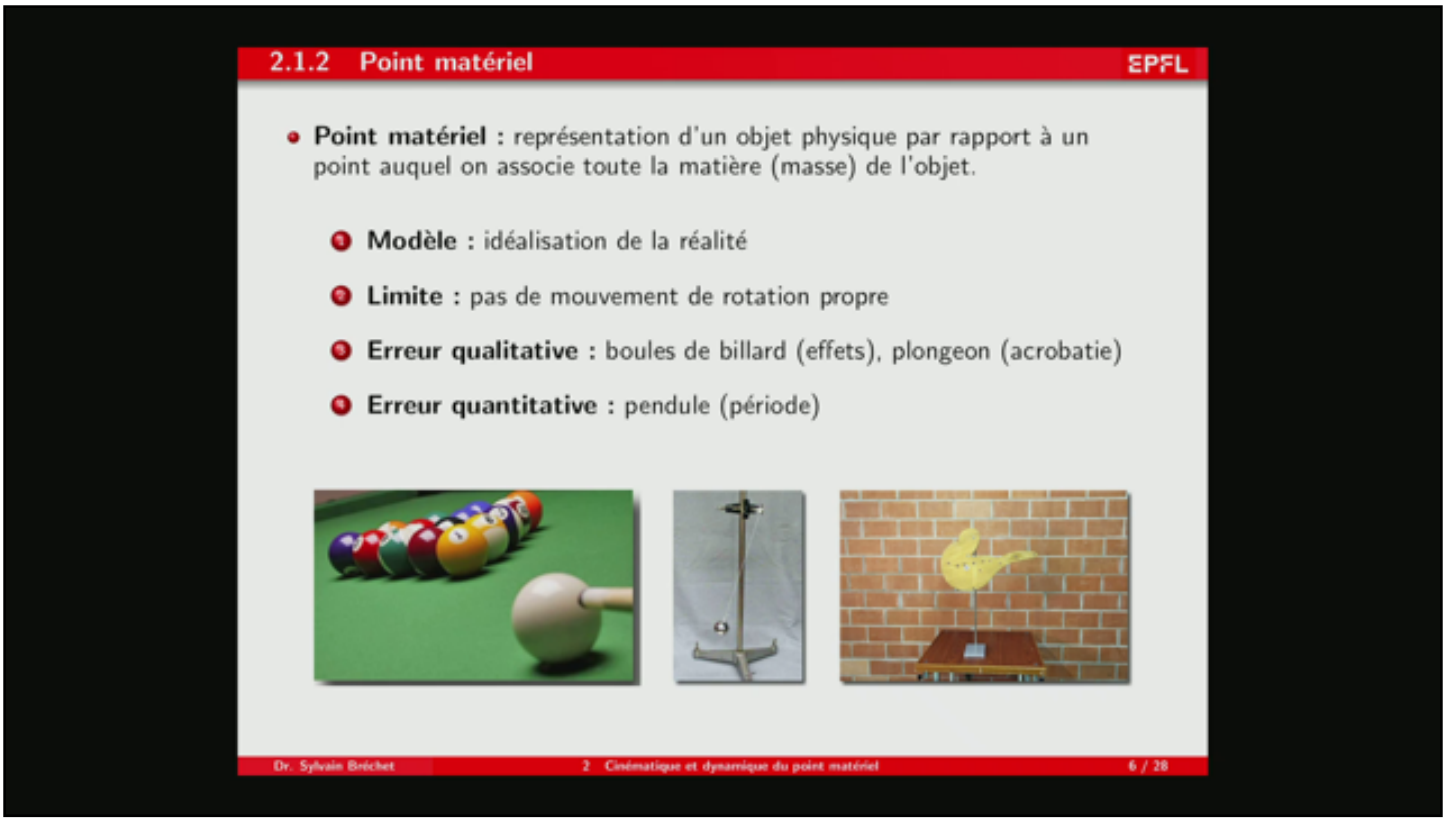
résumé



facile. Alors on peut aussi tenter un autre coup, qui est ce qu'on appelle le coup rétro. Si on frappe la boule blanche en-dessous du sang de masse, elle va revenir en arrière et ça permet de positionner la boule blanche pour le coup suivant. D'accord ? Eh ben voilà, vous voyez, donc il y a ce petit décalage qui fait que là on a eu l'effet de l'autre coup. Mais enfin bref, c'est ce qui devrait se passer. Je vais vous le montrer à l'aide d'une vidéo faite par quelqu'un qui est nettement plus alliantu expérimenté dans ce domaine. Voilà. Hop.

notes

résumé



Voilà. Voilà. Donc je suis désolé, il y a, on a un petit souci avec les beaimeurs. Il y a en fait une, enfin, une lampe sur deux qui ne fonctionne pas. C'est pour ça que la, disons, le contraste n'est pas très bon. Alors je vais remettre la lumière et puis vous me dites quand c'est suffisant pour que vous ayez quand même encore un bon contraste que ceux qui sont derrière voient ce qui se passe.

notes

résumé

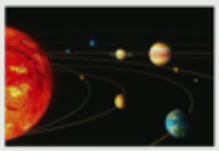
14m 56s

2.1.3 Référentiel et repère

EPFL

- **Référentiel :** solide indéformable (physique) de référence par rapport auquel on décrit le mouvement des autres corps.
  - **Exemples :** terre, bateau, système solaire.





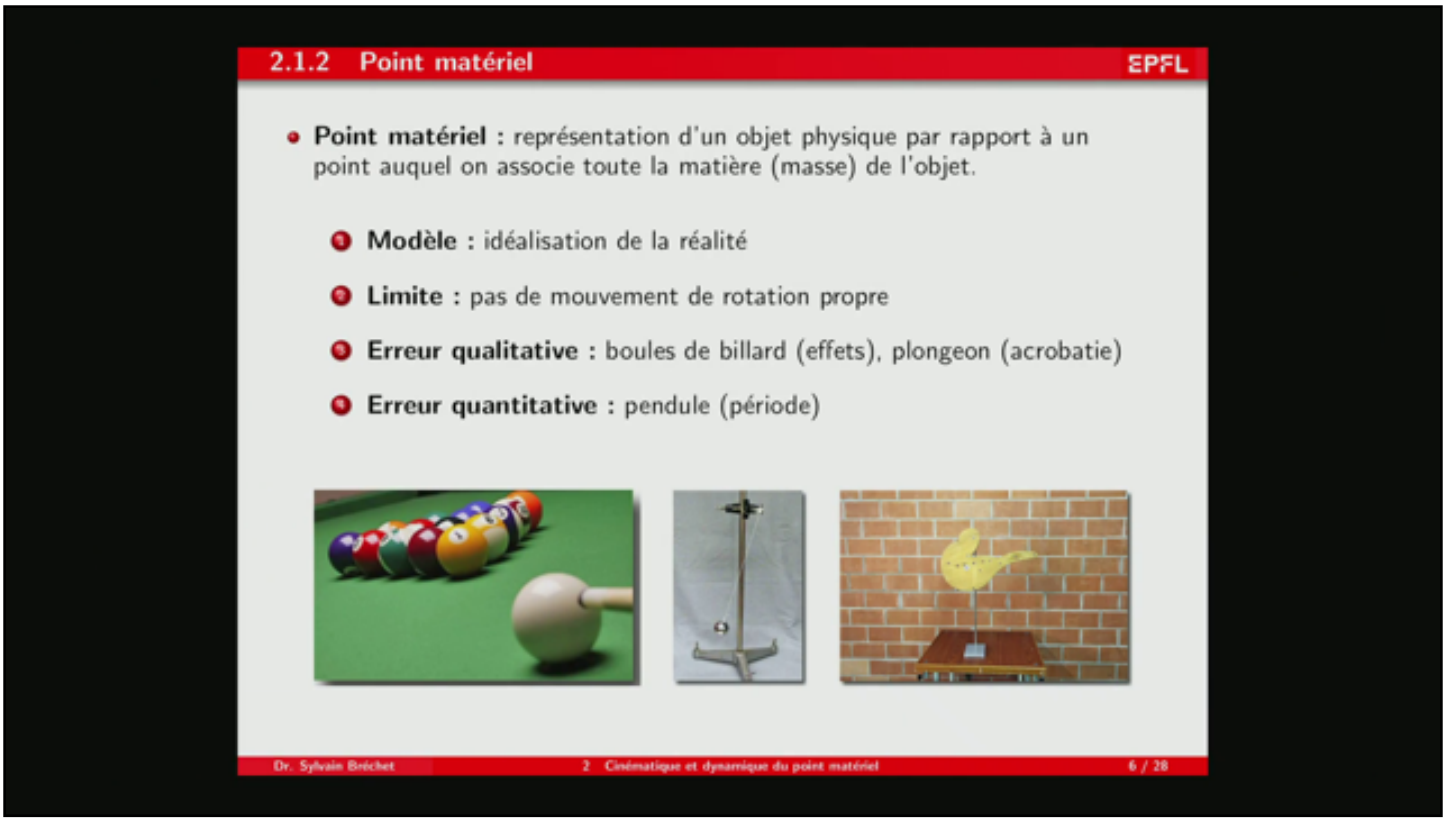
- Un référentiel est un ensemble de N points matériels ($N \geqslant 4$) non-coplanaires et fixes les uns par rapport aux autres.
- **Repère :** entité géométrique formée de trois vecteurs non-coplanaires qui définit un pavage ("grid") de l'espace à trois dimensions.
- **Référentiel et repère :**
  1. **Référentiel :** objet physique réel (solide)
  2. **Repère :** entité géométrique virtuelle ("grid")

Je peux encore augmenter un peu, vous savez? Un petit peu? Voilà. Voyez encore bien l'arrière? C'est bon? Ok, on va s'arrêter là. Super. Bien.

notes

résumé

16m 13s

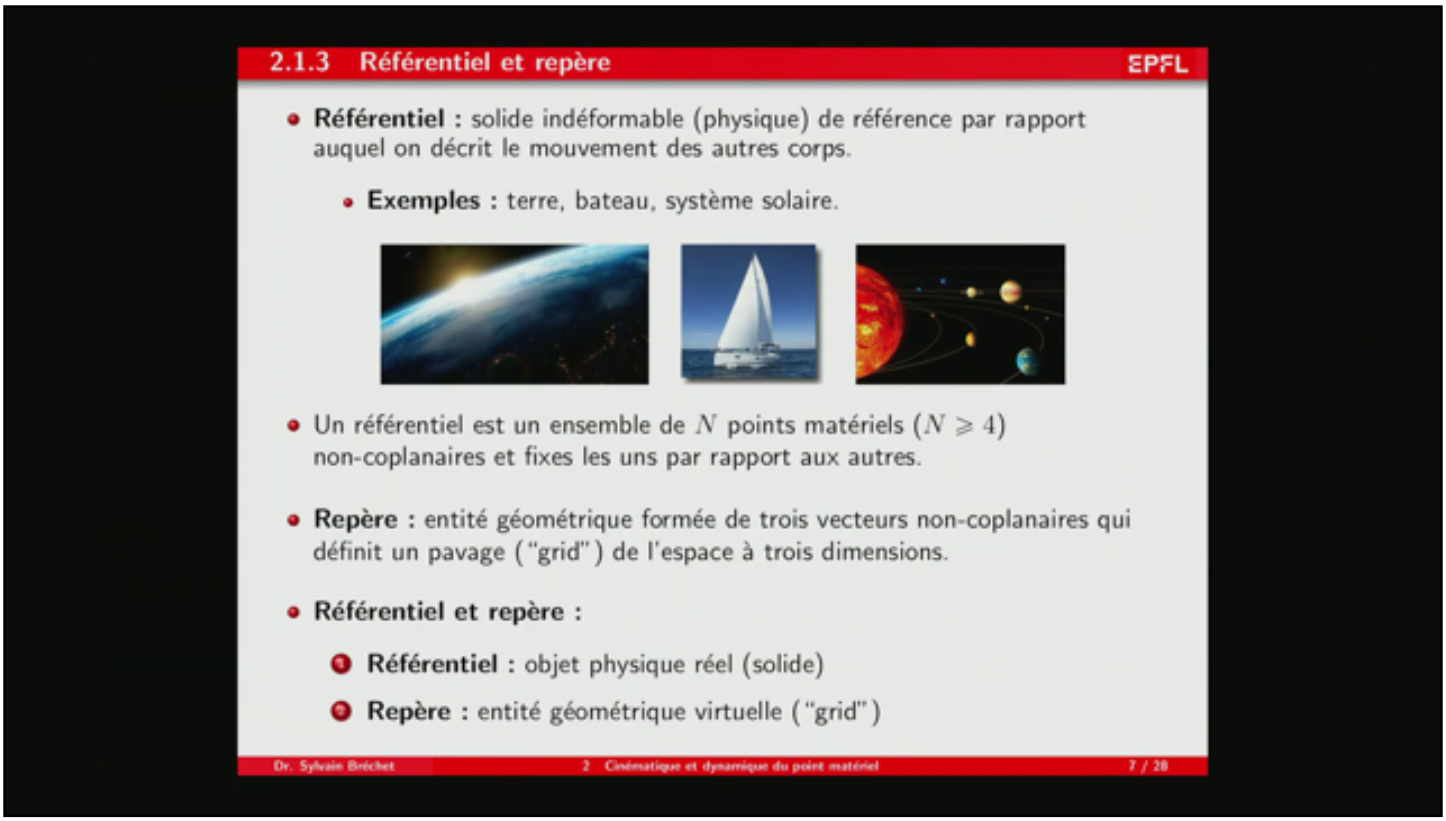


Donc voilà, on fait des erreurs de type qualitative en ne considérant pas les mouvements de rotation propres.

notes

résumé

16m 23s

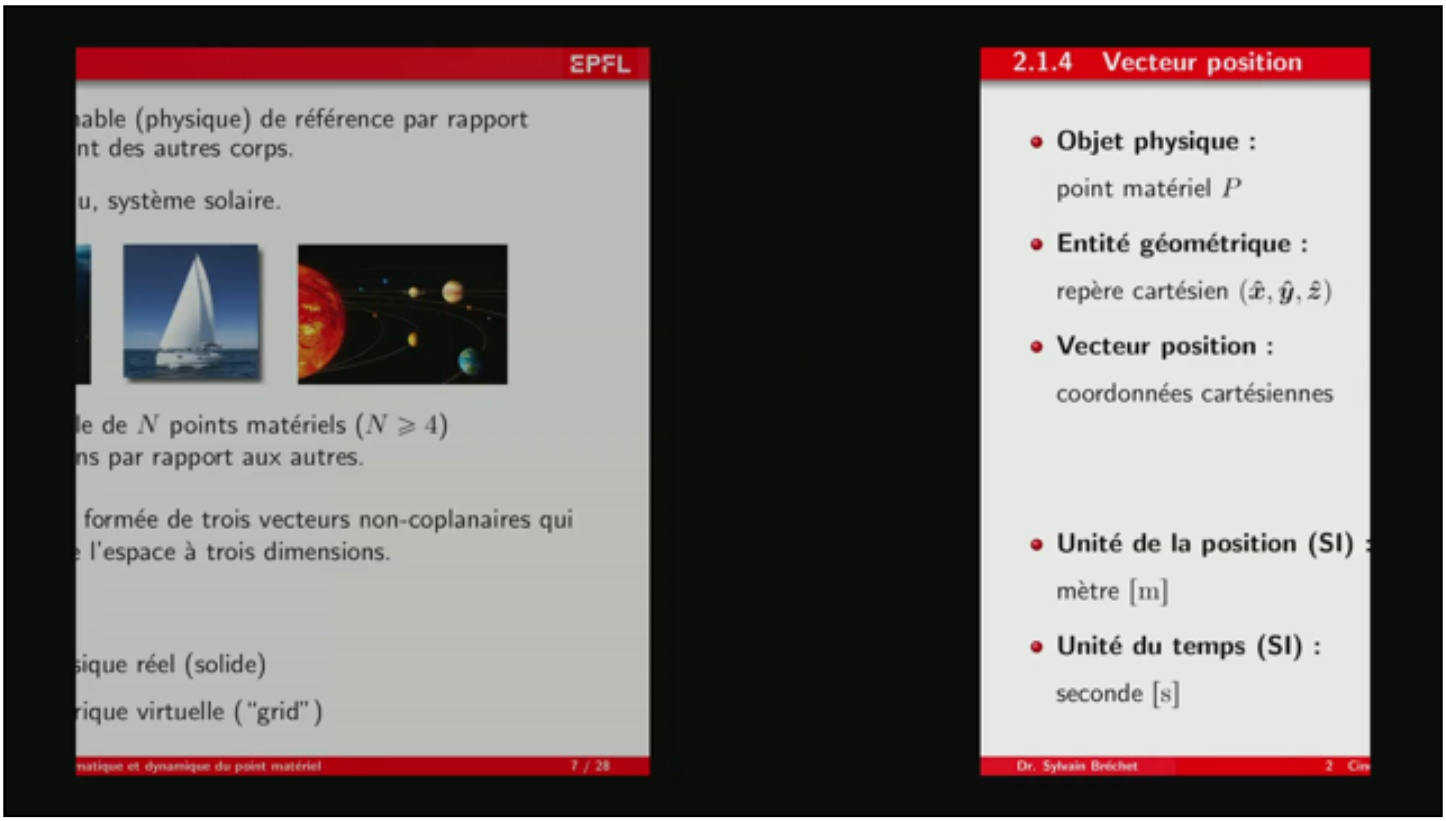


D'accord? C'est aussi ce qui va se passer si vous avez par exemple un acrobat qui saute du plongeoir des dix mètres et qui fait des saupérieux, un double saupérieux d'accord, avec un salto arrière et puis qui finit dans l'eau. D'accord? Alors si vous décrivez ceci avec le modèle du point matériel, qu'est-ce que vous avez? Un point qui est un mouvement de chute libre et qui tombe dans l'eau, d'accord? Vous ratez tout l'essentiel de l'exercice du plongeant acrobatique. Si on peut faire des erreurs qualitatives en prenant un mauvais modèle, on peut aussi faire des erreurs quantitatives. Je vous donne un exemple. Si vous avez un point matériel, un objet assez condensé comme cette boule, attaché ici un fil dans la masse est négligeable, on verra ensemble qu'on peut trouver la période d'ossiation dans l'un limite des petites oscillations. Cette période, elle est de deux pieds, faut la racine de la longueur du pendule divisé par le champ gravitationnel. Alors maintenant, si au lieu d'avoir ce type de pendule-là, vous prenez un pendule qu'on appelle un pendule physique, par exemple le balancier d'une horloge comptoise ou neuchateloise, et que vous prenez le centre de masse, et que vous calculez la longueur qui le sépare du point d'attache, et que naïvement, vous calculez la période, comme étant depuis, faut la racine, de elle surgir, vous allez voir que ce résultat est faux. Pourquoi? Parce que vous devez tenir compte de la rotation propre du balancier autour du point d'attache, et ceci fait intervenir le moment d'inertie de celle-ci par rapport à cet axe, d'accord? Et le résultat sera donc différent. Donc voilà, le modèle du point matériel est un très bon modèle, pourvu qu'on sache ce qu'on fait et dans quel cadre on l'utilise, d'accord?

notes

résumé

16m 26s

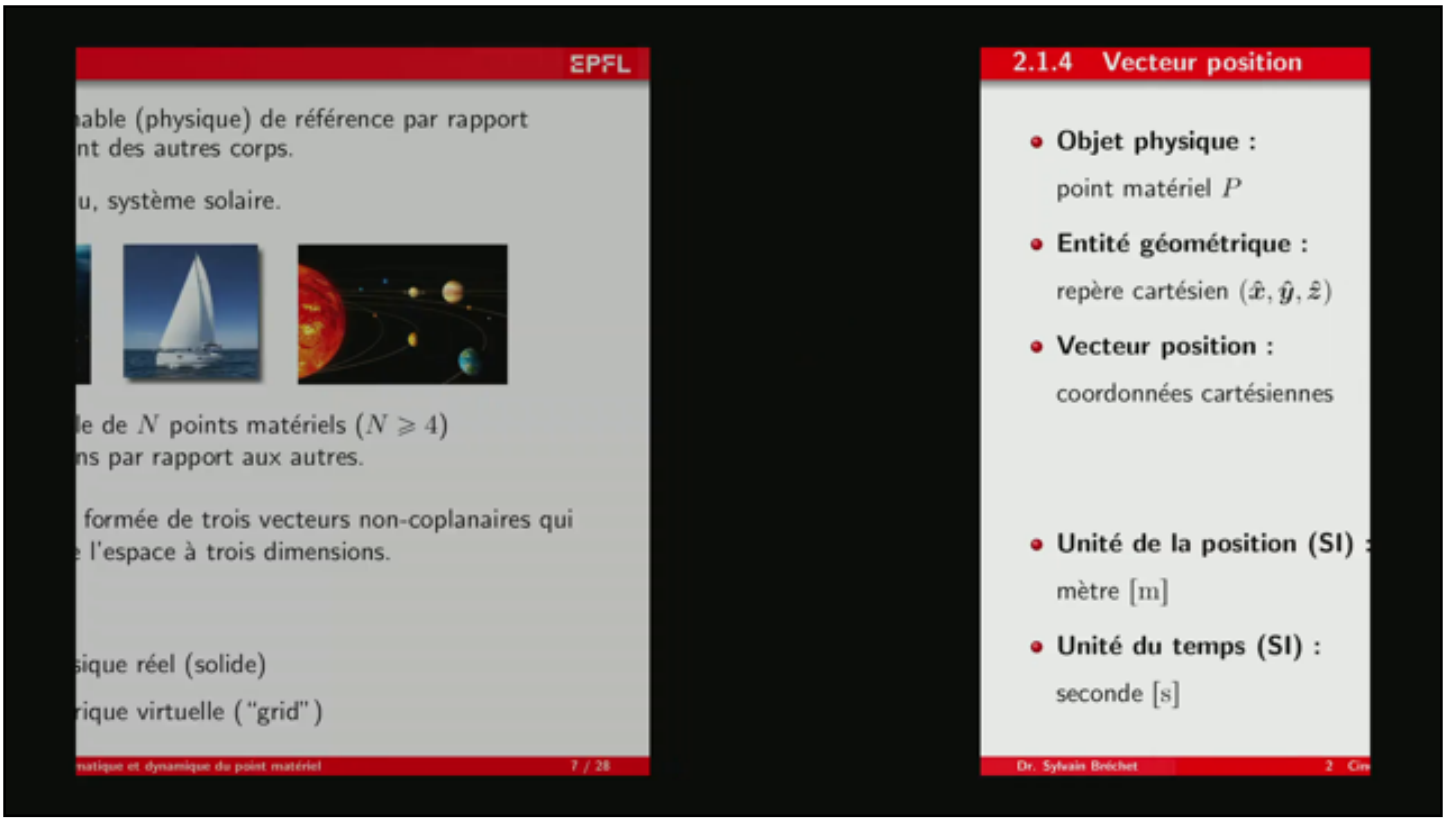


Voilà, parlons maintenant un petit peu du référentiel. La notion de référentiel est centrale en physique. C'est un objet par rapport auquel on mesure le mouvement. Imaginons que ces vendredis soir, vous êtes pressés, vous avez pris la voiture de vos parents, vous êtes sur l'autoroute, Los Angeles, vous allez fêter le début de vos cours, disons, à Genève, et puis vous êtes un peu pressés, donc vous roulez à 150 sur l'autoroute. Très bien, il ne faut pas le faire, on le sait tous. Vous êtes pressés, donc vous êtes distraits, vous vous rappelez plus, plus vous vous trouverez les rois d'art fixes sur l'autoroute et hop, il y a un petit flash lumineux qui apparaît, d'accord? Quelques jours plus tard, il y a une lettre qui est envoyée de la gendarmerie qui apparaît dans la boîte aux lettres, vous ouvrez la lettre et on vous dit que vous êtes en excès de vitesse, vous avez roulé à 150 km. Alors évidemment, il faut dire par rapport à quoi on mesure ces 150 km. Et bien on les mesure par rapport à la terre. C'est évident, mais il faut quand même le dire. La terre c'est quoi? C'est un solide qu'on peut considérer comme quasiment indéformable, on va négliger les effets liés au mouvement des plaques tectoniques, d'accord? On a quelque chose de solide, quelque chose qui localement se déforme quasiment pas, d'accord? Alors ça peut être un exemple, mais il y en a d'autres. Supposons que c'est l'été et puis vous prenez le voilier d'un ami, faites un petit tour sur l'ac. D'abord la journée commence bien, c'est une journée très chaude, d'accord? Et puis les nuages s'accumulent et tout d'un coup, le vent se lève, l'orage menace, et les flots impétueux viennent se fracasser contre la coque du bateau. Bon, alors lorsque ces flots se fracassent contre la coque du bateau, la vitesse des vagues par rapport

notes

résumé

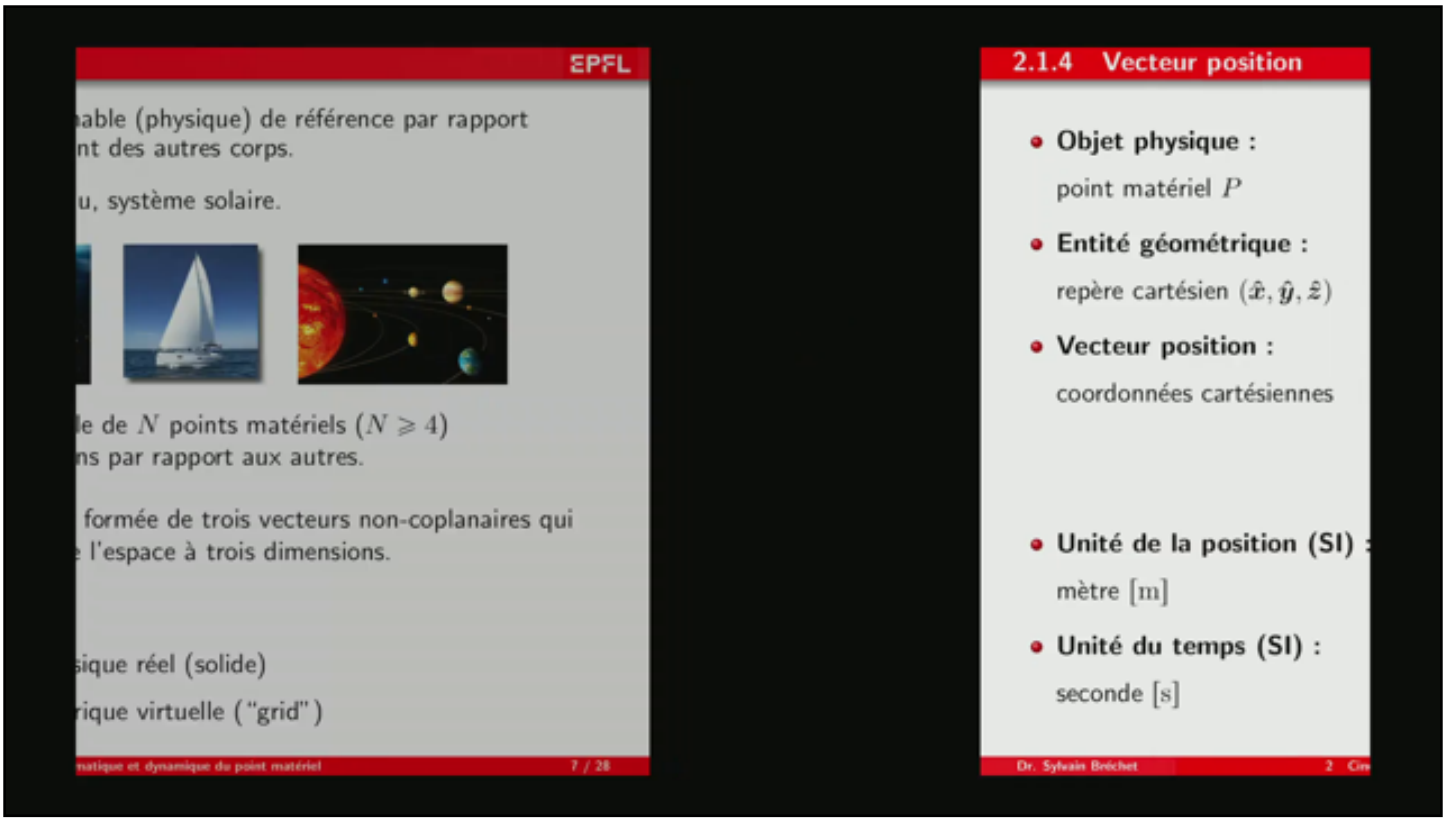
18m 15s



au rivage ne vous intéresse strictement pas, d'accord? Là ça serait la vitesse mesurée par rapport au référentiel de la terre. Non, ce qui vous intéresse, vous, c'est la vitesse relative que vont avoir ces flots par rapport à la coque du bateau. Et donc vous prendrez un autre référentiel, un autre objet indéformable qui est le bateau lui-même. L'ernier exemple, supposons qu'on s'intéresse au mouvement de rotation de la Terre dans le plan du système solaire. Clairement, on ne va pas prendre la Terre comme référentiel, non. On va prendre le système solaire comme référentiel et plus exactement, on aura besoin d'objets physiques. Alors là, on n'aura pas un objet unique, on va prendre plusieurs objets. On va d'abord se baser sur le soleil, d'accord? Puis on aura encore besoin de trois autres objets dont le mouvement relatif est négligeable lors de la rotation de la Terre autour du soleil, tel qu'il soit fixe. Qu'est-ce qu'on prend en général? On prend trois étoiles lointaines, qui plus est, on veut des étoiles qui ne sont pas tous dans le même plan du système solaire. Pourquoi? Parce que si on a des étoiles qui ne sont pas tous dans le même plan, si les points où se trouvent ces objets sont non-coplanaires, on va pouvoir définir trois vecteurs qui ne sont pas dans le même plan. On aura donc un repère pour mesurer le mouvement. Vous l'aurez donc compris, quand on veut un référentiel, on a besoin au minimum de quatre points matériels non-coplanaires qui sont fixes les uns par rapport aux autres. Ça, c'est pour le référentiel. Maintenant, quand on a un référentiel, en général, on le fait coincider avec un repère. Par exemple, je prends cette crée. Je ne vais pas le faire, mais si je la lance comme ça, je vais étudier son mouvement. Je pourrais par exemple prendre comme référentiel le sol et par extension la table

notes

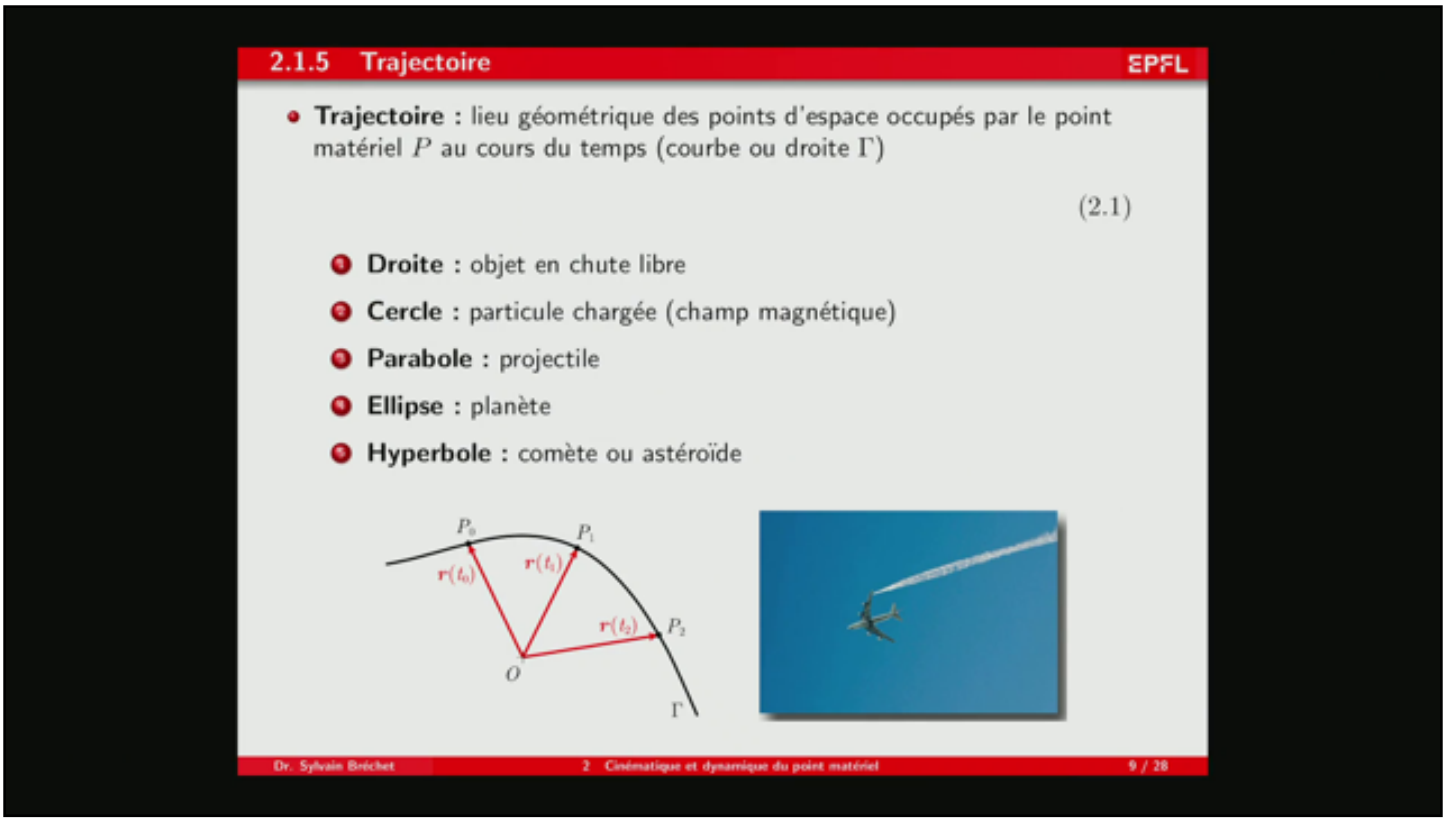
résumé



qui est immobile. Je vais par exemple prendre les axes de cornet écartéséancier naturels, par exemple la largeur de la table, c'est la axis des X. Ensuite, on aurait l'axe des Y qui correspond ici à cet arrêt de la table. Si on fait le produit vectoriel de ces deux directions, on trouve l'axe vertical qui serait le troisième axe. Il faut imaginer qu'on a des rayons laser qui s'étendent à l'infini. On peut faire un pavage de l'espace à trois dimensions à l'aide de petits cubes, des cubes de volume unité, d'arrêt unité. Il faut imaginer qu'on a pris l'espace de tout cet auditoire et qu'on a rempli de petits cubes virtuels. Par rapport à ces cubes virtuels, on va mesurer le mouvement. On a fait une réalité augmentée et c'est ça qu'on fait dans la pratique lorsqu'on veut décrire le mouvement d'un objet assimilé à un point matériel. Est-ce qu'un grade, un grade de petit cube est le seul choix qu'on puisse faire la réponse ? Non, on aurait pu choisir d'empiler des cylindres concentriques ou des sphères concentriques, chose qu'on fera par la suite lorsqu'on prendra comme outil de description des coordonnées cylindriques ou alors des coordonnées sphériques.

notes

résumé

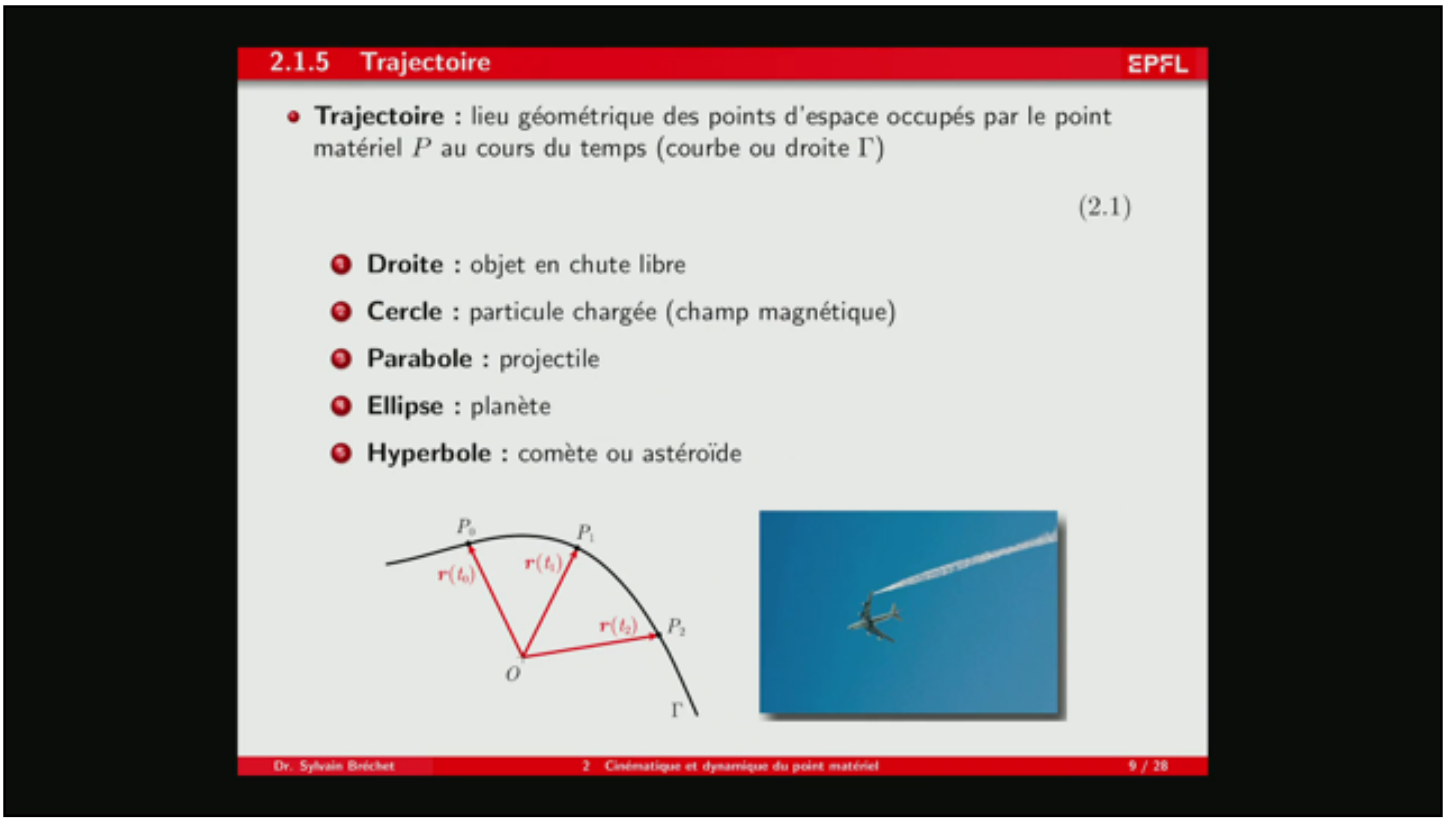


Mais pour l'instant, on va prendre des coordonnées cartes sociales jusqu'au chapitre 5. Avant d'introduire le vecteur position, j'aimerais encore juste mentionner que la notion de référentiel est tellement importante et radicale en physique qu'elle a amené des révolutions majeures, la relativité en étude. En relativité, ce qu'on essaie de faire les physiciens à l'époque, à la fin du XIXe siècle ou début du XXe siècle, c'est de décrire les lois de la physique de telle manière à ce qu'elles soient invariantes par rapport à l'ensemble de tous les référentiels qu'on appelle les référentiels d'inertie. Et ça, ça donnait la relativité restreinte, restreinte à quoi ? aux référentiels d'inertie et l'ensuite était généralisé à l'ensemble de tous les référentiels avec le nom de relativité générale. On parlera tout petit peu de relativité générale au chapitre 9 de ce siècle. Mais pour l'instant, concentre-nous sur la cinématique et introduisons le vecteur position. Donc on a notre modèle du point matériel et on décrit le mouvement de l'objet qui nous intéresse comme étant le mouvement d'un point et ce point c'est le point P qui se trouve ici. Donc on a un référentiel fixe, la Terre par exemple, et puis sur ce référentiel on pose virtuellement un grid, on va poser un système d'axe cartésien avec l'axe des absces, l'axe OX qui est ici, l'axe des ordonnées OY qui est là et l'axe verticale OZ qui est ici. On place l'origine quelque part à l'intersection de ces axes. Et puis on introduit des vecteurs unitaires, le long de ces axes, le vecteur unitaire X chapeau, le long de l'axe des absces, Y chapeau, le long de l'axe des ordonnées, le long de l'axe des ordonnées Z chapeau, le long de l'axe verticale. Donc l'entité géométrique essentielle qu'on a introduit, c'est le repère cartésien formé des vecteurs unitaires X chapeau, Y chapeau et Z chapeau. Et maintenant on aimerait décrire le vecteur position

notes

résumé

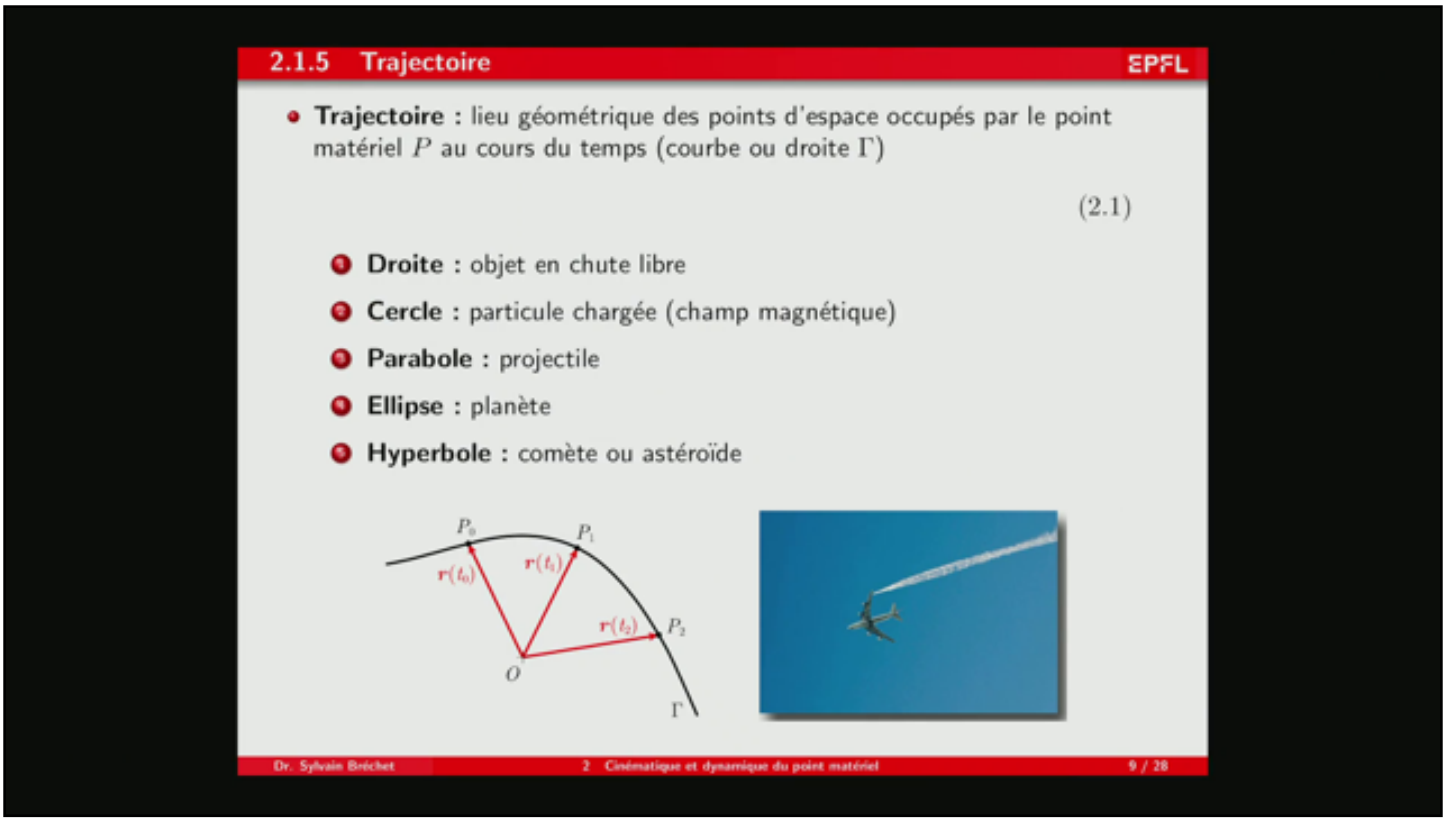
22m 57s



qui est issu de l'origine O du repère qu'on s'est choisi et qui pointe sur le point matériel P. C'est le vecteur que vous voyez ici en rouge. Ce vecteur position, c'est le vecteur OP. Et on a convenu de l'écrire comme étant le vecteur R, position de repos, qui est une fonction du temps. Ce vecteur position, on aimerait l'exprimer en composantes dans notre repère cartésien. Comment est-ce qu'on va faire ceci ? Comment est-ce qu'on va s'y prendre ? Et bien pour le faire, on aura besoin de prendre des plans qui sont orthogonaux aux axes de coordonnées. Prenons un premier plan qui est orthogonal à l'axe des absces, d'axe OX, et qui passe par le point matériel P. Vous voyez ce plan ici entretier, il est là. Alors ce plan va intercepter l'axe des absces en un point qui est ici et la distance qui sépare ce point de l'origine correspond justement à la coordonnée d' absces de notre point matériel. Cette coordonnée d' absces, c'est X doté. Mais attention, on est en train d'écrire un vecteur. Donc pour avoir un vecteur qui part de l'origine et pointe sur ce point, il faudra multiplier la coordonnée par le vecteur unitaire X chapeau. Et puis on va faire pareil maintenant pour avoir la deuxième coordonnée. On va prendre un plan qui est orthogonal à l'axe des ordonnées qui passe par le point P, il est ici. Le point d'intersection avec le lac se trouve là. La distance qui sépare ce point de l'origine, c'est justement la coordonnée d'ordonnée Y qui dépend du tenté. Et pour trouver le vecteur qui est là, il faudra multiplier cette coordonnée par le vecteur unitaire Y chapeau. On a un dernier vecteur à traiter, ou une dernière composante, si vous voulez. Celle qu'on obtient en prenant l'intersection du plan vertical, du plan qui est orthogonal, pardon, à l'axe vertical, qui passe par le

notes

résumé



point P avec cet axe vertical, ce qui définit évidemment le point qui est ici. La distance qui se sépare de l'origine, c'est justement la coordonnée verticale Z qui dépend du tent, qu'on va donc multiplier par le vecteur unitaire correspondant Z chapeau, d'accord, qui est ici, pour avoir un vecteur. Maintenant, la combinaison linéaire, la somme de ces trois contributions va nous donner le vecteur position, d'accord ? Alors, il y a deux choses à dire ici. Tout d'abord, voyez qu'il n'y a pas de dépendance en termes du temps des vecteurs unitaires. Pourquoi ? Parce qu'on considère que notre référentiel est fixe, notre père est fixe, d'accord ? Ces vecteurs unitaires, ils sont posés, ils ne bougent pas, donc ce ne sont pas des fonctions du temps. Le point matériel, il peut se déplacer au cours du temps, d'accord ? Donc, il part d'ici, il peut se déplacer au cours du temps, et donc, si il se déplace, le parallèle hippy-ped qui apparaît ici va changer, d'accord ? Ces dimensions vont changer, son orientation va changer, mais les vecteurs unitaires, eux, restent fixe. Quand on fait de la physique, on a des grandeurs qui ont une dimension physique, d'accord ? Donc, on doit l'introduire. Ces dimensions pour le vecteur position, c'est des mètres. Dans le système des unités internationales, la distance se mesure en mètre, d'accord ? Alors, si on prend ce vecteur position qui est ici, où se cachent les mètres ? Ils se cachent dans les coordonnées. X de t est mesuré en mètre, Y de t est mesuré en mètre, Z de t est mesuré en mètre. Les vecteurs unitaires, eux, n'ont aucune dimension physique, pour les noter à côté, c'est important, d'accord ? Un vecteur unitaire n'a pas de dimension physique, c'est les coordonnées qui portent ces dimensions. Et donc, le vecteur position, lui, ce mesuré en mètre, ce mesuré en mètre, c'est coordonné

notes

résumé

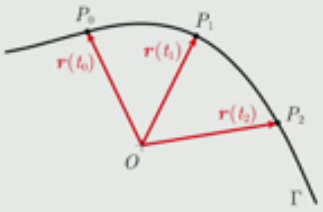
2.1.5 Trajectoire

EPFL

- **Trajectoire :** lieu géométrique des points d'espace occupés par le point matériel P au cours du temps (courbe ou droite Γ)

(2.1)

- **Droite :** objet en chute libre
- **Cercle :** particule chargée (champ magnétique)
- **Parabole :** projectile
- **Ellipse :** planète
- **Hyperbole :** comète ou astéroïde

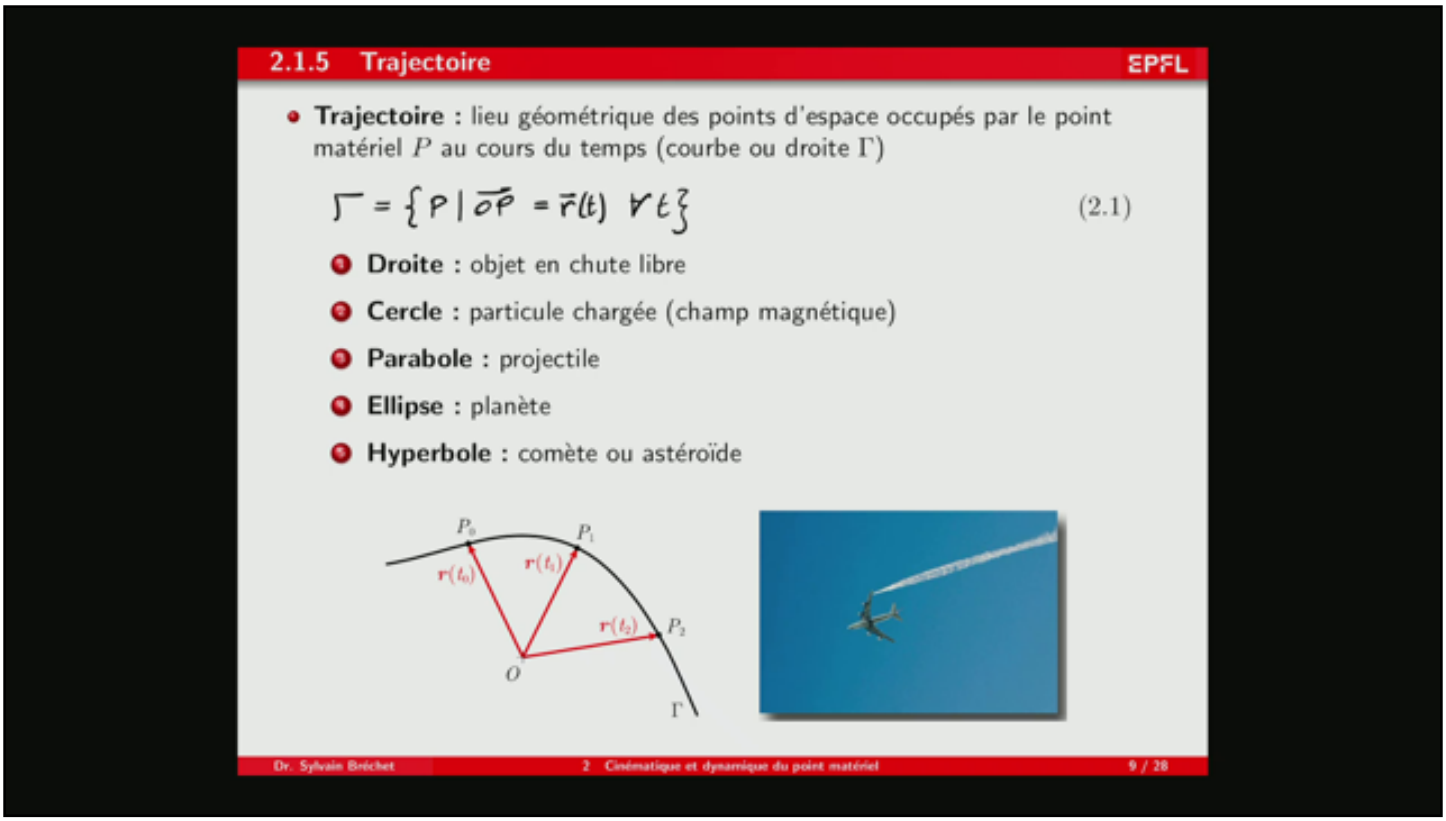




aussi les pas, les petits vecteurs unitaires. Ces coordonnées, elles varient au cours du temps, donc, ce sont nécessairement des fonctions du temps. Le temps, lui, est mesuré, bien entendu, en seconde, d'accord ? Ce qui nous permet maintenant de discuter la notion de trajectoire.

notes

résumé



La trajectoire, c'est quelque chose d'assez intuitif, quelque part. Imaginons qu'on est par une belle journée d'été, au bord du lac Léman, ou au Caraïb, comme vous voulez, d'accord ? Assisez sur une serviette de bain, on regarde au ciel, et qu'est-ce qu'on voit ? Dans le beau ciel d'azur bleu, on voit des traces blanches, d'accord ? Et si on regarde ce qui se passe au bout de la trace blanche, se cache évidemment un avion, d'accord ? Et donc, ce que signale la trace blanche, c'est l'ensemble des points dans l'espace à trois dimensions par lesquelles est passé l'avion, puisque ces traces blanches sont des restes de combustion liés au gaz d'échappement, notamment le kérosène qui a été brûlé dans les turbos réacteurs, d'accord ? Donc, en réalité, cette notion de trajectoire, c'est un lieu géométrique, l'ensemble des points par lesquels est passé l'objet. Donc, on n'a pas une information temporelle, on a vraiment une information géométrique, une information spatiale, d'accord ? Alors, on va maintenant écrire la définition mathématique de la trajectoire, et après, on prendra plusieurs exemples. La trajectoire gamma d'un point matériel, c'est l'ensemble des points P, tels que le vecteur OP, d'accord ? Donc, le vecteur issu de l'origine qui pointe sur ce point, d'accord, soit égal au vecteur position, ou coincide avec le vecteur position de l'objet, à un instant quelconque de son mouvement. Donc, c'est vrai pour tous les instants en particulier. D'accord ? Si vous prenez l'ensemble des points, tels qu'ils satisfont ce cahier des charges à un instant donné, eh bien la collection, l'ensemble de ces points va vous donner naturellement la trajectoire. Prenons un exemple. Supposons qu'on ait choisi l'origine ici, et qu'à un temps T0, le point matériel assumé à l'objet se trouve là. Son vecteur position, c'est R de T0. A un temps T1, il est ici, au point P1, son vecteur position, c'est R de T1,

notes

résumé

29m 5s

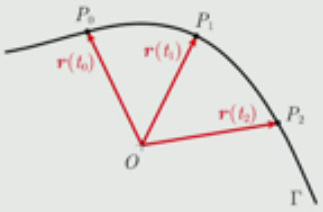
2.1.5 Trajectoire

EPFL

- **Trajectoire :** lieu géométrique des points d'espace occupés par le point matériel P au cours du temps (courbe ou droite Γ)

$$\Gamma = \{ P \mid \overrightarrow{OP} = \vec{r}(t) \ \forall t \} \qquad (2.1)$$

- **Droite :** objet en chute libre
- **Cercle :** particule chargée (champ magnétique)
- **Parabole :** projectile
- **Ellipse :** planète
- **Hyperbole :** comète ou astéroïde

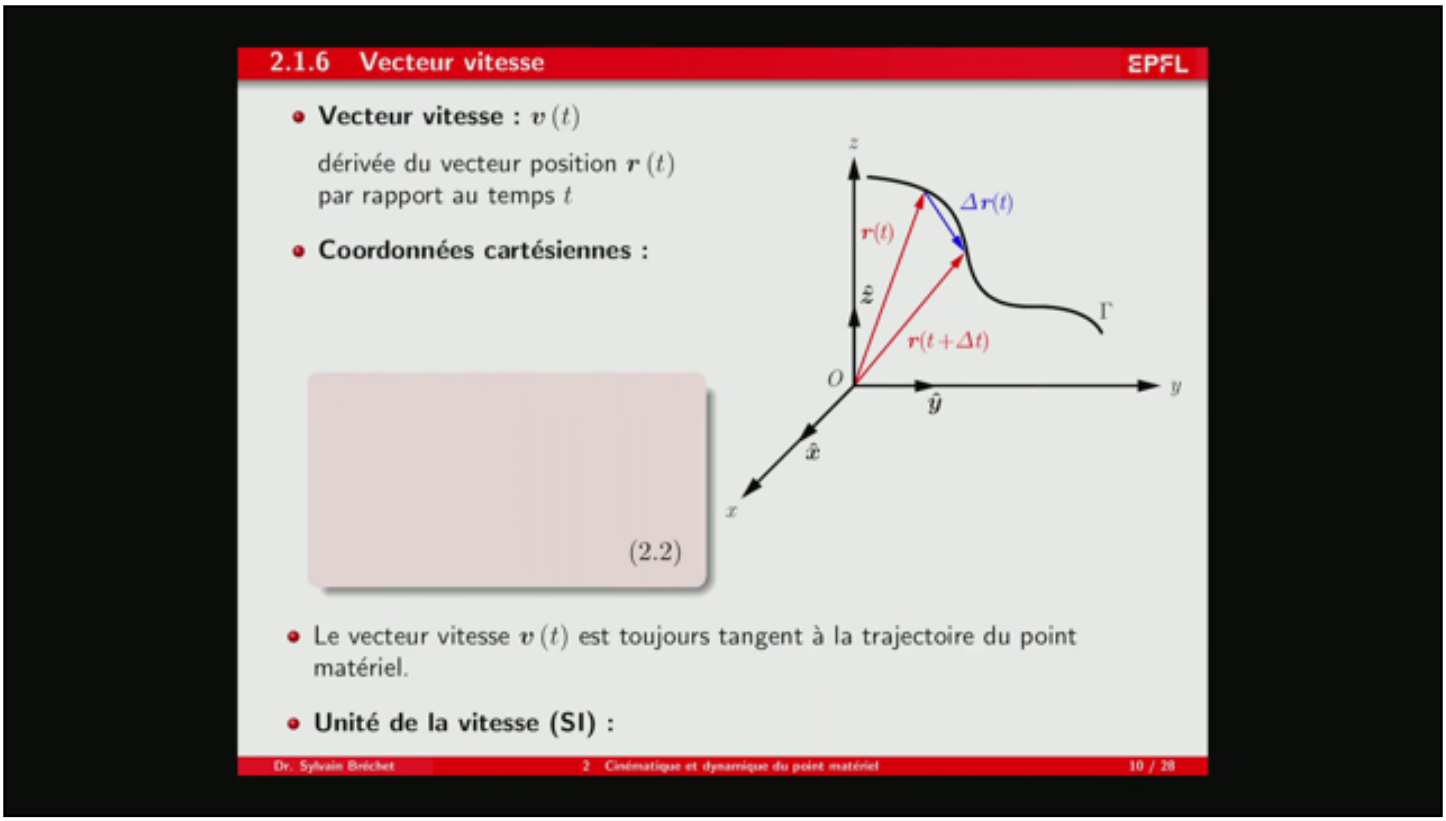




et un instant plus tard, au temps T2, il est en P2, et son vecteur position, c'est R de T2. Alors si maintenant vous rajoutez des temps intermédiaires, vous en rajoutez beaucoup, vous allez avoir un ensemble de vecteurs positions qui vont apparaître, vous avez un ensemble de points, vous allez lisser vos points et vous trouvez la trajectoire. Alors prenons quelques exemples de trajectoires qui vont être assez clairs pour tout le monde. Premier exemple, c'est le suivant. J'ai volontairement de me décaler pour ne pas en mettre partout. J'ai ici une craie. Si cette craie, je la lâche sans vitesse initiale, que va-t-il se passer ? Elle aura un mouvement de chute libre. Et donc si on regarde les points par lesquels va passer le centre de la craie au cours du temps, tous ces points vont se trouver sur une même droite verticale. Ça, c'est un premier exemple de trajectoire. Un deuxième exemple de trajectoire serait le mouvement d'une particule chargée, par exemple un électron, d'accord ? Dans une région de l'espace où n'y a ni un champ magnétique, et si le champ magnétique est orthogonal au mouvement initial de l'électron, eh bien l'électron va en réalité se déplacer sur une trajectoire qui sera formée d'un ensemble de points qui se trouve sur un cercle fermé. Donc on aura une trajectoire circulaire. C'est un deuxième exemple. Prenons maintenant un troisième exemple. Quand ? J'ai toujours encore prendre cette craie, enfin une autre craie, similaire à la première. Si maintenant cette craie, au lieu de la laisser tomber sans vitesse initiale, je lui donne une vitesse initiale qui est oblique, qui se trouve dans un plan vertical,

notes

résumé

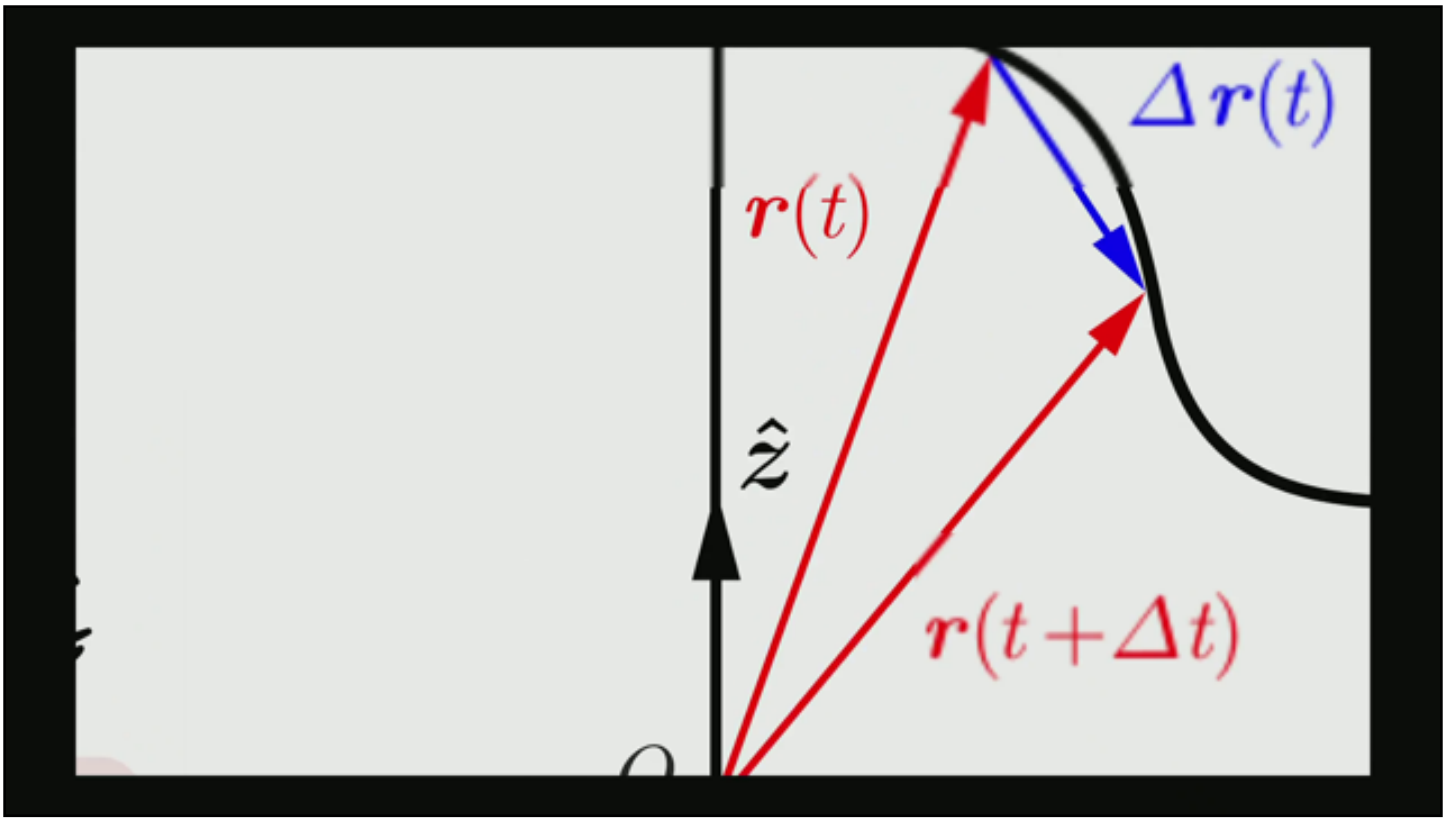


comment va se déplacer le centre de la craie en négligiant les frottements selon une parabole ? Regardez. D'accord ? Donc ça c'est le troisième exemple de trajectoire simple qu'on peut trouver. Si maintenant vous prenez une planète et que vous regardez son mouvement autour, par exemple, du soleil, eh bien d'après la loi des orbites de la mécanique celeste, ce mouvement doit se faire selon une trajectoire qui est une ellipse. L'ensemble des points par lesquels va passer la planète, la Terre en particulier autour du soleil, sera une ellipse. En revanche, si vous prenez un objet lointain qui s'approche du système solaire, prenons par exemple une comète ou une astéroïde, eh bien lorsqu'elle s'approche du soleil, elles sont déviées par le champ gravitationnel généré par le soleil et elles repartent. D'accord ? Si vous décrivez l'ensemble des points par lesquels passe la comète ou l'astéroïde, vous verrez que ces points se trouvent sur une branche hyperbole. D'accord ? Donc ça c'est le dernier exemple que je voulais vous donner. Alors maintenant, il y a un dénominateur commun. Pour ceux qui sont perspicaces, vous regardez ces trajectoires qui sont une droite ou des courbes, d'accord ? Fermés ou pas ? Eh bien ces trajectoires, on peut les obtenir à l'aide d'un objet tridimensionnel qu'on va intersecter par un objet bidimensionnel. Est-ce que quelqu'un a l'idée à voir de quel objet tridimensionnel ? On peut le donner. Alors effectivement, je voulais vous donner un indice, mais vous étiez répercits assez rapide, c'est effectivement des coniques, d'accord ? L'indice que je voulais vous donner pour répondre à cette question, c'est de penser à Bob Marley. Évidemment, ce qu'on associe tout de suite à Bob Marley, c'est le cône, d'accord ? Donc ça permet de retenir ces trajectoires. Alors, ceci étant dit, on va maintenant introduire le vecteur et vitesse.

notes

résumé

32m 37s

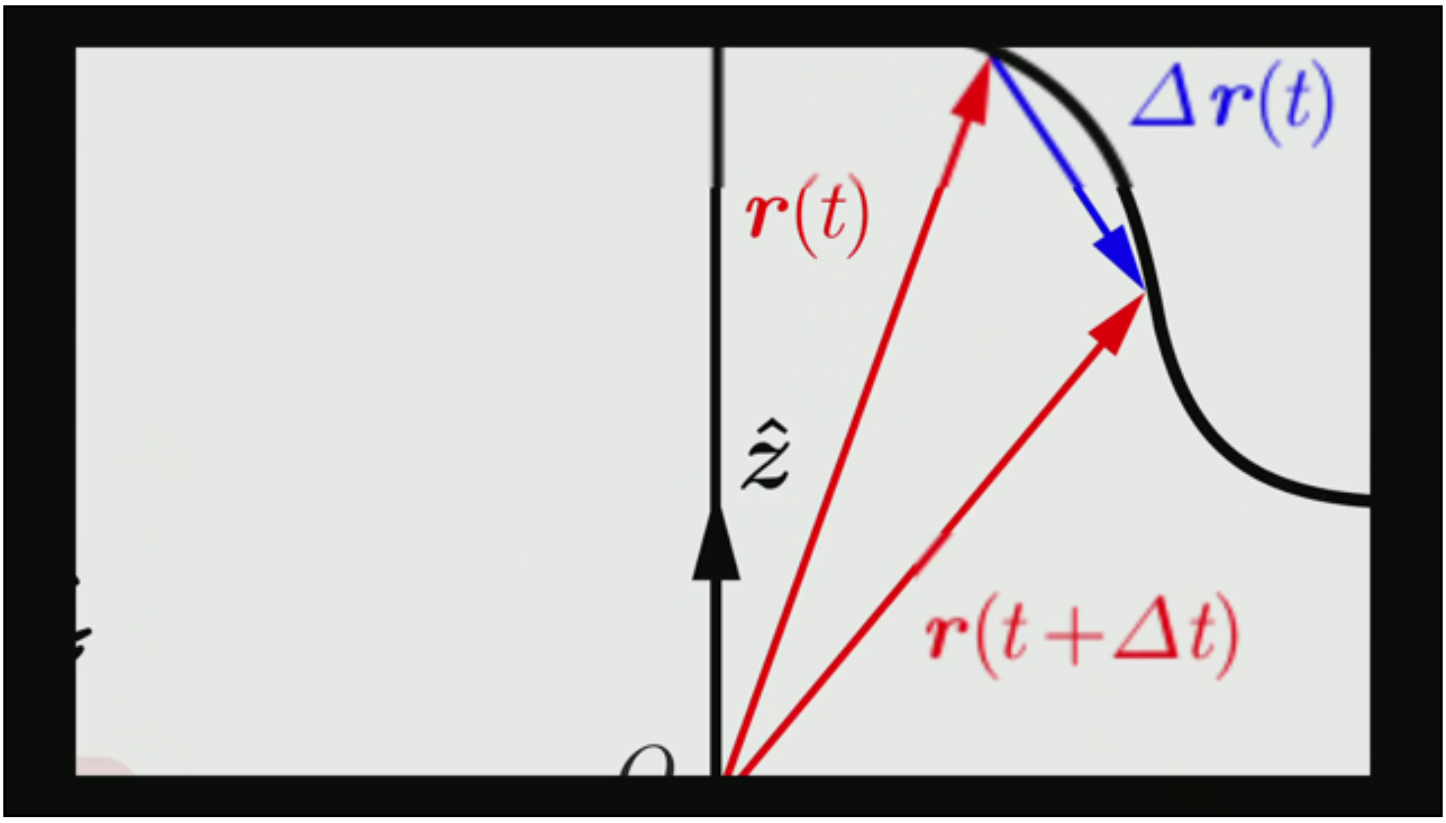


On a besoin de la trajectoire pour le faire. C'est pour ça qu'on n'a pas tout de suite introduit le vecteur vitesse. Après le vecteur position, on a d'abord parlé de la trajectoire. Donc, prenons un objet assimilable à un point matériel qui se déplace par exemple selon la trajectoire gamin que vous voyez ici en noir. D'accord ? Est-ce qu'on désire faire ? C'est déterminer son vecteur vitesse. Alors, on va d'abord le faire algébricement. Il sera une certaine vertu, mais ce qui est beaucoup plus parlant, c'est le faire ensuite géométriquement. Là, on comprend ce qui se passe. D'accord ? Donc, le vecteur vitesse, V qui dépend du tenté, la vitesse peut changer au cours du temps, c'est la dérivé temporelle du vecteur position qui est une fonction du tenté. Pourquoi ? Comme je le disais en introduction, on a vu la semaine passée que si on a un mouvement au le long d'un axe, un mouvement rectiligne, la dérivé temporelle de la coordonnée de position, c'est la coordonnée de vitesse. Bon, alors maintenant, si le mouvement n'est pas rectiline qu'il est quelconque, on a un vecteur position qu'on peut exprimer lui en composantes dans un repère cartésien. Et pour chacune de ces composantes, on aura une description rectiline de long de l'axe. D'accord ? Et donc, il faudra que pour chaque composante, la dérivé temporelle de la composante donne la composante du vecteur vitesse correspondant à c'est exactement ce qu'on va écrire maintenant. Les vecteurs unitaires, eux, ils sont constants, ils ne bougent pas. Donc, on va partir du vecteur position et on va déduire le vecteur vitesse. Le vecteur position, c'était la coordonnée d'apsis, qui dépend du temps foieux le vecteur unitaire correspondant, plus la coordonnée d'ordonnée, qui dépend aussi du temps foieux le vecteur unitaire y chapeau, et pour terminer, la cornée verticale, z de t, foieux le vecteur unitaire vertical z chapeau. D'accord ?

notes

résumé

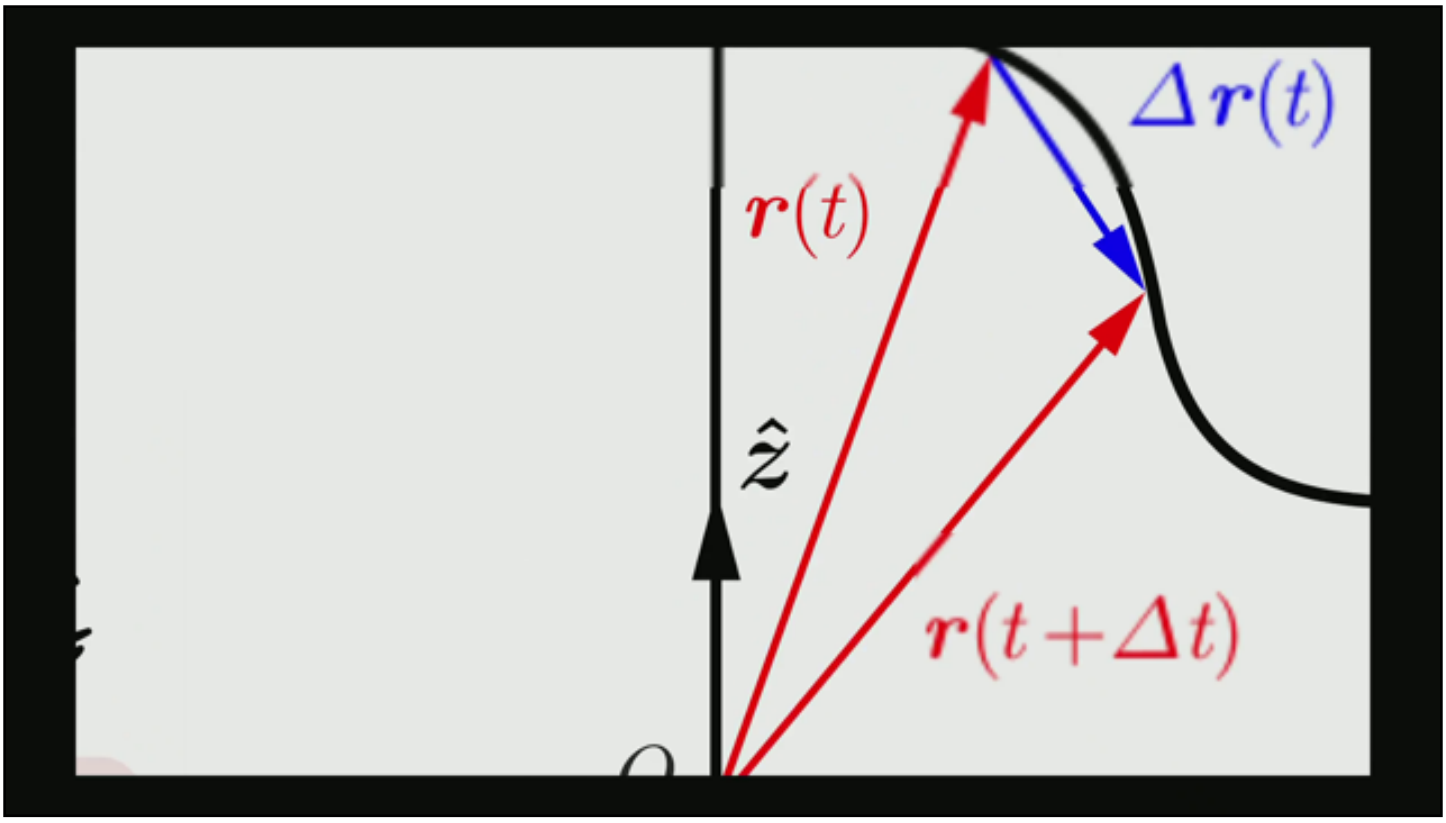
34m 35s



Alors, ce vecteur position, on le dérive par rapport au temps. Quand on le dérive par rapport au temps, on ne dérive pas les vecteurs unitaires, x chapeau y chapeau z chapeau sont des constantes, on va dériver par rapport au temps les coordonnées, à savoir x qui devient x point, y qui devient y point, z qui devient z point. D'accord ? Voilà ce qui se passe concrètement lorsqu'on fait une représentation en coordonnée cartésienne. Bon. Maintenant, géométriquement, on fait quoi ? C'est ça qui est intéressant. Géométriquement, lorsqu'on écrit le vecteur vitesse, comme fonction du temps, on l'écrit comme la dérivée temporelle du vecteur position, et cette dérivée temporelle, on peut l'exprimer comme une limite. D'accord ? Comme on la fait, la semaine passée. On aura donc la limite de l'intervalle de temps delta t, temps vers z, de quoi ? Du déplacement qui devient maintenant un vecteur, qui est la variation du vecteur position, delta r de t, divisé par l'intervalle de temps delta t. Cet intervalle, on le fait tendre vers z. D'accord ? Alors, on va continuer cette écriture sous forme de limites qu'on détaille, et ensuite on va voir géométriquement ce que ça veut dire. D'accord ? Donc concrètement, le vecteur déplacement, c'est quoi ? C'est la différence entre le vecteur position finale et le vecteur position initiale. Donc on a la limite de delta t qui tend vers z, de r évalué au temps final, en t plus delta t, moins r évalué au temps initial en t, et on le divise par delta t. D'accord ? Bon, et puis on a vu la semaine passée, qu'on avait une écriture condensée sans les limites, lorsqu'on remplace le symbole delta par un petit dé, ça signifie automatiquement qu'on a pris une grandeur infinitesimale. Donc cette vitesse, c'est le rapport du vecteur déplacement infinitesimal dr sur l'intervalle de temps infinitesimal dt, c'est tout simplement airpoint.

notes

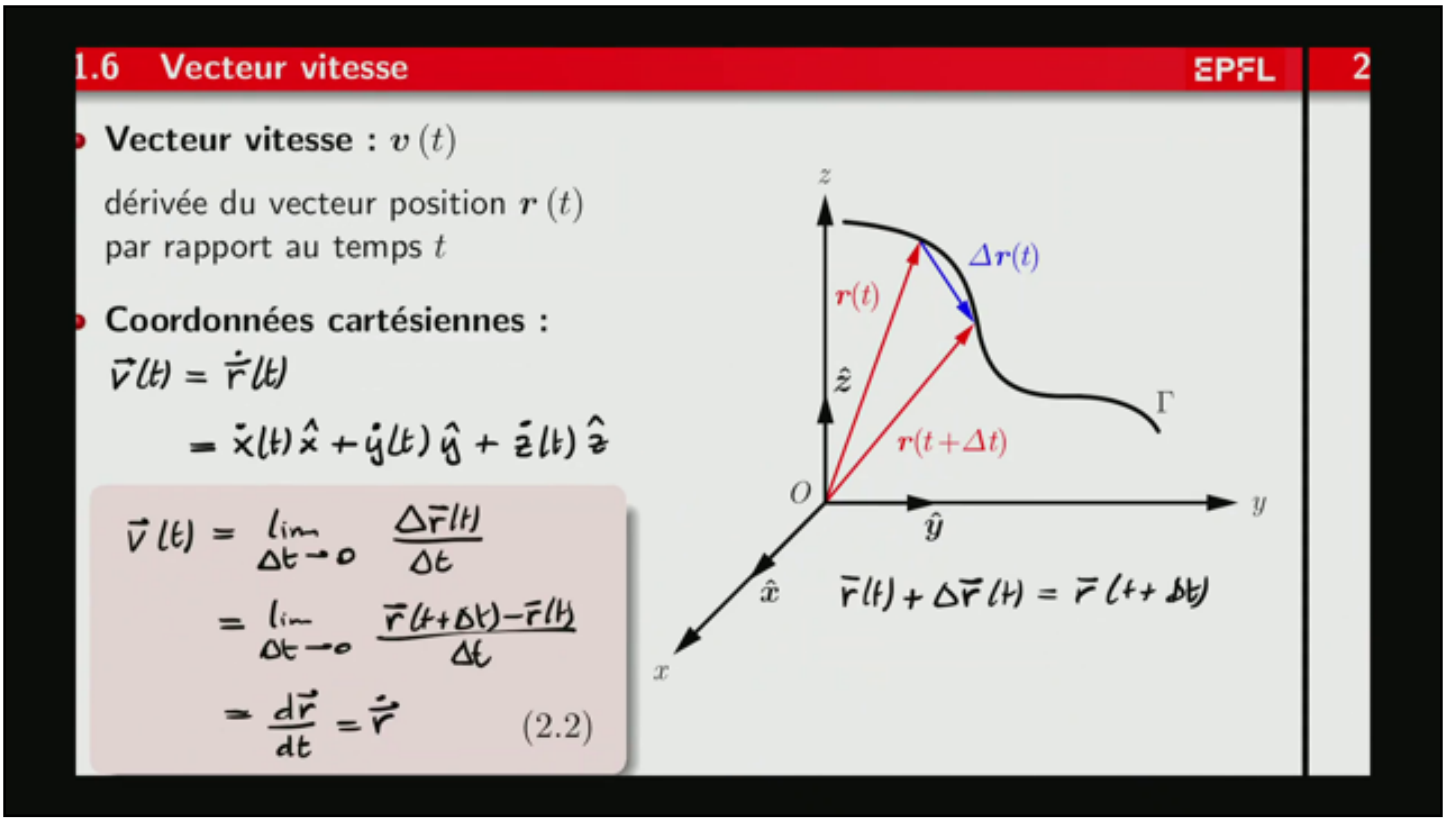
résumé



Ok. C'est très joli, mais concrètement, visuellement, graphiquement, ça veut dire quoi ? D'accord ? Alors, écrivons tout d'abord le fait que le vecteur position autentée, si on lui ajoute le vecteur déplacement entre t et t plus delta t, on va trouver le vecteur position autentée plus delta t. Alors, maintenant, graphiquement, supposons qu'autantée, le point matériel, il est là. D'accord ? Autantée plus delta t, il est ici. Bon. Alors, on a le vecteur position autentée, qui est ici d'origine qui pointe sur le point matériel. On a le vecteur position autentée plus delta t, qui est ici d'origine qui pointe sur le point matériel autentée plus delta t. D'accord ? Le vecteur déplacement, eh bien, c'est la différence entre les deux. En d'autres termes, si vous faites la somme vectorielle du vecteur position autentée, plus le vecteur déplacement ici est en bleu, vous allez obtenir le vecteur position autentée plus delta t. C'est ce qu'on vient d'écrire. D'accord ? Donc, le passage de ce numérateur à celui-ci, c'est simplement une reformulation algébrique. Il n'y a rien d'autre de caché ici. Ok ? Maintenant, quand on veut écrire la vitesse, c'est pas le déplacement qui nous intéresse, c'est le déplacement infinitésimal. Vous voyez bien que ce vecteur déplacement ici, il a une orientation un peu bizarre. D'accord ? Il part de la courbe, il s'enlène en ouallie et il s'en rapproche. Alors, pour obtenir un déplacement infinitésimal, qu'est-ce qu'on fait ? On zoom, ok ? Donc, on reprend, je juste fais un frise ici de l'écran, voilà.

notes

résumé

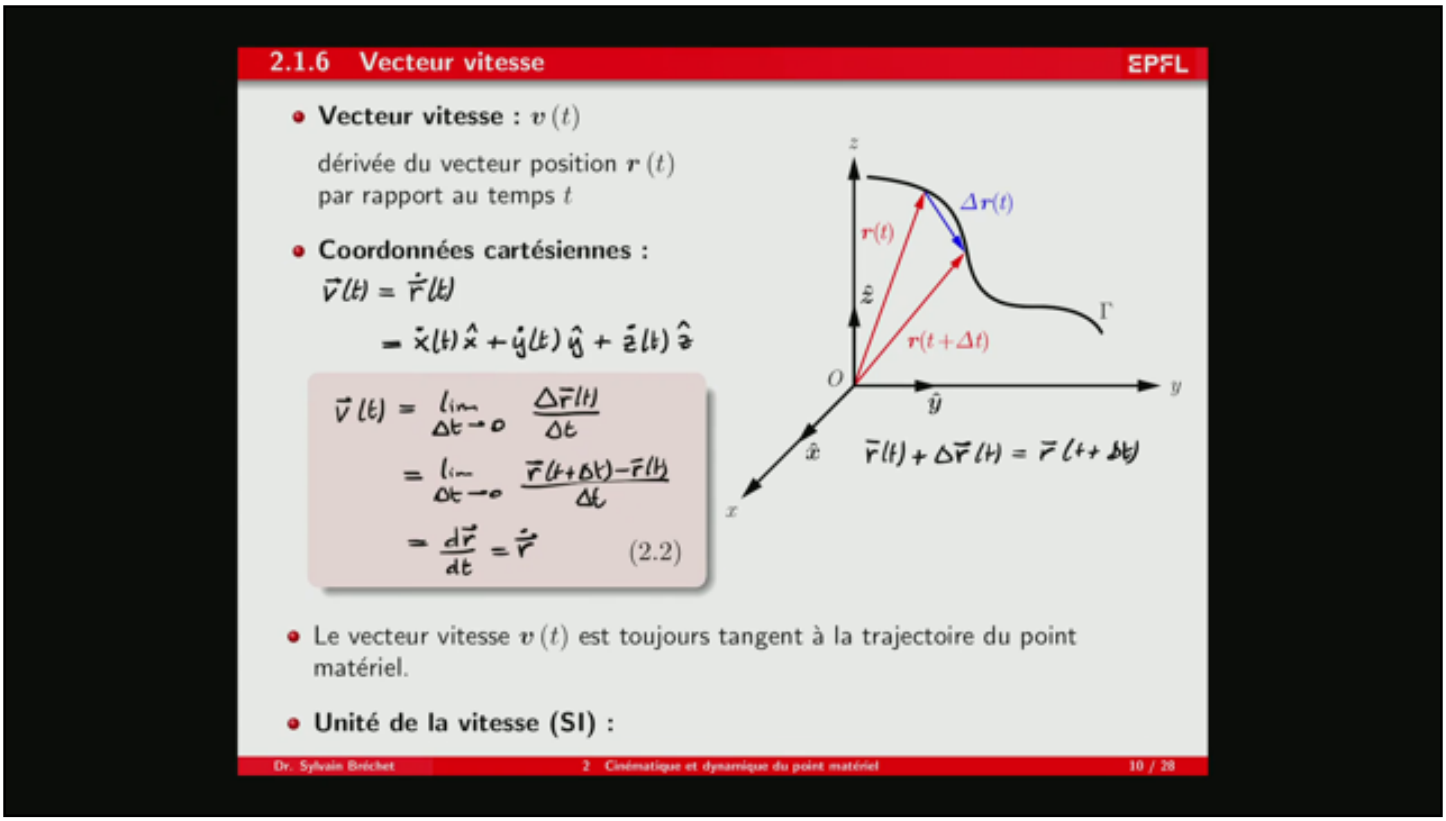


On reprend ici notre courbe et on zoom, on zoom, on zoom. Bon. Alors, on va prendre le point qui est là et on va se déplacer de longs la trajectoire pour l'amener infiniment proche du point qui est ici. D'accord ? En supposant qu'on est zoomé assez, je vais au maximum de ce que je peux faire. Voilà, vous avez un point qui est là puis le deuxième qui est ici. D'accord ? Alors, si maintenant vous prenez le vecteur déplacement, vous voyez que si vous zoomez suffisamment, comme vous avez une courbe continue, le rayon de courbure va tendre vers l'infini. D'accord ? Vous va être suffisamment grand pour qu'en fait, le vecteur déplacement soit vraiment le long de la trajectoire. Localement, la trajectoire va devenir un segment. D'accord ? Dans la limite infinitésimale. Ça veut dire quoi ? C'est-à-dire que dans la limite infinitésimale, en réalité, le vecteur déplacement infinitésimal, il est tangent à la trajectoire. D'accord ? Le vecteur DR, il est aussi petit qu'on peut le faire le long de cette trajectoire. Alors ça, c'est important.

notes

résumé

39m 52s



Parce que maintenant, si on prend ce vecteur déplacement infinitésimal, qu'on le divise par l'intervalle de temps infinitésimal d'été, on trouve le vecteur vitesse. Le multiplier, enfin le diviser par d'été, revient à multiplier le vecteur déplacement infinitésimal DR par un nombre positif, qui est l'inverse de d'été. D'accord ? Si vous prenez un vecteur que vous le multipliez par un nombre réel positif, d'accord ? Vous allez obtenir un autre vecteur qui est forcément colliné, c'est-à-dire qu'il a la même orientation. Donc le vecteur vitesse est nécessairement colliné au vecteur déplacement infinitésimal, ce qui veut dire que le vecteur vitesse sera toujours, j'insiste bien, toujours, tangent à la trajectoire pour souigner le mot toujours. D'accord ? C'est essentiel. Le vecteur vitesse sera toujours tangent à la trajectoire. Si vous avez une tête chercheuse qui fait un mouvement compliqué, comme celui que vous voyez dans un vieux James Bond, le James Bond Octopussy par exemple dans la scène introductive, où vous avez une tête chez ceux qui se déplace dans tous les sens possibles, eh bien son vecteur vitesse va toujours être tangent à la trajectoire de la tête chercheuse par exemple. D'accord ? Alors, la dimension physique du vecteur vitesse sera différente de la dimension physique du vecteur déplacement, qui est la même que celle du vecteur position, d'accord ? Mais, l'orientation, elle sera la même.

notes

résumé

40m 45s

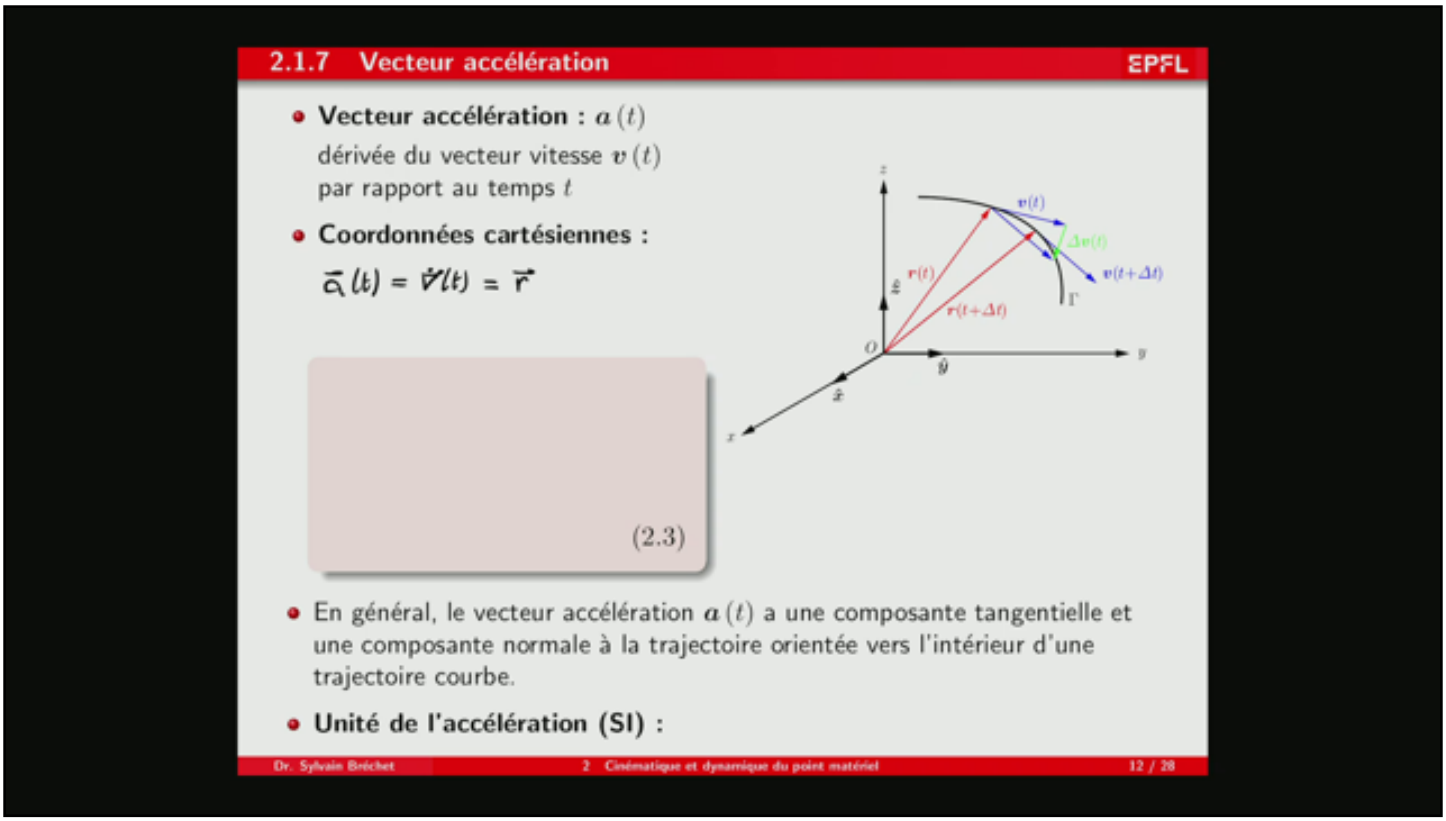


Donc quelle est la dimension maintenant de ce vecteur vitesse dans le système des unités international ? Pour la trouver, il faut comprendre que lorsqu'on additionne, le soustrait des grandeurs, elle doit avoir les mêmes unités, et c'est lorsqu'on multiplie des grandeurs, qu'on multiplie des unités, c'est lorsqu'on divise des grandeurs, qu'on divise des unités. Donc, le vecteur déplacement, le vecteur déplacement infinitasimal, à une unité de distance, c'est des mètres. Le scalaire intervalle de temps ou intervalle de temps infinitasimal, c'est une grandeur qui est mesurée en seconde, donc on a le rapport de mètres sur des secondes, et on peut s'y écrire comme des mètres, fois des secondes, élevés à la puissance, moins un. Voilà l'unité physique de la vitesse. Alors, avant de prendre la pause, je vous propose qu'on fasse une petite expérience sympathique

notes

résumé

42m 9s

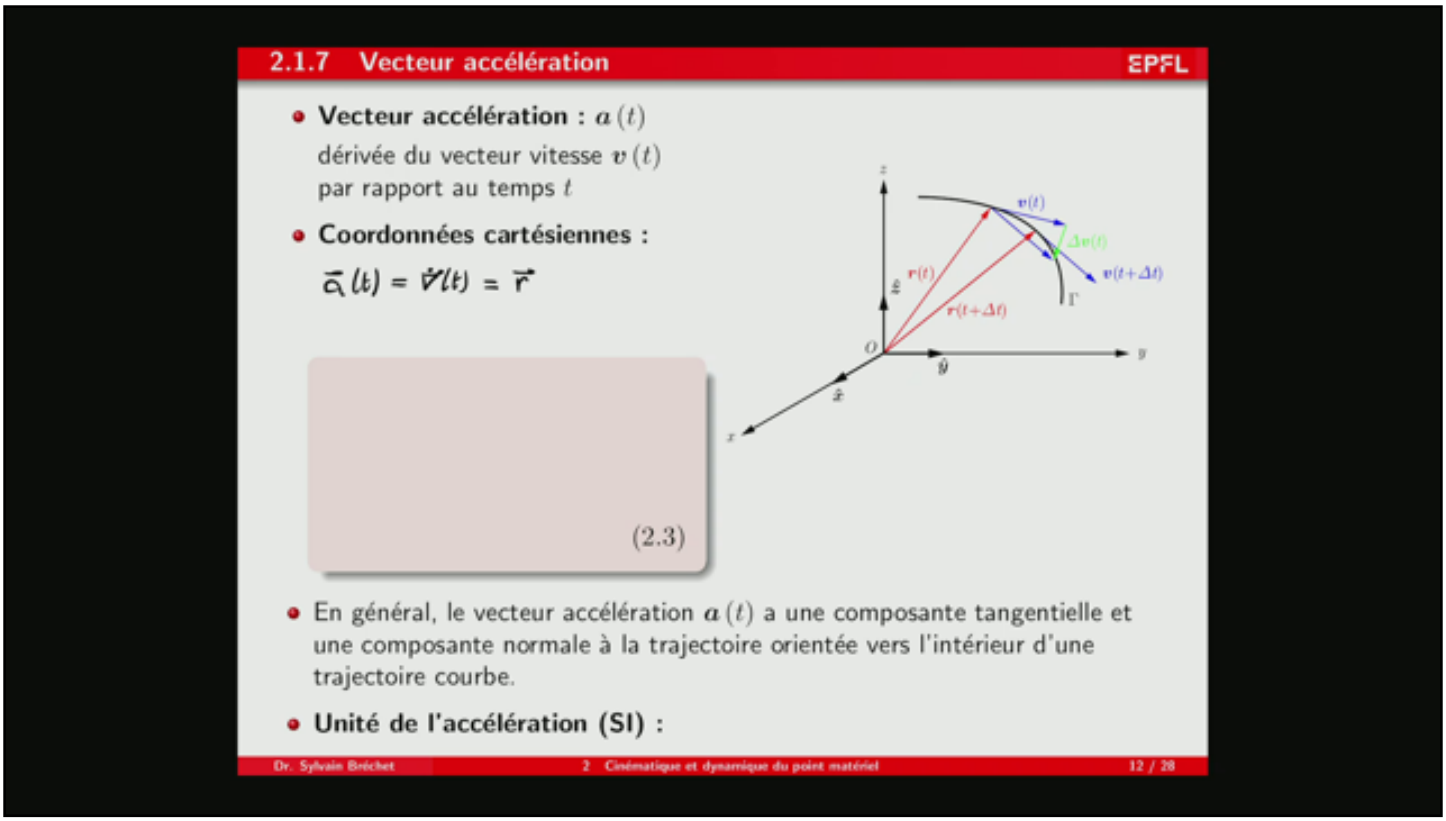


où on va mesurer plutôt la vitesse d'une balle de fusil. J'aurais besoin d'un coéquipier, de quelqu'un qui peut m'aider, il y a-t-il dans cette salle un lieutenant qui a payé ses galons dans l'armée suisse ? Non ? Pas encore ? Parfois il y en a, parfois il y en a. Vous êtes lieutenant ? Si vous êtes lieutenant, venez me rejoindre. Ah non, c'est bien, c'est bien, sergent. Ah vous êtes déjà sous-off, sous-officier supérieur. Donc venez me rejoindre s'il vous plaît. Ah si. Voilà, donc on va se placer sur la caméra numéro 2, là voilà. Et alors, ce que vous avez ici sur la caméra 1, c'est un dispositif qui va mesurer la vitesse de la balle de fusil. C'est quoi votre prénom ? Jolane. Jolane. Alors tout à l'heure, Jolane va tirer avec ce fusil qui est un flot berre, qui tire du 22 long-riffe, d'accord ? Et ce que vous allez voir sur le dispositif, c'est une vitesse mesurée comme le dispositif est américain, malheureusement pas en kmh, parce qu'il aurait été sympathique, non, en pied par seconde. Mais la conversion des pieds par seconde au kmh, elle est facile. Il faut ajouter 10%, il faut multiplier par 1,1. D'accord ? Alors la vitesse de propagation du son dans l'air, elle est de 340 mètres par seconde pour une température qui est à peu près la température ambiante. D'accord ? Bon, alors maintenant, si on convertit ces 340 mètres par seconde en kmh, on trouve 1 200, on peut multiplier par 3,6, on trouve 1 225 kmh à peu près. D'accord ? Et donc la valeur qu'on trouvera ici, il faudra qu'on la multiplie par 1,1 pour pouvoir comparer à la vitesse du son. Alors, Jolan, pardon, Jolan, je vais vous demander de prendre ces lunettes de protection. Est-ce que vous voulez des pammiers roues ? C'est bon pour vous ? Je pense que

notes

résumé

43m 0s



c'est bon. Ça ira, hein ? Donc ce qui va se passer ici, la balle sort du canon, elle va passer devant le premier détecteur, devant la première cellule, la cellule s'enclenche, le chronomètre aussi, d'accord ? Et lorsqu'elle passe devant la deuxième cellule, le chronomètre se déclenche et c'est l'intervalle de temps qui est mesurée. Alors vous me direz, oui, mais attendez, comment est-ce qu'on est sûr qu'on a à faire un mouvement rectil uniforme ? Eh bien, on est sûr qu'on a un mouvement rectil uniforme pour la raison suivante. C'est que, si vous voulez, le temps de passage est tellement court, que l'action du poids qui permettrait d'avoir un mouvement ballistique peut être complètement négligeée. De plus, les frottements de l'air sont à peu près négligeables. Donc on peut considérer que la vitesse est à peu près constante, ce qui veut dire qu'on n'a pas besoin de calculer la vitesse instantanée en prenant la limite, on prend simplement le rapport du déplacement sur l'intervalle de temps. Jolann, ce que je vais vous demander de faire, c'est vous armez le canon, vous faites descendre ici le clapet, vous armez et vous refermez, faites voir le mouvement. Comment ça ? Attendez, je vais le faire, je le fais une fois. D'accord ? Vous le faites descendre, hop et vous le remontez. Et après, ce qu'il faudra simplement faire, c'est tirer sur la gâchette. Je peux y aller là ? On va compter à trois. D'accord ? Alors il juste... Oui, oui, c'est bon, on a effectivement la caméra qui est branchée sur l'affichage, donc c'est tout bon. Alors, Jolann, à trois, vous tirez. Un, deux, trois. 753 pieds par seconde. D'accord ? Vous multipliez ceci par 1,1. Vous êtes en-dessus des 800 kmh. C'est pas mal, Jolann, mais je suis sûr que vous pouvez faire mieux. D'accord ? Parce que là, vous êtes bien en-dessas du mur du son.

notes

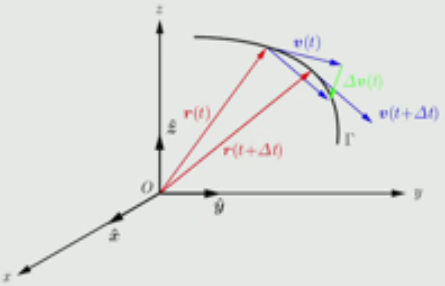
résumé

2.1.7 Vecteur accélération

EPFL

- **Vecteur accélération :** $\boldsymbol{a}(t)$
  dérivée du vecteur vitesse $\boldsymbol{v}(t)$
  par rapport au temps t
- **Coordonnées cartésiennes :**

$$\vec{a}(t) = \dot{\vec{v}}(t) = \ddot{\vec{r}}$$



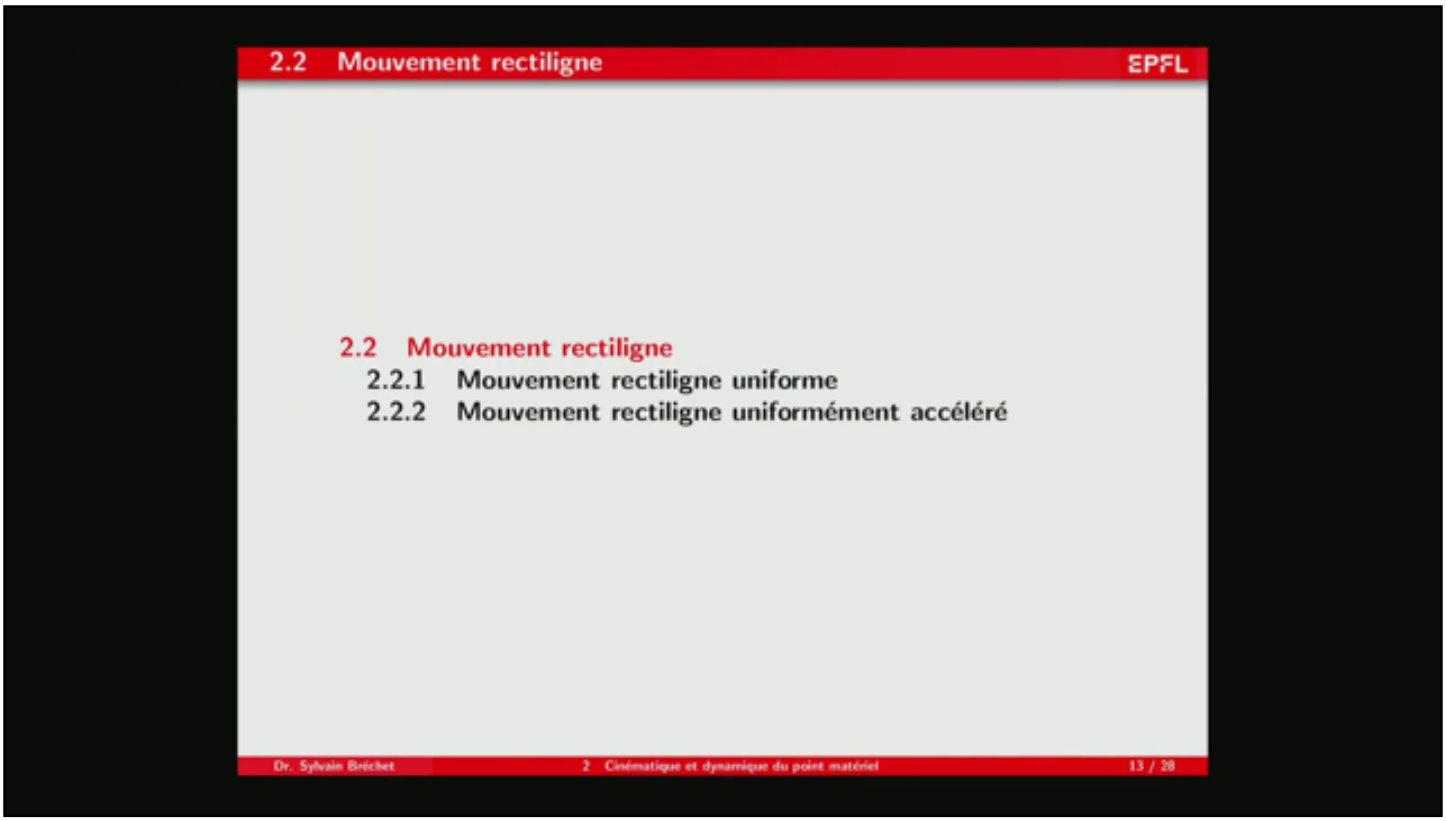
(2.3)

- En général, le vecteur accélération $\boldsymbol{a}(t)$ a une composante tangentielle et une composante normale à la trajectoire orientée vers l'intérieur d'une trajectoire courbe.
- **Unité de l'accélération (SI) :**

Alors, on va refaire l'exercice, donc vous réarmez le fusil, allez-y. Voilà. Et vous allez retirer, d'accord, à trois. Et vous allez bien regarder ce qui apparaît sur l'affichage. Alors, un, deux, trois. Première chose que vous constatez, la vitesse est très grande. C'est 2,283 pieds par seconde. D'accord ? Qu'est-ce que vous avez entendu au niveau phonique ? Un bruit beaucoup plus important parce qu'on est passé à travers le mur du son. On est passé à travers Mac 1, on est même en fait quasiment à Mac 2. Donc, Jolann a tiré comme un expert, on peut l'applaudir. Et on va prendre la pause et on reprendra le cours à A-17 et A-18, puisqu'on s'est arrêté deux à trois minutes après. Voilà, merci de bien vouloir regagner vos places. Comme on dit, jamais 2,03. On a défini le vecteur position, on a défini le vecteur vitesse. On va maintenant définir le vecteur accélération. D'accord ? Ce vecteur accélération, c'est la dérivé temporelle du vecteur vitesse. Tout comme la semaine passée, on avait montré que une composante de l'accélération pour un mouvement rectiligne s'obtenait en prenant la dérivé temporelle de la composante correspondante de la vitesse. C'est vrai pour chacune des composantes. Donc concrètement, le vecteur accélération, qui sera une fonction du temps pour notre point matériel, ce sera la dérivé temporelle du vecteur vitesse. J'ai oublié de mettre une petite flèche, c'est important de la mettre. Et le vecteur vitesse, lui-même, comme on l'a montré, et le vecteur vitesse, lui-même, comme on l'a montré, la dérivé temporelle du vecteur position.

notes

résumé

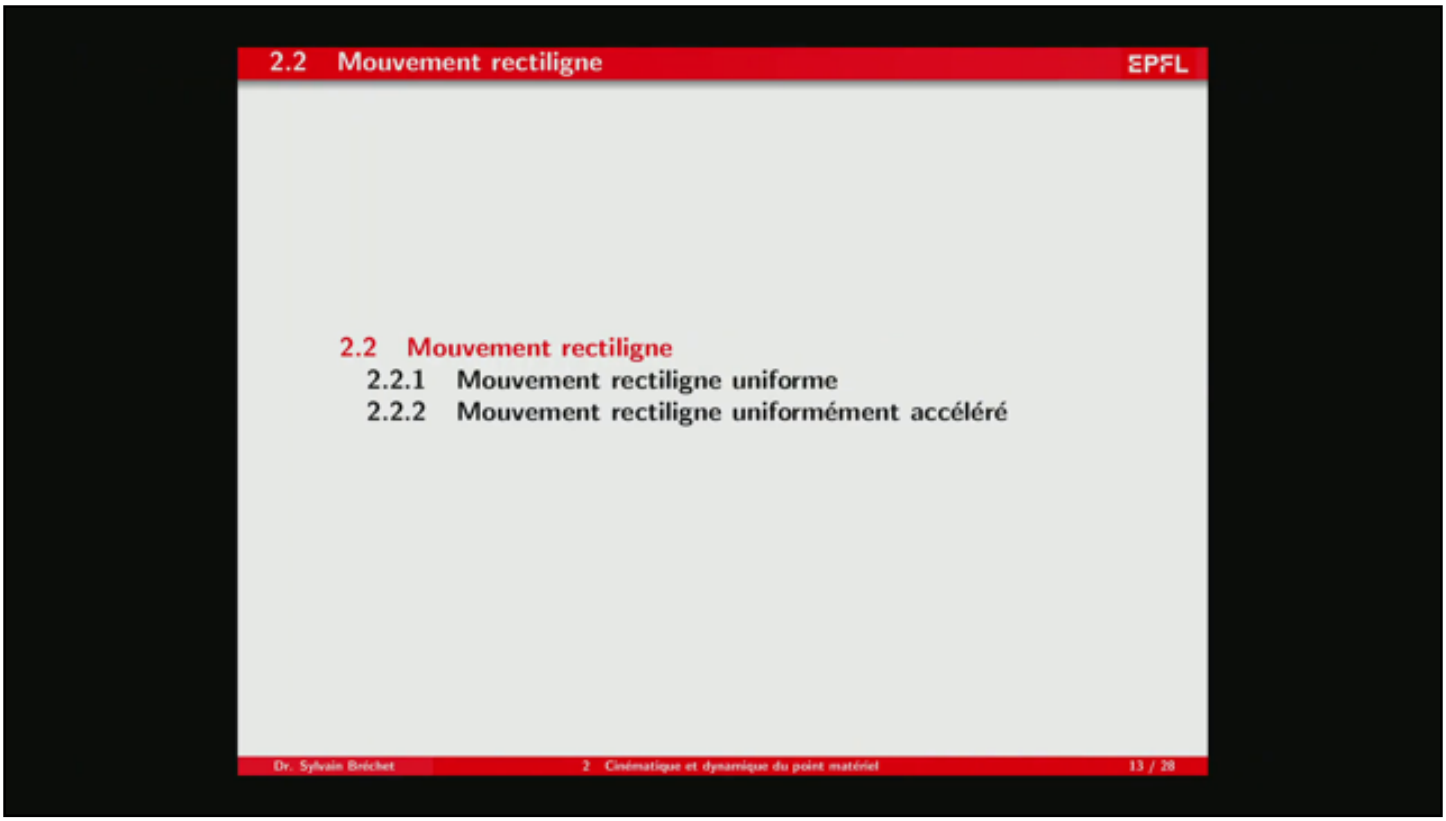


Et donc il faudra dériver deux fois par rapport au temps le vecteur position pour trouver le vecteur accélération. Alors, c'est assez simple à écrire de manière algébrique. On commence pas à écrire le vecteur position. On a la coordonnée d'Apsis, X2t, fois le vecteur unitaire correspondant, plus la coordonnée d'ordonnée, fois le vecteur unitaire correspondant, en termes par la coordonnée verticale, fois le vecteur unitaire. On prend ce vecteur position, on dérive deux fois par rapport au temps, en gardant les vecteurs unitaires fixes, constants. Ils ont une norme unité, ils ont une orientation qui ne change pas, ils sont immobiles. En revanche, le point matériel, lui, se déplace. Donc ces composantes changent, on les dérive deux fois par rapport au temps pour trouver les composantes de l'accélération. Donc algébriquement, c'est tout simple à faire. Maintenant, pour comprendre ce qui se cache derrière en termes de géométrie, on va, comme on l'a fait pour le vecteur vitesse, on va écrire que le vecteur accélération, c'est la dérivée temporelle du vecteur vitesse, on va l'écrire avec une limite, c'est la limite de delta t qui tend vers zéro, du rapport, du vecteur variation de vitesse delta v sur l'intervalle de temps delta t. Et comme on l'a fait tout à l'heure, pour le vecteur position, on va récrire avec une petite mise en forme cette variation de la vitesse, comme étant la vitesse finale évaluée au temps t plus delta t, moins la vitesse initiale évalue au temps t et on divise par delta t. On peut aussi l'écrire à l'aide de l'écriture infinitesimale, en remplaçant les deltas par les dés, la limite devient alors implicite, on aura le rapport du vecteur variation infinitesimale de vitesse dv sur l'intervalle de temps infinitesimale d t, c'est-à-dire tout simplement la dérivée temporelle de la vitesse. Tantons maintenant de comprendre ceci du point de vue géométrique. Si on prend le vecteur vitesse au

notes

résumé

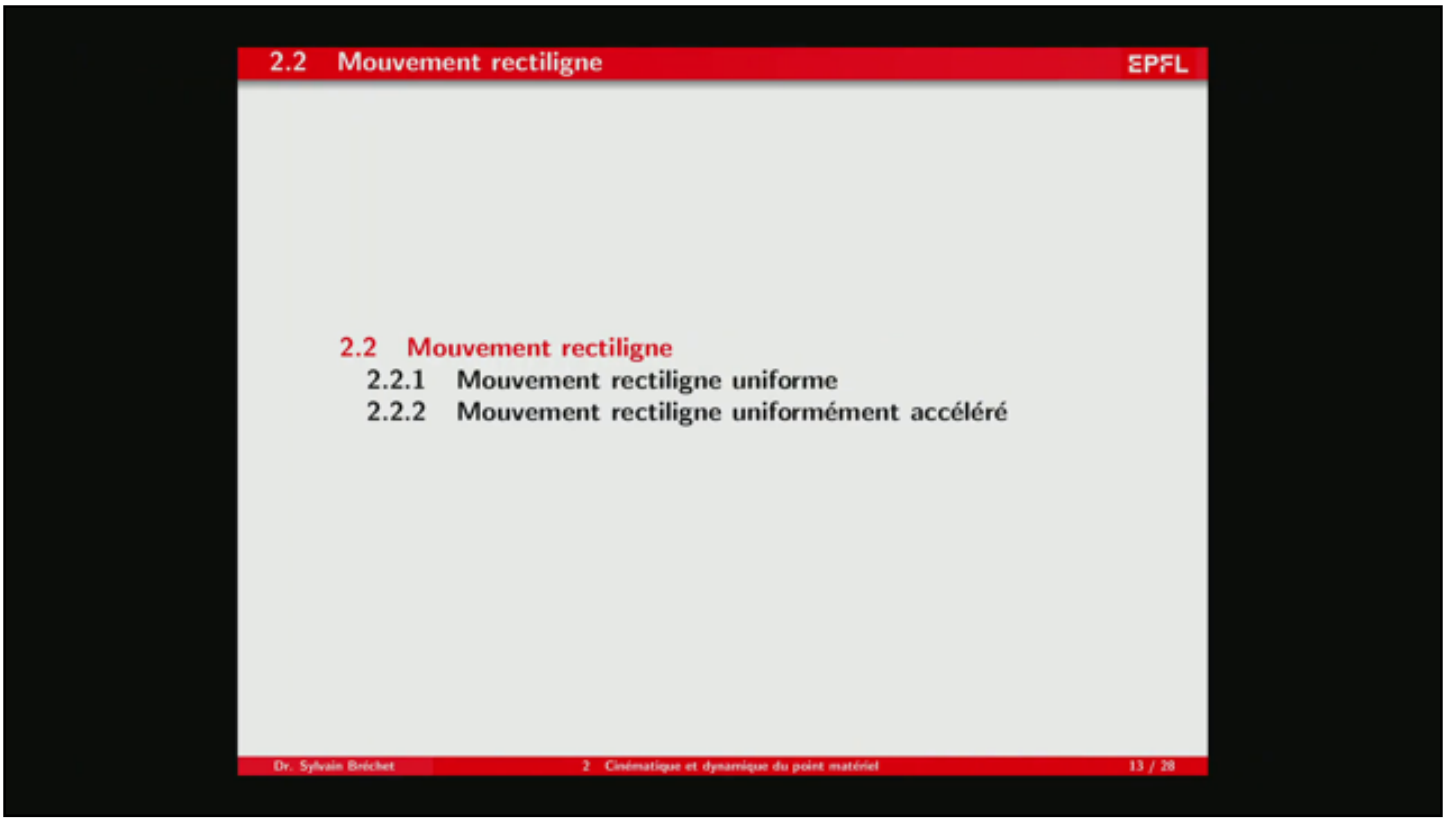
48m 49s



temps t et qu'on ajoute la variation de vitesse entre le temps t et le temps t plus delta t, on va trouver le vecteur vitesse évalué au temps final en t plus delta t. Nous l'ont dit évidemment que la variation du vecteur vitesse delta v évalue au temps t c'est le vecteur vitesse finale évalue en temps t plus delta t, moins le vecteur vitesse initial évalue au temps t. Alors maintenant on peut comprendre géométriquement ce que tout ça signifie. On va prendre une trajectoire donnée ici en noir, la trajectoire gama, et puis prenons de temps. Le temps t et le temps t plus delta t, autant t, l'objet à se limiter à un point matériel se trouve ici. Donc on a son vecteur position correspondant en rouge qui est là, et autant t plus delta t, il se trouve ici, son vecteur position c'est r évalue autant t plus delta t. Et donc on a le vecteur déplacement qui est ici. Mais ce qui va nous intéresser nous maintenant c'est les vecteurs vitesses. Le vecteur vitesses est collinère au vecteur déplacement infinitésimal, c'est la raison pour laquelle on va l'écrire en bleu. On va représenter en bleu les vitesses, en rouge les positions, puis on verra qu'on représentera les accélérations en vert. Donc qu'est ce qu'on sait sur le vecteur vitesses ? Il est enjant à la trajectoire dans le sens du mouvement. Donc par exemple au temps t, on pourrait avoir un vecteur vitesses qui a cette forme. D'accord ? Alors au temps t plus delta t, on aura un vecteur vitesses toujours enjant à la trajectoire qui aura cette forme là. On aimerait comparer ces deux vecteurs et on a ici un tout petit souci, il n'y en est pas vraiment un. D'accord ? C'est que le vecteur vitesses au temps t est issu du point où se trouvent les points matérieaux. Alors

notes

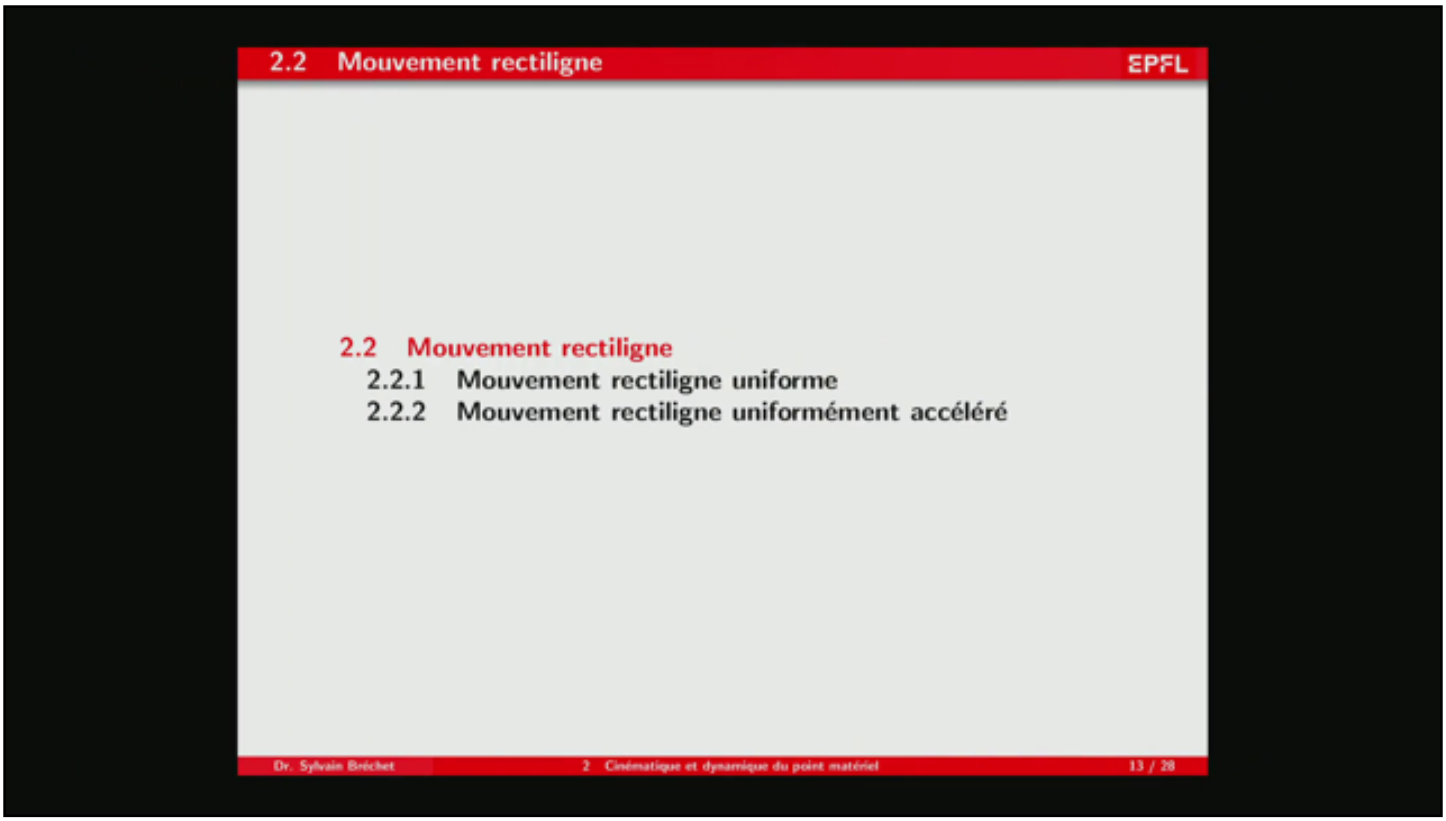
résumé



qu'au temps t plus delta t, il est issu de ce point où se trouve le point matériel. Ça ne sont pas les mêmes points. Comment est-ce qu'on va faire pour comparer ces vecteurs ? Eh bien pour le faire, on doit se souvenir qu'un vecteur est défini par sa norme, sa longueur et son orientation, mais pas par le point dont il est issu. En d'autre termes, si je représente par exemple un vecteur à l'aide de cette flèche, si je translate cette flèche dans l'espace, en gardant la longueur et en gardant l'orientation, donc l'angle par rapport au plan horizontal, d'accord, j'ai le même vecteur. Donc c'est ce qu'on va faire pour le vecteur qui est ici. On va le translater en gardant sa norme et son orientation pour qu'il soit maintenant ici du point où est issu le vecteur vitesses et valuent autant t. Donc vous avez v2t qui est ici, v2t plus delta t qui est là, d'accord ? Maintenant la différence entre les deux, c'est le vecteur que vous voyez ici qui apparaît en verre, ok ? Alors maintenant dans la limite d'un déplacement infinitesimal, d'un intervalle de temps infinitesimal, on va faire tendre ce vecteur en verre vers le vecteur variation infinitesimal de limite dv. Est-ce qu'il va être tangent à la trajectoire ? Ben, pas forcément. Il peut l'être, d'accord ? Mais il peut aussi ne pas être tangent à la trajectoire, il peut aussi même être orthogonal à la trajectoire. On verra tous ces 4 figures, d'accord ? Si vous prenez ce vecteur variation infinitesimal de vitesse que vous le multipliez par un nombre réel positif qui est 1 sur d'été, d'accord ? Vous obtenez un vecteur qui a la même orientation que dv. Ce qui veut dire que l'accélération, qui est la dérivé temporelle de la vitesse, n'est pas nécessairement collinère au mouvement, elle n'est pas nécessairement tangent à la trajectoire,

notes

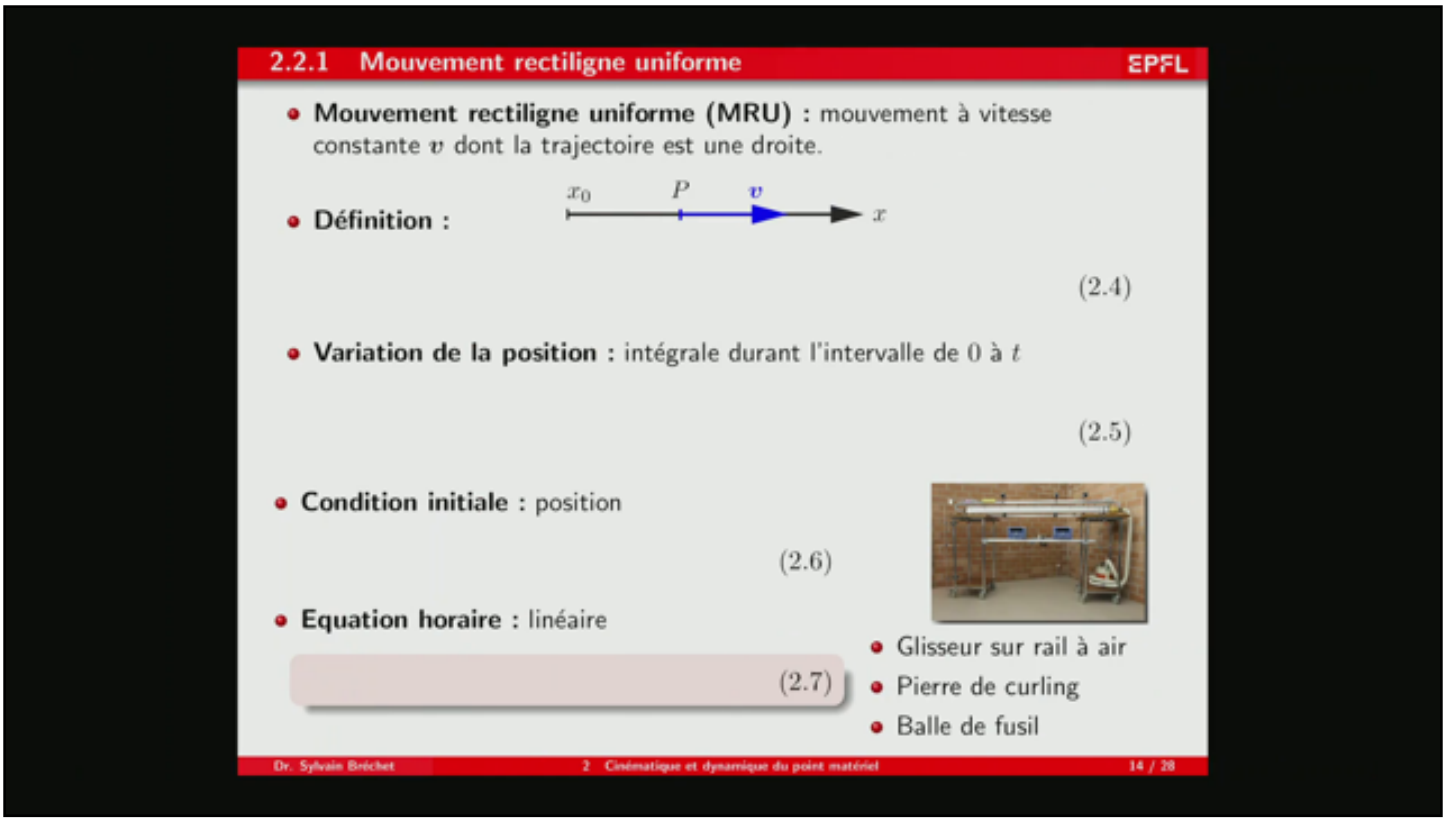
résumé



on peut avoir une composante le long du mouvement, une composante orthogonal. Alors, qu'est-ce que vont décrire ces composantes ? La composante d'accélération, qui est long de la trajectoire, c'est celle qu'on retrouve par exemple dans un mouvement érectiligne. Elle va simplement décrire la variation de la vitesse dans une direction qui est tangent à la trajectoire. En revanche, si vous avez une accélération qui a une composante qui est normale, orthogonal à la trajectoire, elle va décrire une variation du vecteur vitesse orthogonalment à la trajectoire, comme le vecteur vitesse est tangent à la trajectoire, c'est ce qui va permettre d'incurver une trajectoire, d'accord ? Si vous avez une courbe et non pas une droite comme trajectoire, automatiquement vous avez une composante de l'accélération qui est orthogonal à la trajectoire pour décrire cette courbe. Alors, la cause de la courbe, c'est pas l'accélération. L'accélération décrit la courbe. La cause de la courbe, ce sera la force. D'accord ? C'est de force. La force résultante qui donne lieu à cette trajectoire particulière dont on va parler dans la troisième section de ce cours. D'accord ? En plus, la composante d'accélération qui est orthogonal à la trajectoire, elle sera toujours orientée vers l'intérieur de la trajectoire. En d'autres termes, si on prend un point qui est ici, vous n'aurez jamais de composante d'accélération qui est orientée comme ceci vers l'extérieur, vous aurez une composante normale qui est orientée comme cela. Et une autre qui est enjanciel. D'accord ? Voilà, c'est tout pour la définition de ces grandeurs cinématiques. On va maintenant s'intéresser à deux types de mouvements rectilignes.

notes

résumé

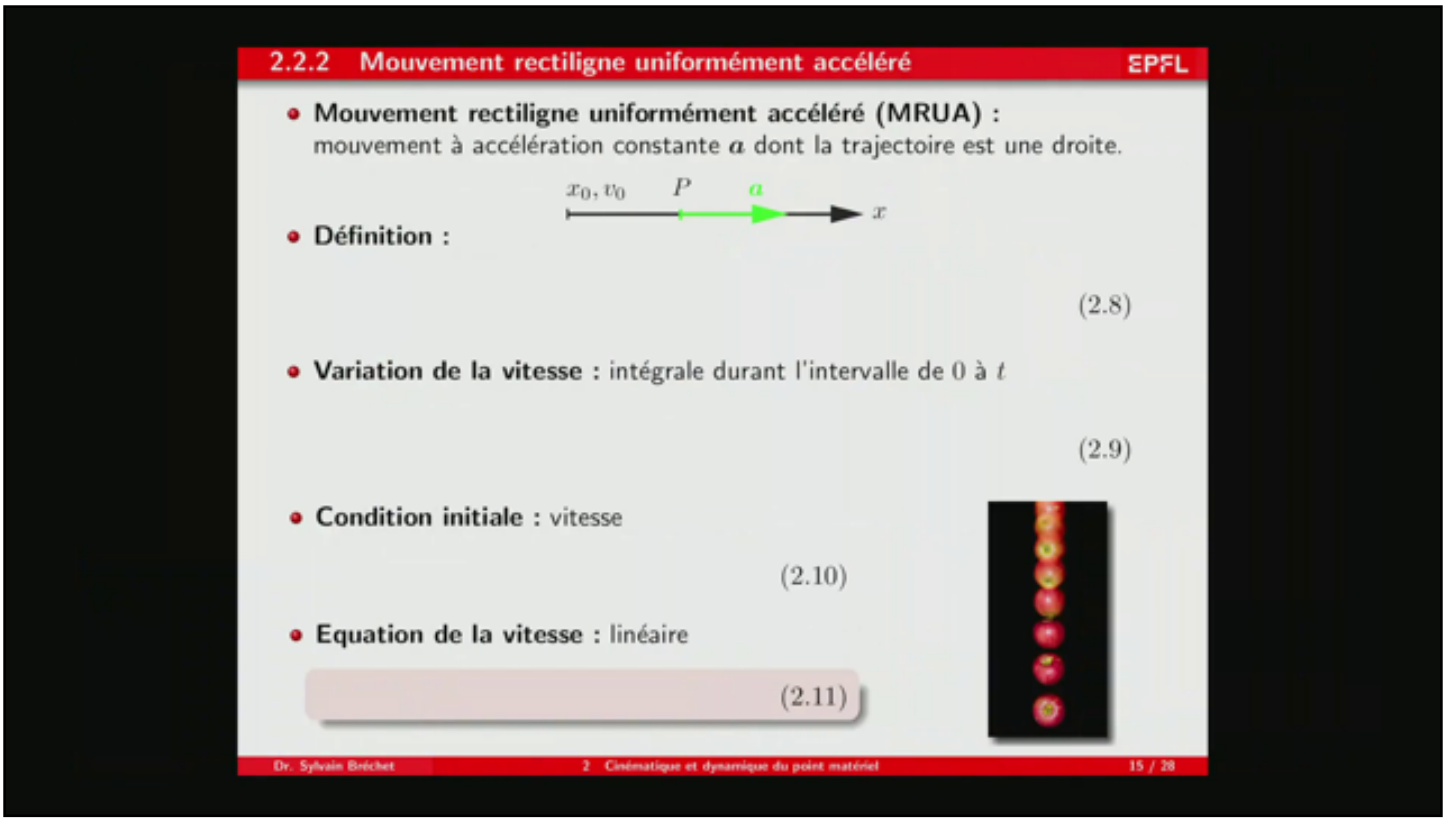


Un mouvement rectilignes en ligne droite qui est un mouvement uniforme, un emmerru, d'accord ? On parle souvent de son acronyme. C'est un mouvement en ligne droite qui se fait en thèse constante. Le mouvement naturel en réalité d'un corps qui a d'abord été étudié par Galilé. Et puis également un mouvement de chute libre. Si je prends cette bouteille, je la fais tomber comme je l'ai fait tout à l'heure pour la craie, eh bien ça donnera un mouvement rectilignes uniformément accéléré. L'accélération ça sera quoi ? C'est j'ai exactement, c'est le champ gravitationnel terrestre, d'accord ? Ok, très bien. Donc on va s'intéresser à ces deux mouvements. On va les prendre en ligne droite horizontale et on va prendre en général, bien sûr que pour le mouvement de chute libre, il faudrait prendre un mouvement vertical avec une accélération constante qui serait celle du champ gravitationnel terrestre, comme on va le comprendre tout à la fin de ce cours.

notes

résumé

56m 0s

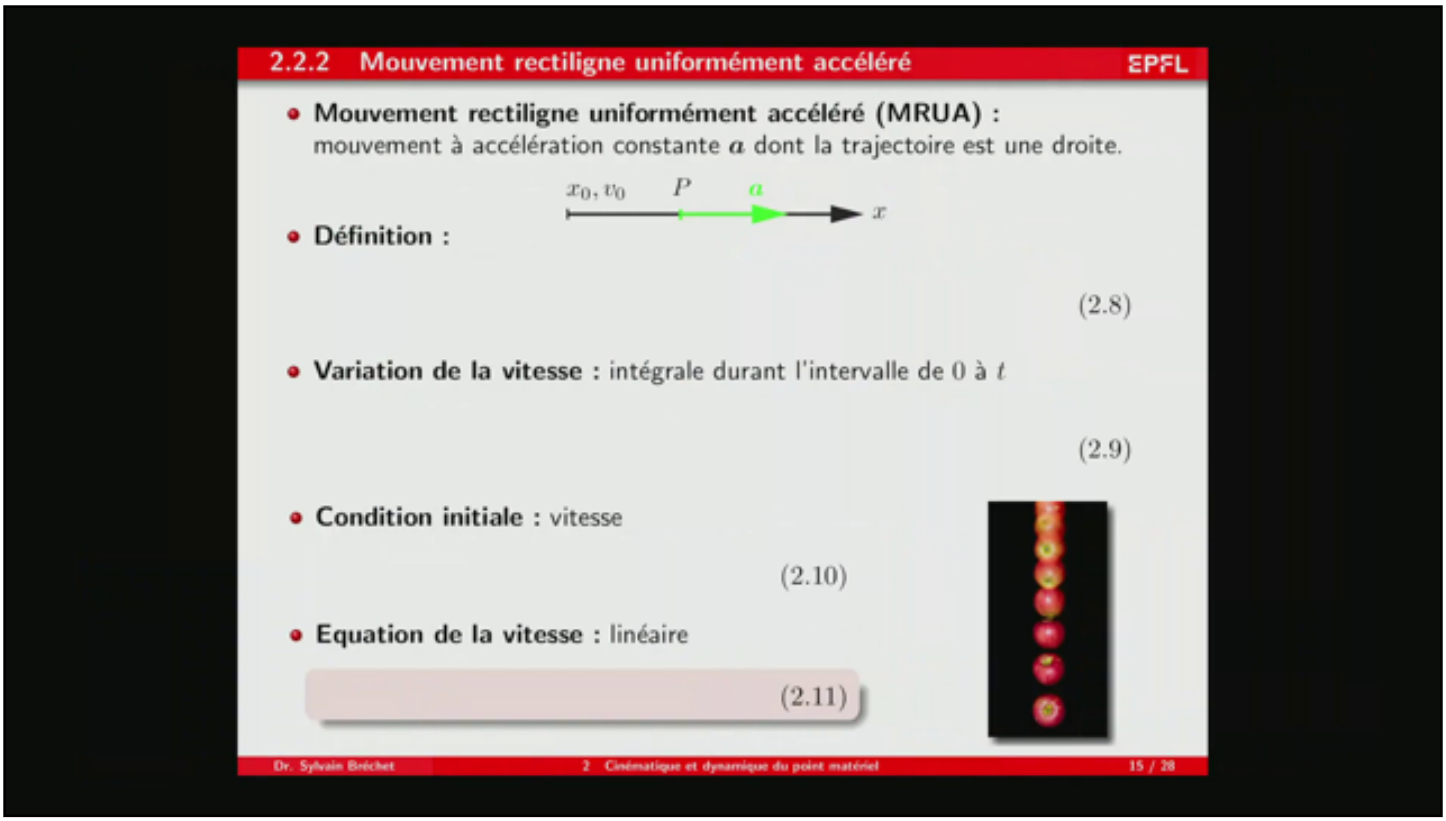


Bien, alors commençons par le mouvement rectilignes uniformes. Donc si vous avez un mouvement qui se fait à vitesse constante, si le vecteur vitesse qui est tangent à la trajectoire est constant, ça veut dire que sa norme est constante qui plus est son orientation aussi. Donc comme il est tangent à la trajectoire, que la vitesse a une orientation constante, la trajectoire ne peut pas être autre chose qu'une droite. Donc c'est forcément un mouvement rectilignes, d'accord ? Mais c'est plus que ça. C'est un mouvement rectilignes pour lequel l'objet se déplace avec la même vitesse. Donc ce qu'on va voir ensemble, intuitivement on le comprend, la corne de position va varier continuement et uniformément au cours du temps, c'est-à-dire qu'on va avoir une corne de position qui est une fonction linéaire du temps, d'accord ? Pourquoi ? Parce qu'on part d'une dérivée première de la position, on a une constante si vous intégrer une constante une fois par rapport au temps, vous obtenez une fonction linéaire du temps, par définition. Ok ? Ça c'est pour les maths. Maintenant voyons qu'effectivement ça donne ça. Donc partons de la définition, on a notre point matériel P qui se déplace à vitesse constante le long de l'axe X, d'accord ? Vers la droite dans le sens croissant de l'axe X et on suppose qu'au temps initial le point matériel se trouve en X0, c'est-à-dire que la coordonnée d'Apsis X évalué au temps T égale 0 nous donne X0. Par définition, comme on a un mouvement rectiligne on va s'intéresser uniquement aux coordonnées et donc la corne de vitesse la vitesse selon l'axe X c'est évidemment la dérivée temporelle de la coordonnée X, c'est-à-dire que c'est le rapport du déplacement infinitésimal d'X sur l'intervalle de temps infinitésimal d'été et ceci est une constante. Donc maintenant, comme cet algébrique, on a bien sûr le droit d'un multiplier par le dénominateur à gauche et

notes

résumé

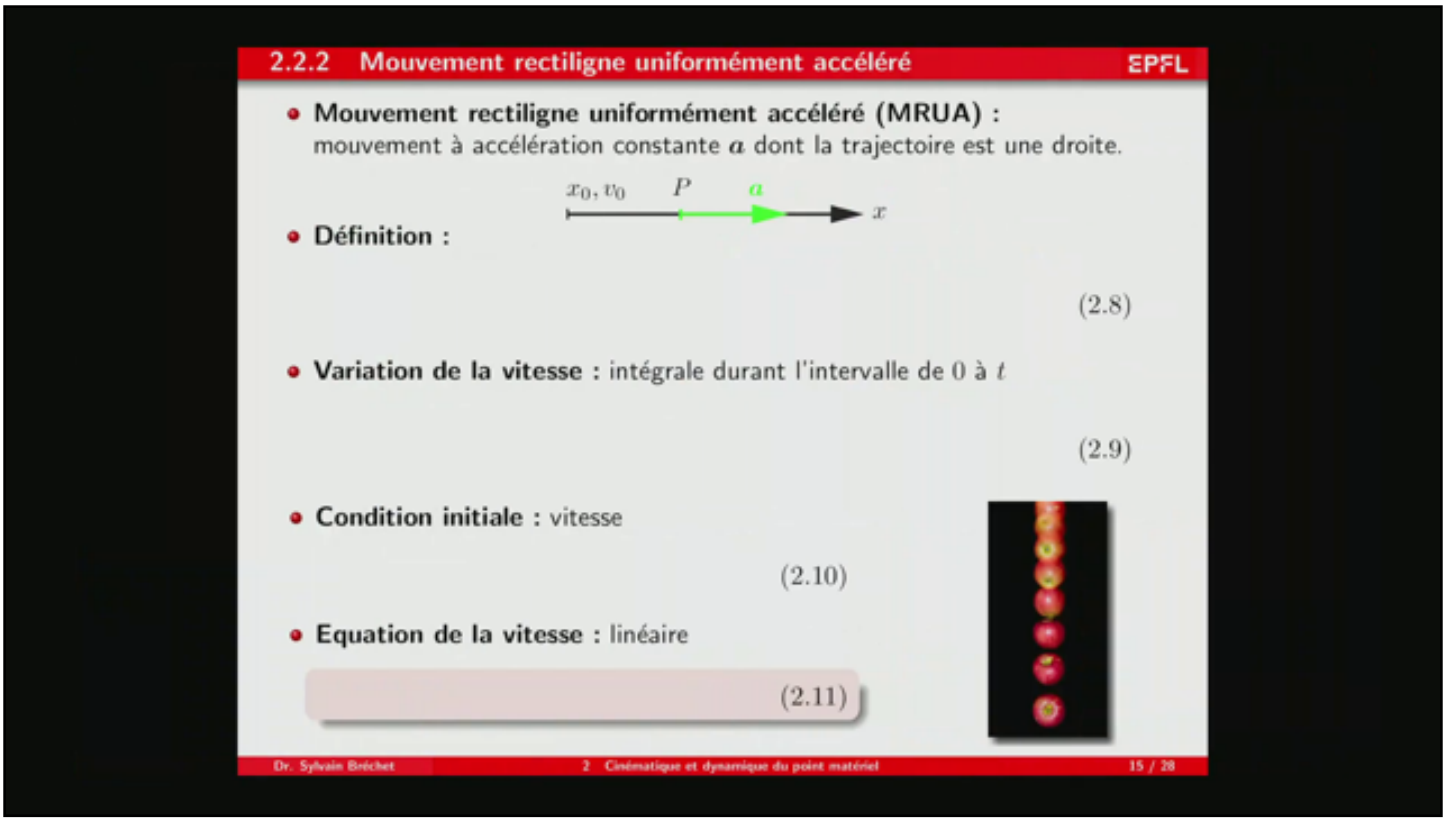
56m 50s



à droite et d'écrire alors que d'X qui peut être une fonction du temps est le produit de la vitesse fois l'intervalle de temps infinitésimal d'été, d'accord ? Bon, comment trouver le déplacement comment trouver la coordonnée X comme fonction du temps en semenant tous les déplacements infinitésimaux d'accord ? Donc on va regarder la variation de la coordonnée de position en cours du temps en partant du temps initial 0 et en intégrant jusqu'au temps T donc la variation de la coordonnée X c'est la coordonnée X évaluée au temps final en T moins la coordonnée X évaluée au temps initial en 0. Comment est-ce qu'on va la trouver ? Eh bien en semenant tous les déplacements infinitésimaux d'X, d'accord ? de 0 à T. Cette somme c'est une somme continue une somme continue c'est bien sûr une intégrale. On va donc intégrer d'X de T d'accord ? Et attention comme ici ça sera X la variable on va l'évaluer au temps T égal à 0 ça c'est pour la borne inférieure d'accord ? Et au temps T attention, pour éviter d'avoir une tautologie et d'avoir la fonction de variable X et T qui soit la même dans la borne et dans l'intégrant on rajoute des primes je rappelle comme la semaine passée que ces primes ne sont pas déderivées c'est juste, ils fonctionnent une variable différente pour éviter la tautologie, d'accord ? Maintenant on va utiliser la relation qu'on vient d'établir de 4 pour remplacer des X de T prime par V fois des T prime, d'accord ? Donc on aura d'intégrale, de V des T prime là, on intègre explicitement par rapport à la variable T d'accord ? 2 T égal 0 si vous voulez 2 T prime égal 0 à T prime égal T d'accord ? La vitesse est une constante qu'on peut sortir de l'intégral c'est-à-dire que la vitesse multiplie chaque interval de temps de

notes

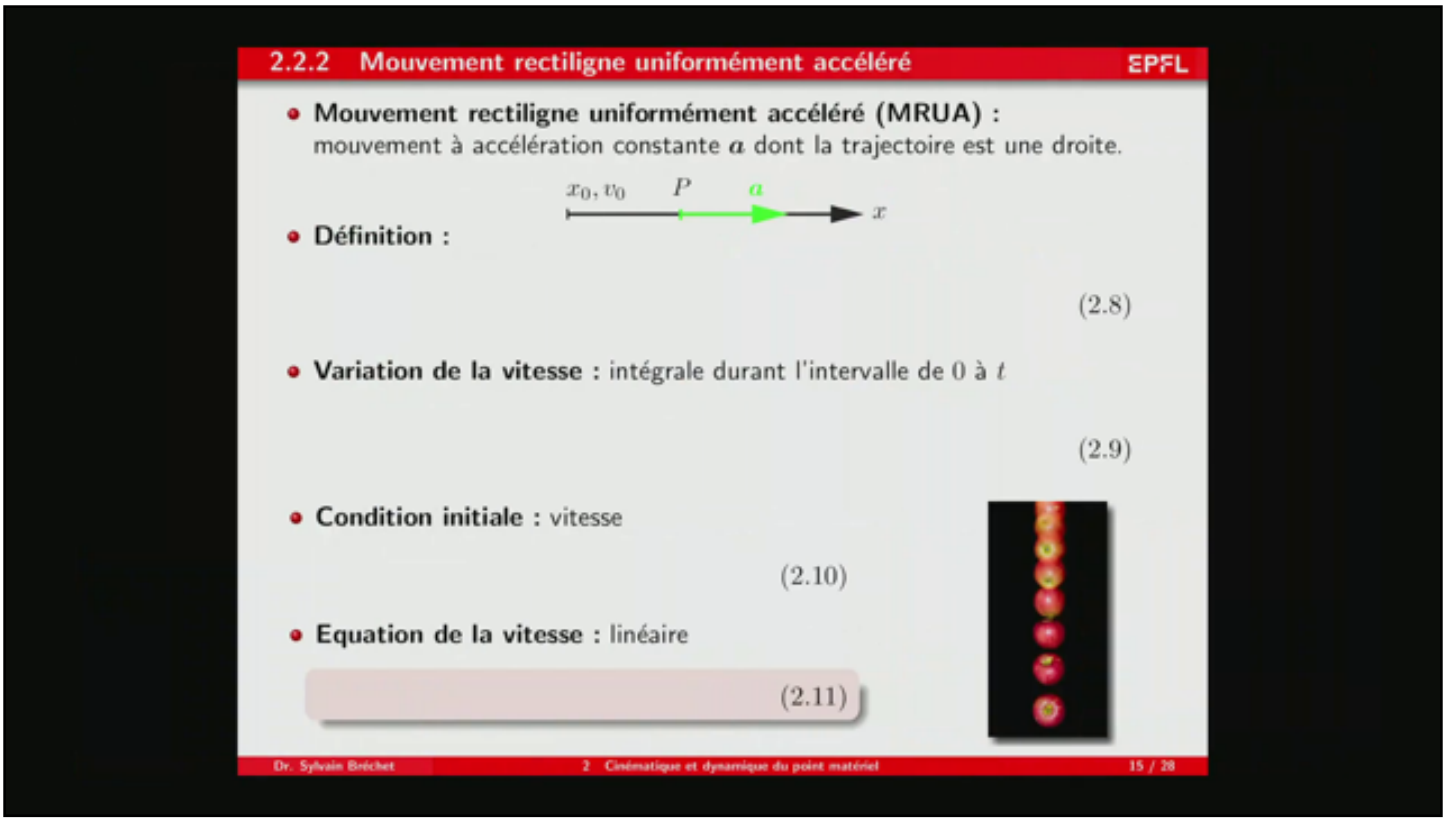
résumé



manière uniforme c'est pour ça qu'on peut la sortir de l'intégral on intègre de 0 à T d'été prime ça donne bien sûr T, on trouve VT donc maintenant on peut en tirer à l'aide de cette égalité là on peut en tirer X de T mais avant de faire on a besoin encore d'une condition initiale X évalue en 0 c'est par définition la valeur X0 ok ? Donc on trouve finalement que X évalue en T c'est V foité plus X0 ok ? Alors qu'est-ce qu'on peut citer comme exemple d'un mouvement rectilie uniforme eh bien Geolan pourra nous dire qu'un exemple c'est la balle de fusil d'accord ? Effectivement vous l'avez tous vu, la balle se déplace à vitesse constante si on peut négliger les frottements et l'impact du poids, du rend intérval de temps limité d'accord ? Donc son déplacement sa coordonnée de position, son équation horaire est une fonction linéaire du temps. Un autre exemple que j'aimerais vous montrer c'est ce petit puck qui a une forme de ballon de foot je vais enclencher le petit dispositif qui permet de le faire déplacer sur un petit coup cinder d'accord ? Et ainsi on va essentiellement réduire au minimum les frottements et sur un intérval de temps suffisamment court eh bien on aura un mouvement qui se fait à vitesse constante regardez d'accord ? La balle se déplace ah le ballon se déplace ce puck se déplace à vitesse constante d'accord ? C'est ce qui se passe lorsque vous jouez au curling si vous jouez au curling d'accord ? Quand il y a une équipe d'athlètes qui jouent au curling ou au juin olympique ou ailleurs d'accord ? Il y a celui qui pousse la pierre de curling sur une pâtie noire qui dit pâtie noire veut dire que les frottements sont faibles pour réduire encore les frottements vous avez les coéquipiers qui agitent frénétiquement leur

notes

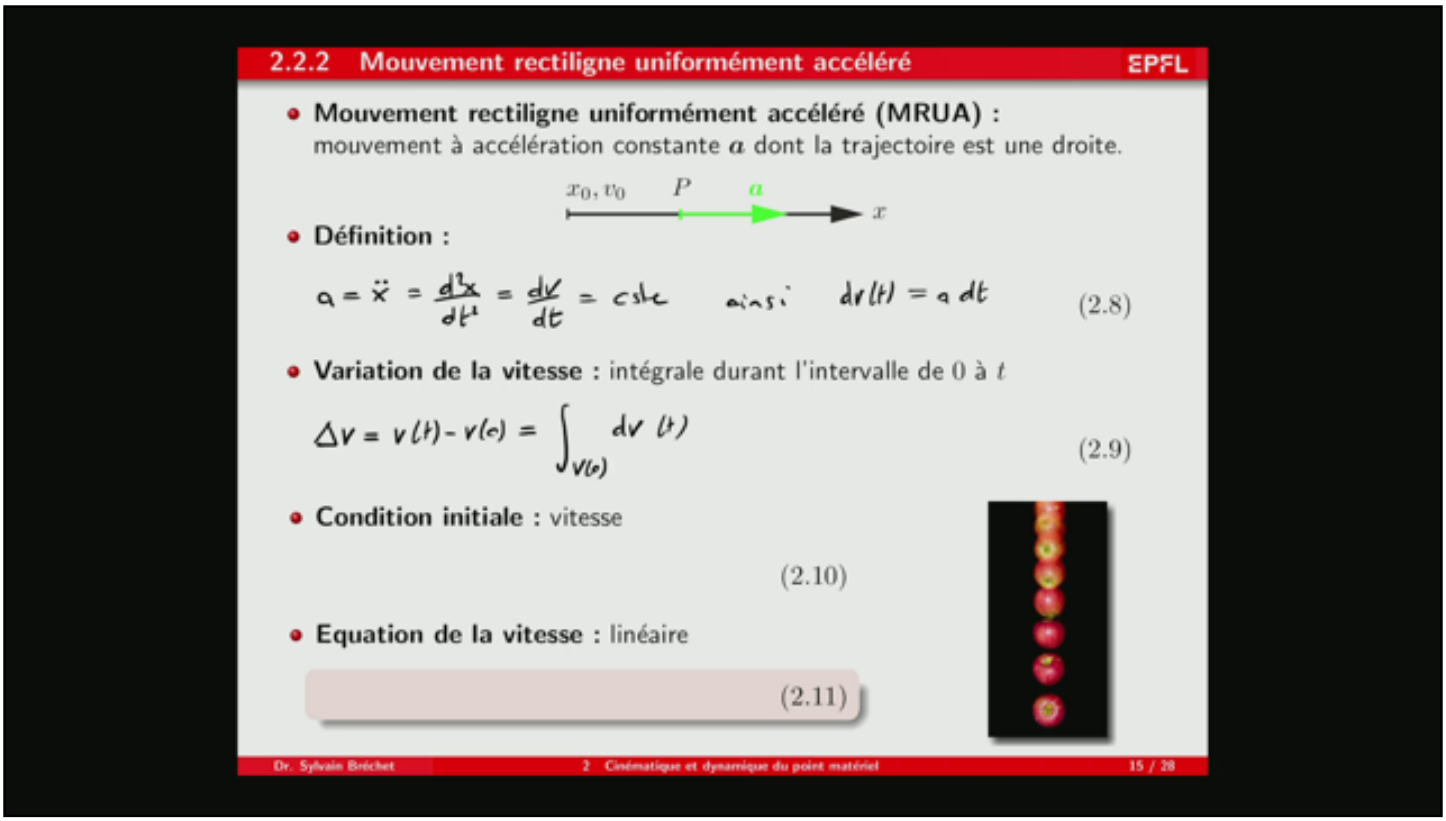
résumé



balais devant le passage de la pierre de curling et la pierre continue avec un mouvement qui se fait quasiment à vitesse constante pour qu'ensuite elle s'arrête et s'arrête de balayer et ils arrivent à amener la balle là où ils veulent d'accord ? Donc ça c'est un autre exemple alors pour le mouvement rectil uniforme on est parti d'une dérivé temporelle de la position qui est la vitesse d'accord ? Qui est constante on a intégré une fois par rapport au temps on a donc besoin d'une condition initiale pour déterminer le mouvement qui est un mouvement qui se fait selon une équation horaire qui a l'inert. La situation est un tout petit peu

notes

résumé

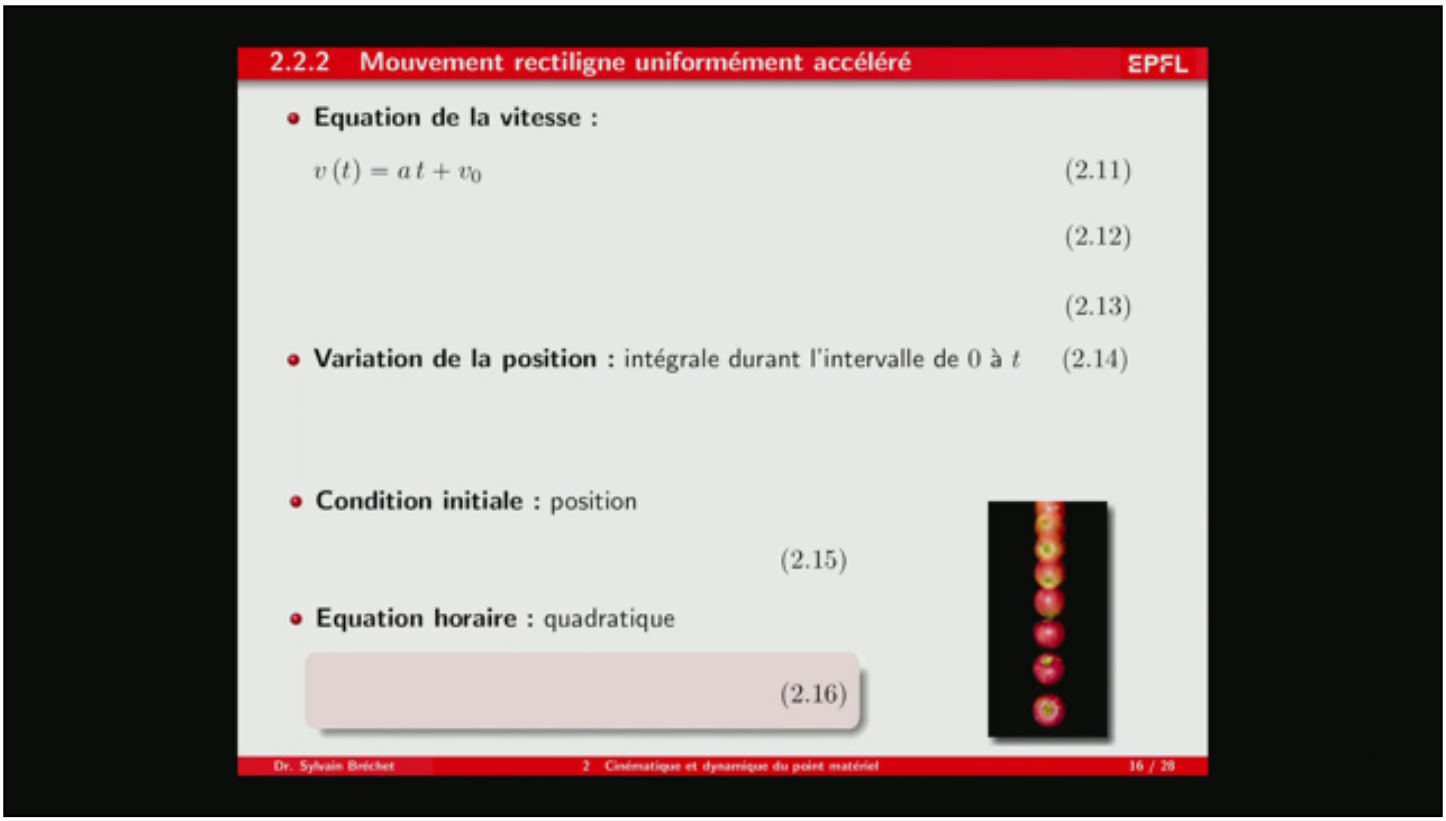


plus compliquée lorsqu'on a un mouvement rectiligne uniformément accéléré d'accord ? C'est l'accélération qui sera constante notre objet est assimilé un point matérial P qui se déplace selon l'AxEx d'accord ? Il faudra qu'on spécifie deux conditions initiales puisqu'on a une dérivé seconde de la position qui est constante qui est l'accélération on va intégrer deux fois successivement par rapport au temps on aura besoin d'abord de la vitesse initiale puis ensuite de la coordonnée de position initiale qui sont respectivement V0 et X0 d'accord ? donc partons de la définition un mouvement rectiligne uniformément accéléré d'un mouvement dont l'accélération est constante donc l'accélération A c'est la dérivé seconde de la coordonnée de position c'est Dx sur Dt² oui mais c'est aussi la dérivé première de la vitesse c'est Dv sur Dt c'est une constante et donc en multipliant par Dt on en compte plus que la variation infinitesimale de la vitesse autentée c'est l'accélération A il faut un intervalle de temps infinitesimale d'été d'accord ? bon comment l'on a fait pour la coordonnée ? on va maintenant le faire pour la coordonnée de vitesse on va calculer la variation de la vitesse durant un intervalle de temps qui va être 0 à T on va écrire la variation de la vitesse qui est la vitesse autent finale autentée, moins la vitesse initiale autentée égale 0 pour trouver cette variation de vitesse on va pouvoir sommer les variations infinitesimales de vitesse dv on a une somme continue dv dv dv on va le sommer d'une borne initiale qui est la vitesse évaluée

notes

résumé

63m 18s



à une borne supérieure de la vitesse évaluée autentée on rajoute des primes pour distinguer la fonction et la variable dans l'intégrant qui va être différent de celle dans les bords d'intégration pour éviter une tautologie on utilise maintenant l'équation de 8 dv prime de t prime par A x t prime on a l'intégral de A x t prime on intègre donc de t prime égal 0 à t prime égal t A est constant, on peut le sortir de l'intégral on aura donc l'accélération de dp t prime de 0 à T ce qui nous donne sans surprise à T alors maintenant la vitesse évaluée t égal 0 c'est v0 maintenant on reprend l'équation qui est ici on en extrait la vitesse autentée qui est A t plus v évaluée autentée égal 0 qui est après la condition initiale et v0 donc là vous voyez que pour un mouvement rectiline uniformément accéléré c'est pas le graphe de la position l'équation horaire qui est linéaire non c'est le graphe de la vitesse l'équation de la vitesse qui est linéaire donc la vitesse croit linéairement au cours du temps ce qu'on pourrait faire pour le montrer vous pourriez le faire graphiquement à l'aide de l'image qui est ici vous avez un objet en chute libre qui est la pomme qui rappelle évidemment l'histoire d'amour de Newton avec la physique et si vous éclairer cette pomme avec un stroboscope à intervalle régulier vous pouvez voir et identifier à intervalle régulier le centre de masse de la pomme ok si maintenant vous mesurez les distances successives qui sont parcourues vous les divisez par des intervalles de temps constant vous allez trouver les différentes vitesses et vous allez voir que cette vitesse en fait va croître linéairement au cours du temps dû à l'accélération constante générée par le champ gravitationnel terrestre qui vaut évidemment g donc pour A égalgé vous retrouvez exactement cette

notes

résumé

65m 13s

2.2.2 Mouvement rectiligne uniformément accéléré

EPFL

- **Equation de la vitesse :**

$$v(t) = a\,t + v_0 \tag{2.11}$$

(2.12)

(2.13)

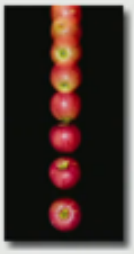
- **Variation de la position :** intégrale durant l'intervalle de 0 à t (2.14)

- **Condition initiale :** position

(2.15)

- **Equation horaire :** quadratique

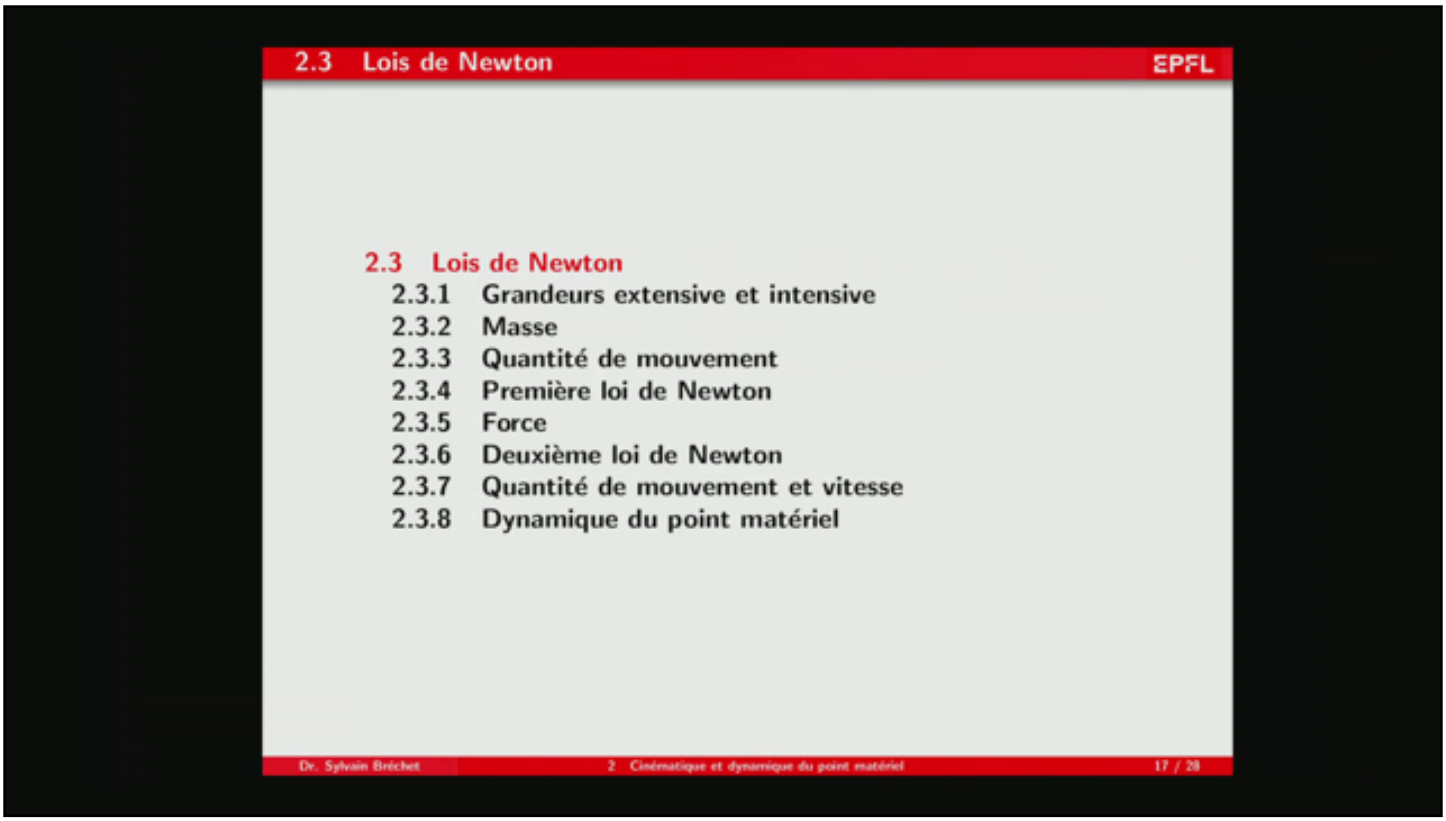
(2.16)



structure pour la vitesse de la pomme en chute libre d'accord ça c'est bien joli on aurait pu le deviner assez facilement ce qui est plus compliqué à faire mais intéressant c'est maintenant d'obtenir l'équation horaire pour un mouvement rectil uniformément accéléré à comment faire il y a une solution c'est d'écrire la vitesse comme la dérivée temporelle de la position donc

notes

résumé

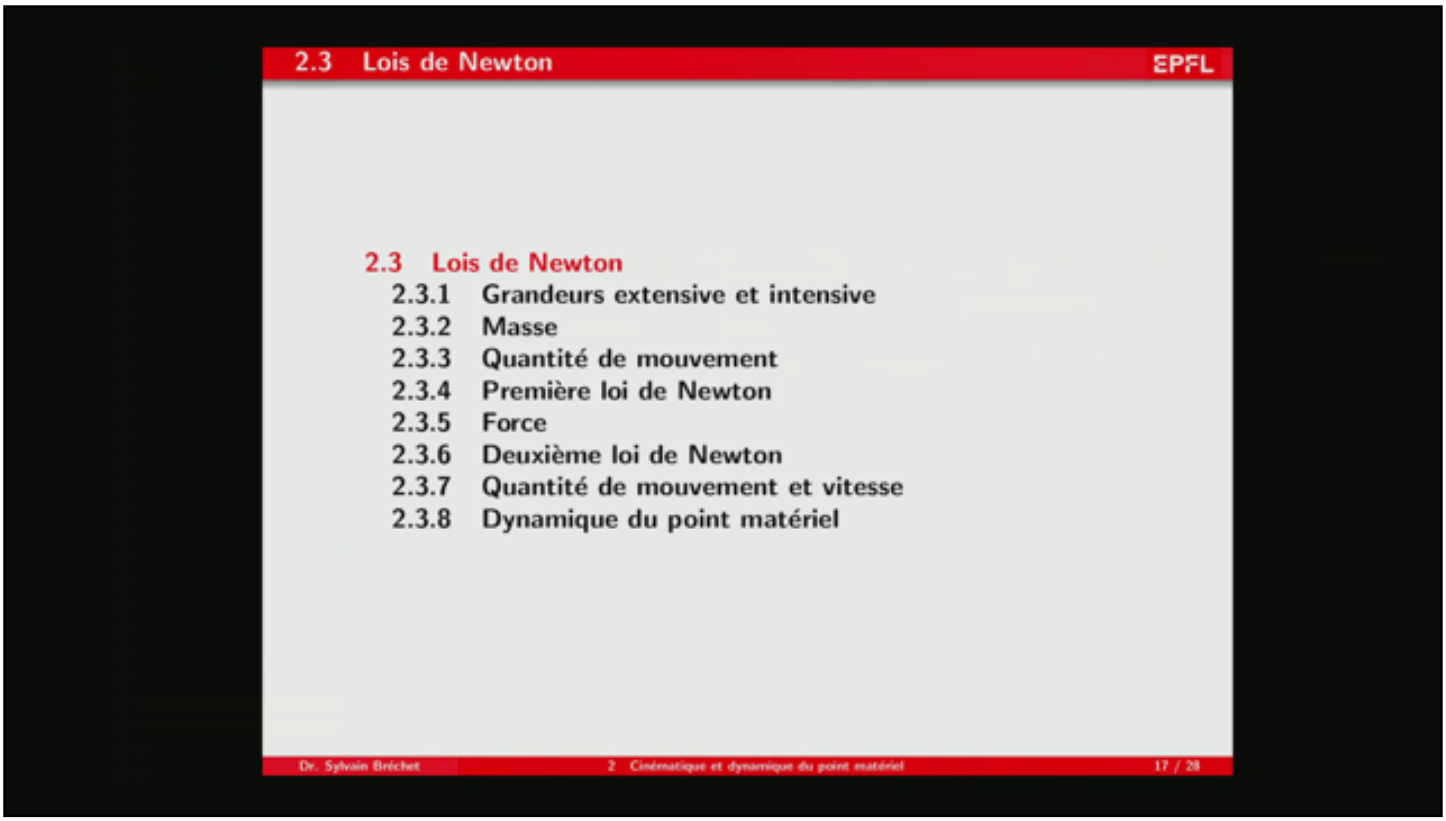


on part de l'équation de la vitesse dans le membre de gauche on va remplacer v par dx sur dt donc ce sera at plus v0 c'est un gébric on a le droit de multiplier par dt pour sortir quoi un dx un dx qu'on va exploiter dans le calcul de l'intégral donc dx qui est la fonction du temps sera égale à at dt plus v0 attendez voir il faut à dt donc ce que j'ai fait pour passer de l'équation de 12 à la dt c'est simplement de multiplier par dt à gauche et à droite puis pour passer de 211 à 212 on a utilisé la définition de la vitesse comme dérivée temporelle de la position bon maintenant on écrit comment on l'avait fait pour le mouvement rectil uniforme que la variation de la coordonnée de position c'est la coordonnée de position finale, authentée moi la coordonnée de position initiale, authentée, égale d'accord ce déplacement c'est la somme des déplacements infinitesum ou la somme continue qui est une intégrale c'est dx prime de t prime qu'on va intégrer de x2,0 à x2,t maintenant que ça se course un petit peu on va utiliser l'équation de 13 et on va remplacer dx prime par at prime dt prime plus v0 dt prime par l'inéarité de l'opération d'intégration d'une somme et la somme des intégrales l'intégrale est la différence des intégrales ici on a une somme d'accord qui plus aime dans cette somme on a des termes pour lesquels on a des constantes soit a et v0 donc a et v0 on va pouvoir les sortir des intégrales et donc on va se retrouver avec a qui multiplie l'intégrale de t prime dt prime plus v0 qui multiplie l'intégrale de dt prime et donc on va se retrouver avec une d'initiale 0 autant t alors la primitive de t prime l'une des primitives qu'elle sera la primitive de t

notes

résumé

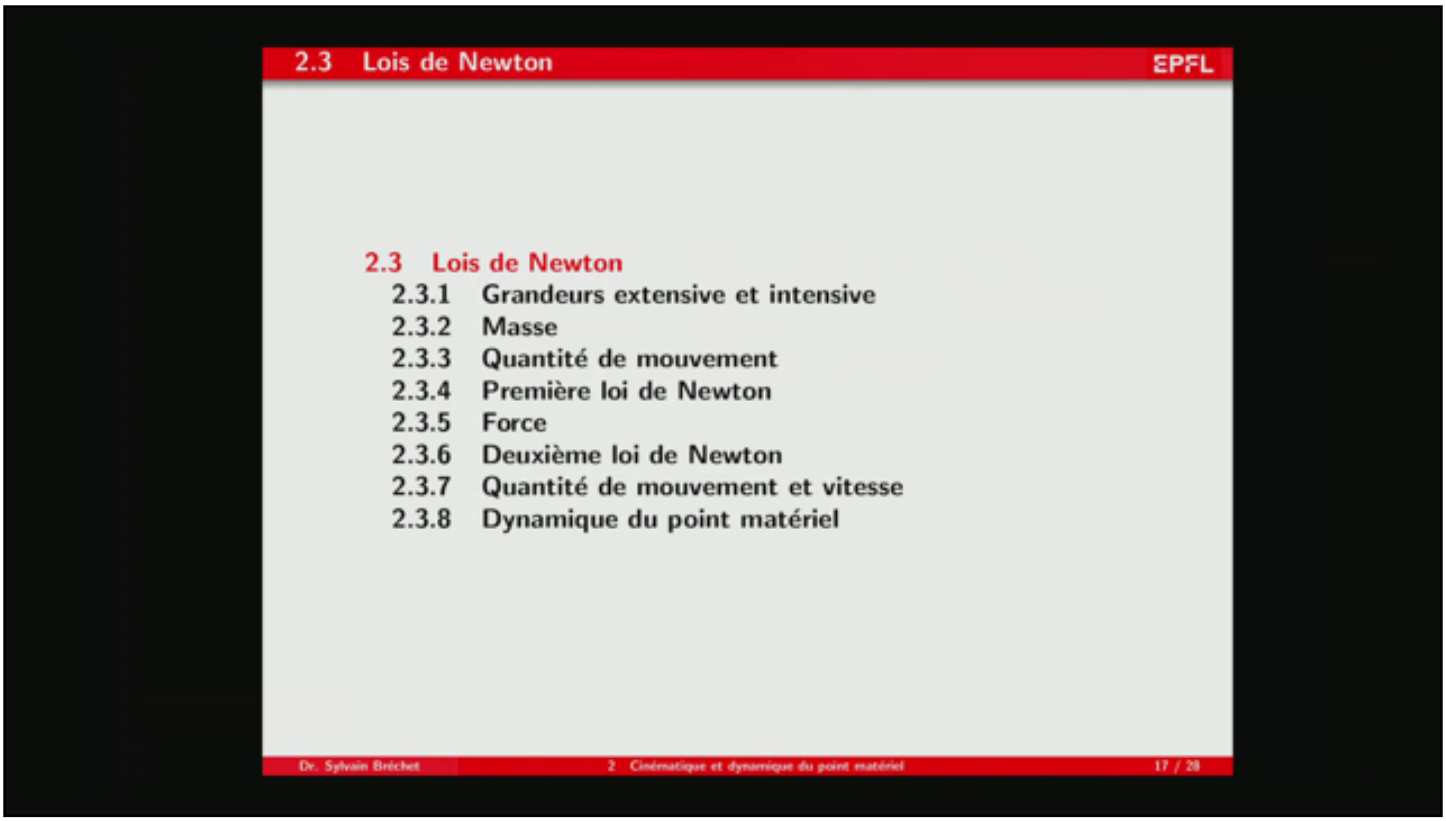
67m 48s



prime une demi exactement de t prime au carré d'accord la primitive de 1 c'est évidemment t prime donc on va se retrouver avec d'a quand on évalue au borne plus v0 fois t alors maintenant si il me reste un tout petit peu de temps à la fin du cours je vous raconterai une petite anecdote entre des profs d'analyse à ce sujet bref on a besoin maintenant d'une condition initiale sur la cornéposition si on évalue cette cornéposition c'est à dire que l'équation horaire pour un mouvement uniformément accéléré est une équation quadratique en termes du temps parce que on a une équation de 1,5 d'un point de vue de 1,5 d'un point de vue de 1,5 d'un point de vue de 1,5 d'un point de vue de 1,5 d'un point de vue de 1,5 d'un point de vue de 1,5 quadratique parce qu'on intégrerait 2 fois un terme constant qui était l'accélération alors ceci vous pouvez le voir tout de suite avec le mouvement de chute type de la pomme si vous prenez le point de départ et que vous repérez les coordonnées successives de position au cours du temps et bien vous allez voir qu'elle se trouve sur une parabole une parabole qui est décrite par un paramètre qui est l'accélération vous allez voir que ce paramètre d'accélération va correspondre à celle du champ gravitationnel terrestre soit AG il y a une chose que j'ai oublié de dire tout à l'heure c'est que l'accélération on peut la mesurer avec un accéléromètre alors là on a bricolé un petit accéléromètre avec un disons matériaux, alors ici c'est une balle de ping-pong et le matériau soit plus léger que le liquide dans lequel il se trouve donc là il faut prendre du liège par exemple un bouchon de bouteilles et puis vous prenez un fil vous attachez votre objet vous le fixez au bas et ce qui est

notes

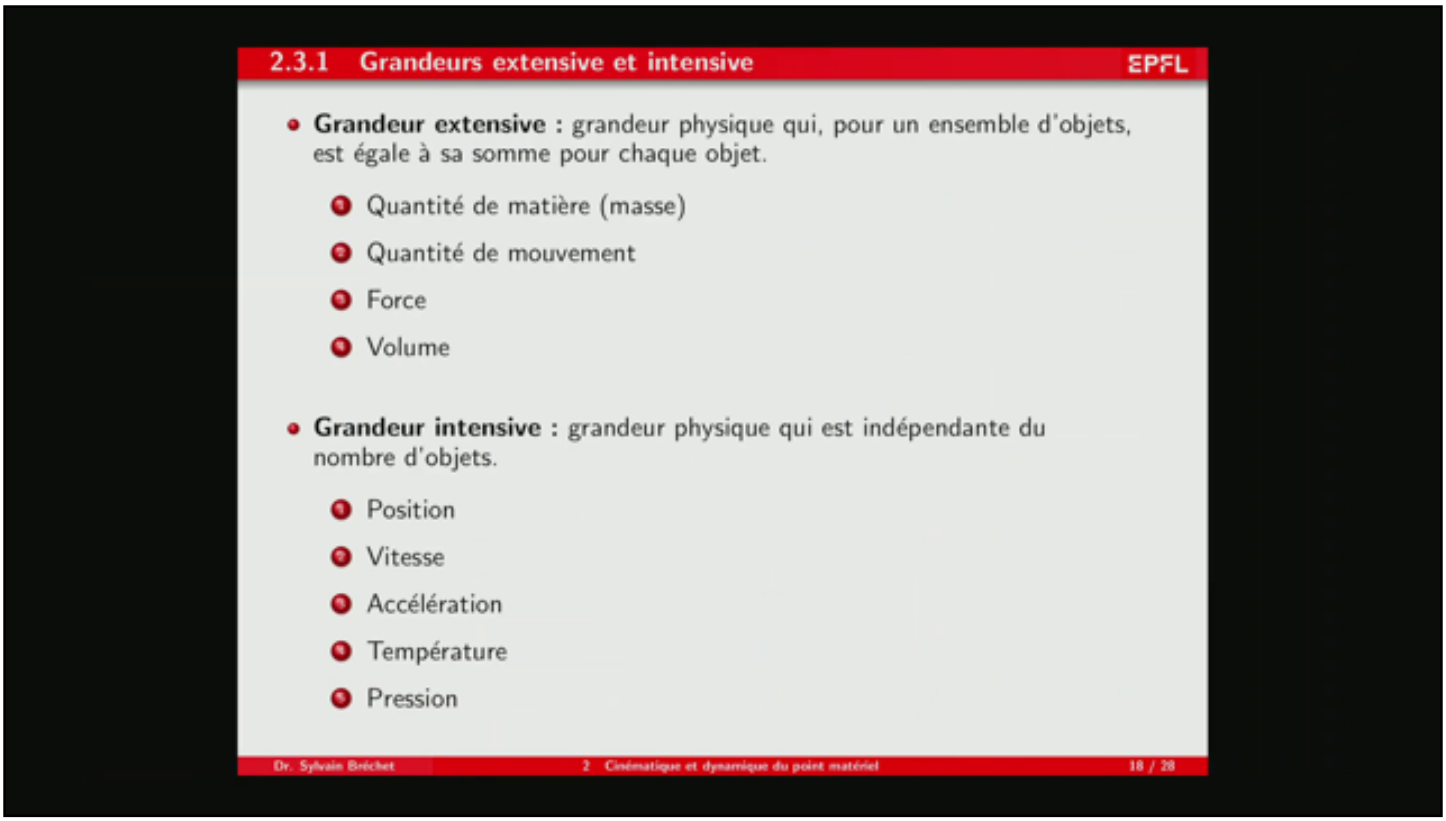
résumé



intéressant c'est que si maintenant j'accélère cet objet vous allez voir le fil s'incliner dans le sens de l'accélération c'est contre-intuitif vous auriez l'impression qu'il va s'incliner dans le sens opposé non et en fait si vous prenez la tangente de cet angle d'inclinaison cette tangente c'est le rapport de l'accélération horizontale que vous avez fournie sur celle du champ gravitationnel terrestre en autre termes si vous arriviez à la main ça va être difficile à faire avoir une accélération qui est celle du champ gravitationnel terrestre vous auriez un angle d'inclinaison de l'ordre de 45 degrés d'accord ? alors cet accéléromètre vous pourriez aussi le réaliser de manière analogue mais différente puisque celui-ci fait apparaître la poussée d'archimène si vous avez un fil un objet qui est suspendu à un fil qui est fixé au rétroviseur de votre voiture si vous avez placé une tige métallique immobile d'accord ? vous allez voir que si votre voiture accélère là c'est le contraire le fil va pas s'incliner dans le sens du mouvement V vers l'arrière il va venir vers vous et là encore la tangente de l'angle d'inclinaison sera le rapport de l'accélération de la voiture divisée par celle du champ gravitationnel terrestre donc vous auriez un moyen disons analogique de mesurer rapidement l'accélération de votre véhicule ça peut aussi se faire avec un vélo même si là il faut aller assez sec pour pouvoir l'observer pratiquement c'est plus simple si vous avez une testa model plaide là les accélérations sont plus importantes d'accord ? et vous arriverez mieux à voir l'angle d'inclinaison

notes

résumé

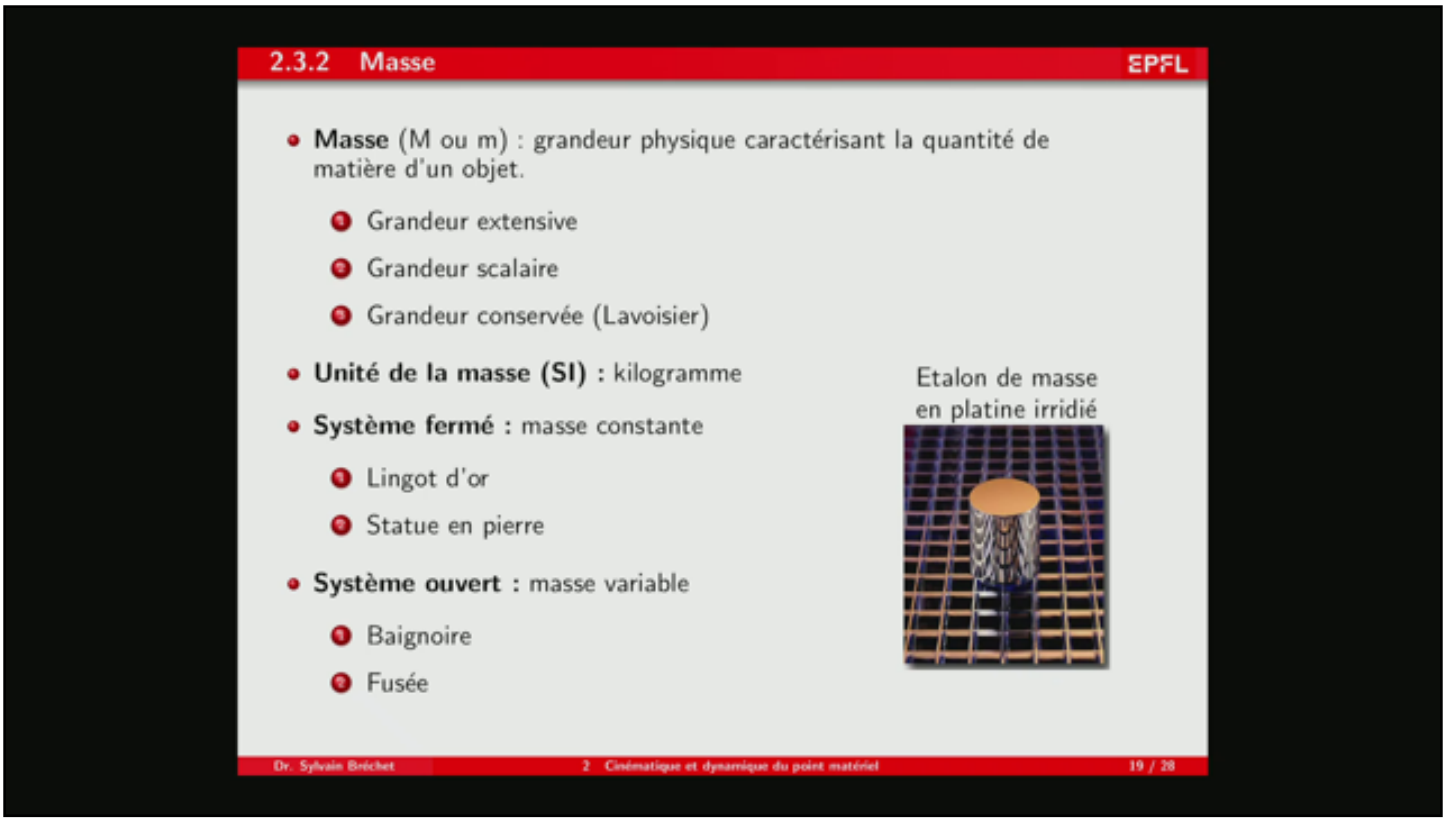


voilà c'est tout pour la cinématique passons maintenant au plat de résistance le plat de résistance c'est la dynamique d'accord ? on va énoncer les deux premières lois Newton alors vous me direz pourquoi pas la troisième parce que la troisième on va la traiter plus tard donc on va d'abord faire une physique d'autiste pendant un certain nombre de semaines la physique deviendra sociale à partir de la bithième semaine de cours on va faire interagir les points matériels entre eux je veux quand même vous assurer un peu dans notre physique des sept premières semaines disons le point matériel le point matériel va quand même interagir avec l'environnement on va considérer que c'est une interaction qui est externe au système pour pouvoir énoncer les lois Newton il faut qu'on distingue d'abord les grandeurs extensives et intensives

notes

résumé

73m 47s

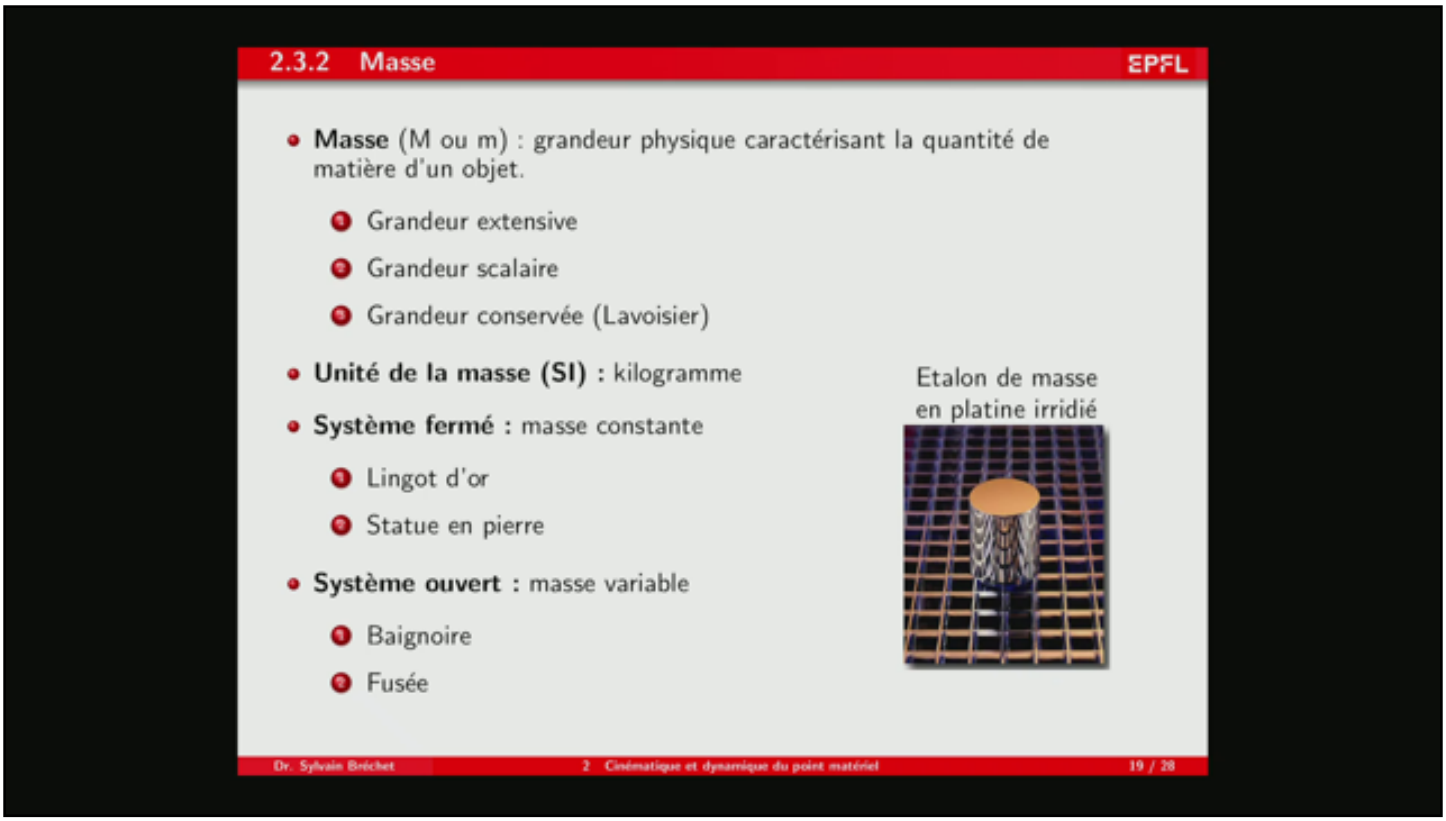


une grandeur extensive c'est une grandeur additive c'est une grandeur qui se somme et c'est à dire que pour un ensemble d'objets cette grandeur va être égale à la somme de sa valeur qu'elle aurait pour les objets individuels prenons un exemple très simple que vous allez tous comprendre très facilement supposé que vous achetez un sac qui contient 2 kg de pommes dans une sucursale locale d'un grand géant orange et puis vous achetez un autre sac qui contient 3 kg de pommes d'accord ? au total vous avez donc 5 kg de pommes et 5 c'est bien 2 plus 3 donc la masse, la quantité de matière s'additionne maintenant si vous prenez cette quantité de matière et que vous la mettez en mouvement vous voudriez aussi avoir une grandeur qui s'additionne qui va décrire le mouvement de la quantité de matière cette grandeur c'est comme son nom l'indique en français la quantité de mouvement attention ! ça sera une grandeur vectorielle l'addition sera une addition vectorielle on va en parler plus en détail avec un autre exemple qui sera la force qui elle aussi s'additionne dans la 2e loi Newton apparaît l'ensemble, la somme vectorielle des forces extérieures et pour cause la force est une grandeur extensive d'accord ? les forces s'additionnent parce qu'elles agissent sur un objet de masse m qui est lui aussi une grandeur extensible l' dernier exemple c'est le volume si vous achetez une brique de 2 litres de thé froide et que vous achetez une brique d'un lit de thé froide je vais globalement 3 litres de thé froide ça sera une surprise pour personne bon on pourrait dire est-ce que toutes les grandeurs sont extensives ? la réponse c'est non, il y a des grandeurs intensives des grandeurs qui sont indépendantes du nombre d'objets la première c'est la position supposons qu'on ait 2 objets qui soient à peu près au même endroit

notes

résumé

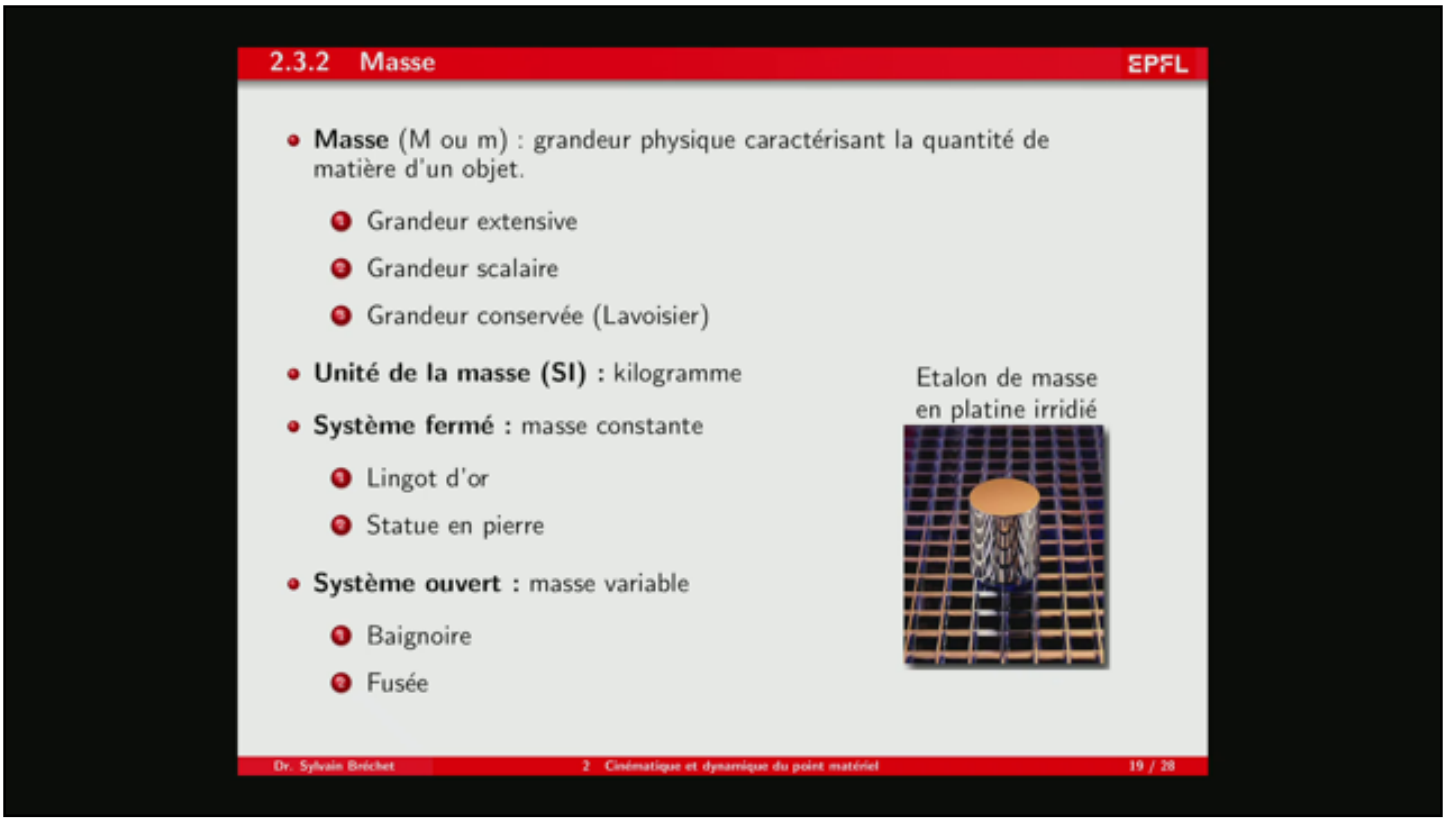
74m 35s



vu de loin ils sont au même endroit ils ont le même vecteur position si la position est une grandeur extensive la position de l'ensemble des 2 objets sera une position qui serait le double de la position de chacun d'entre eux c'est complètement absurde non la position est intensive autre exemple la vitesse on se déplace de jeunève à paris et puis on se déplace exactement en ligne droite à 100 kmh si vous prenez les axes de chaque roue les axes vont se déplacer à 100 kmh la voiture pour simplifier à 4 roues il y a des exceptions mais prenons une voiture standard maintenant si la vitesse est une grandeur extensive il faudrait que la voiture se déplace avec une vitesse de 6 roues c'est à dire à 400 kmh et donc l'habitacle se désolidariserait rapidement des roues ce qui évidemment serait extrêmement dangereux heureusement que ce n'est pas le cas la vitesse est donc bien une grandeur intensive on peut faire le même raisonnement avec l'accélération pour arriver au même résultat l'accélération elle aussi est une grandeur intensive toutes ces grandeurs cinématiques positions, la vitesse et l'accélération sont intensives elles ne dépendent pas du nombre d'objets un autre exemple c'est la température dans sa son expression absolue en physique la température absolue se mesure en Kelvin la température ambiante est de l'ordre de 300 Kelvin pour simplifier les choses le corps humain est un tout petit peu plus chaud mais disons que comme d'ordre de grandeur le corps humain il vous a l'entour de 300 Kelvin un peu plus, d'accord ? alors maintenant on va faire une expérience vous allez serrer la main la personne qui est à côté de vous allez-y pourquoi on fait cette expérience ? parce que si la température était une grandeur extensive qu'est-ce qui se passerait ? la température du système formé de vous et de votre voisin ou de votre

notes

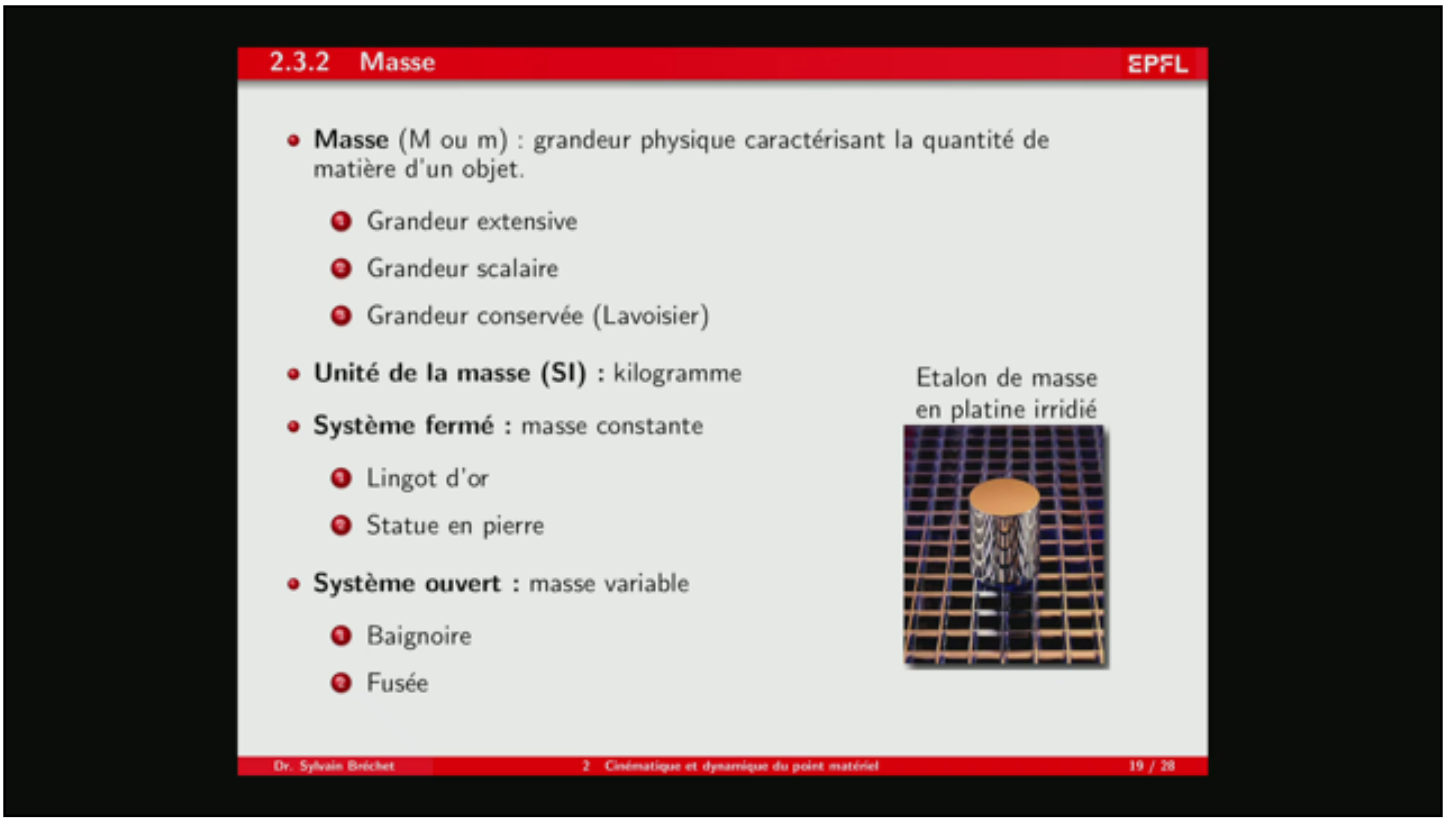
résumé



voisine serait la somme des températures que vous avez chacun en d'autres termes il s'agirait 300 Kelvin et vous rentreriez tous donc en combustion instantanée heureusement que ce n'est pas le cas la température est bien une grandeur intensive c'est tout bon hein voilà c'était juste pour la forme bon alors une autre grandeur intensive c'est la pression imaginez que vous avez une bouteille d'eau sous pression vous prenez ou des bouteilles de champagne vous débouchez des bouteilles de champagne si la pression était une grandeur extensive chaque fois qu'on ouvre une bouteille on augmenterait la pression atmosphérique et donc on vivrait tous dans une sorte de cocotte minute d'accord ? avec une atmosphère qui a une pression très élevée mais vous ne vous constatez que c'est clairement pas le cas donc la pression est une grandeur intensive puisque si vous prenez deux bouteilles sous pression que vous avez une vanne vous ouvrez la vanne, vous avez un ensemble qui est à la même pression que les pressions des gaz dans les deux bouteilles c'est une grandeur intensive qui est indépendante d'une nombre d'objets voilà on parlons maintenant de la première grandeur intensive dont on aura besoin qui est la masse cette masse qu'on va décrire soit avec la lettre M majuscule ou la lettre M minuscule en général on privilégera la lettre minuscule pour des points matériels et c'est plus tard pour un solide indéformable qu'on peut voir comme une collection de points matériels qu'on utilisera la lettre grandère donc cette masse c'est une grandeur extensive comme vous l'avez vu tout à l'heure avec l'exemple des pommes et surtout c'est un nombre c'est une grandeur scalaire parce que si vous prenez votre sac de pommes que vous le placez dans le coffre de votre voiture si vous vous déplacer à Berne ou si vous décidez de rejoindre Marseille vous aurez toujours une certaine quantité de pommes si vous posons

notes

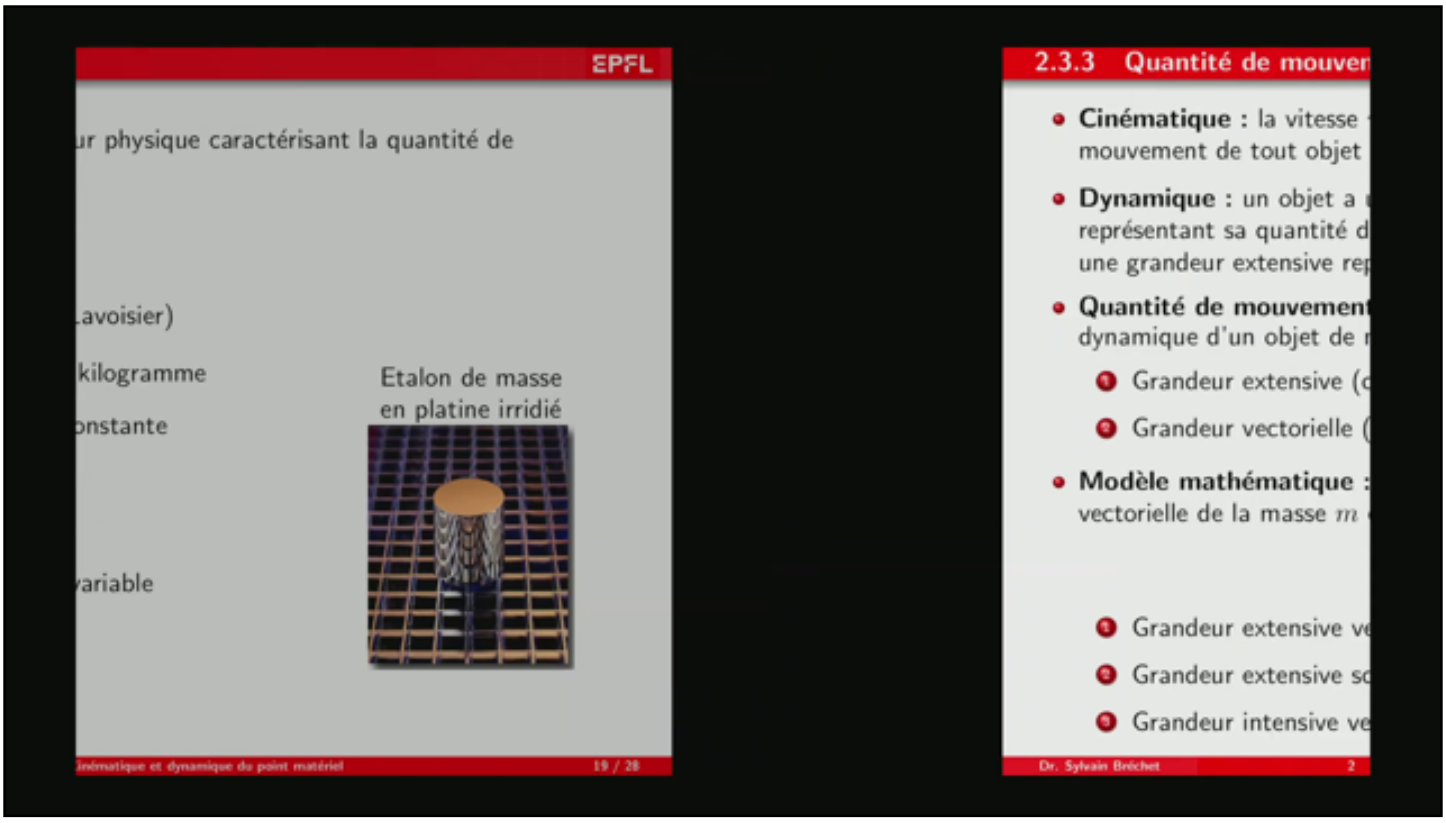
résumé



qu'on ait 5 kilos de pommes ça n'aura pas changé peu importe l'état de mouvement la masse restera la même en réalité cette masse c'est même une grandeur qui est conservée en mécanique classique d'après l'adage de la voisine qui dit rien de secret rien de se perd tout se transforme donc on a un système dont la masse peut varier elle peut sortir, elle peut rentrer mais globalement ce qui sort du système va dans l'environnement ce qui rend dans le système provient de l'environnement et si vous faites le bilan global du système et de l'environnement la masse est constante alors est-ce que la masse est toujours conservée la réponse c'est non en relativité elle n'est pas conservée parce que si vous prenez une particule et son antiparticule qu'elle rentre en collision il y a une petite explosion qui se produit il n'y a plus de particules il n'y a plus d'antiparticules en revanche il y a des photons extrêmement énergétiques ces photons qui sont des quasi particules de lumière ou si vous voulez des degrés d'excitation du champ électromagnétique n'ont pas de masse donc la masse a disparu vous pouvez aussi avoir des photons qui tout d'un coup créent une particule a une antiparticule elle la masse est créée et il y a toutes les propriétés opposées

notes

résumé

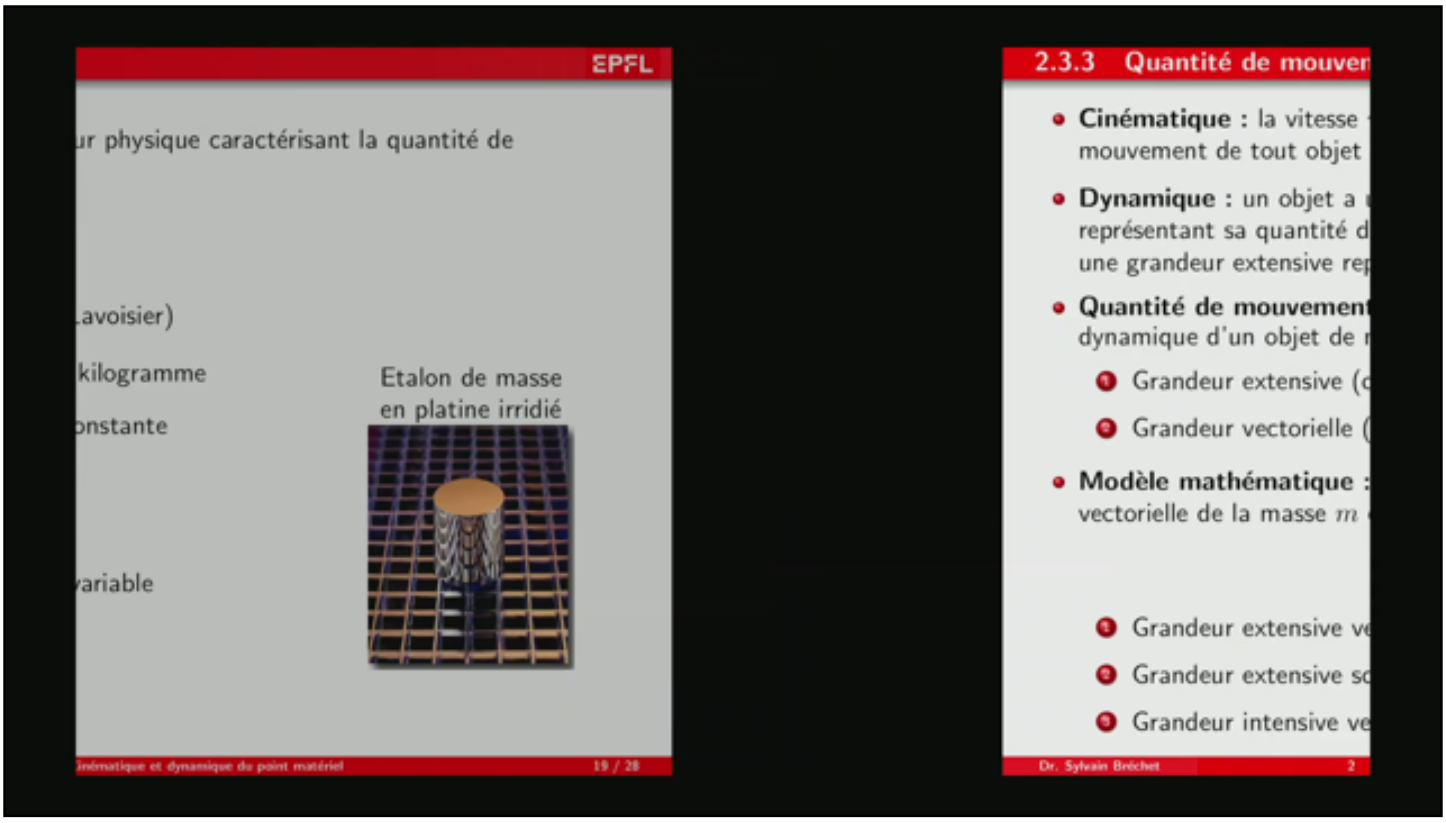


d'une particule à l'exception de sa masse qui est la même que celle de la particule donc on ne va pas se préoccuper de ça pour nous on considérera que la masse est toujours conservée alors quelle est l'unité fondamentale dans le système SI de la masse c'est le kilogramme alors les talons qui jusqu'à il y a quelques années étaient la référence internationale de la masse ça a changé se trouve au bureau international des poids et mesures dans la banlieue de Paris à Sèvres, plus exactement sous l'atmosphère contrôlée avec une température qui ne varie pas, une humidité qui est réduite à son minimum et c'est du platine irridié pourquoi parce qu'il est le plus inert possible au niveau chimique pour que la masse elle soit vraiment absolument constante au cours du temps aujourd'hui l'unité fondamentale liée à la masse est déterminée grâce à la mécanique antique avec la balance de kibble et donc on peut, si vous voulez tout baser sur les constantes fondamentales de la physique ce qui rend cette description encore plus précise dans la pratique pour la métrologie alors maintenant quand on parle de masse il faut distinguer deux cas de figure on peut avoir un système qui est fermé dont la masse est constante prenons un exemple supposons que vous ayez un lingo d'or d'un kilo et ce lingo vous allez le placer dans le coffre de votre sucre sale bancaire vous revenez 50 ans plus tard vous sortez le lingo, vous le placez sur une balance il a la même masse qu'il avait avant de l'amener dans le coffre il n'a pas changé, c'est toujours encore 1 kg deuxième exemple, ça serait une statue si vous vous rendez à Nion par exemple vous allez avoir les jolies colonnes romaines un peu à côté des colonnes romaines, vous avez le musée romain et à côté du musée romain, vous avez une statue de

notes

résumé

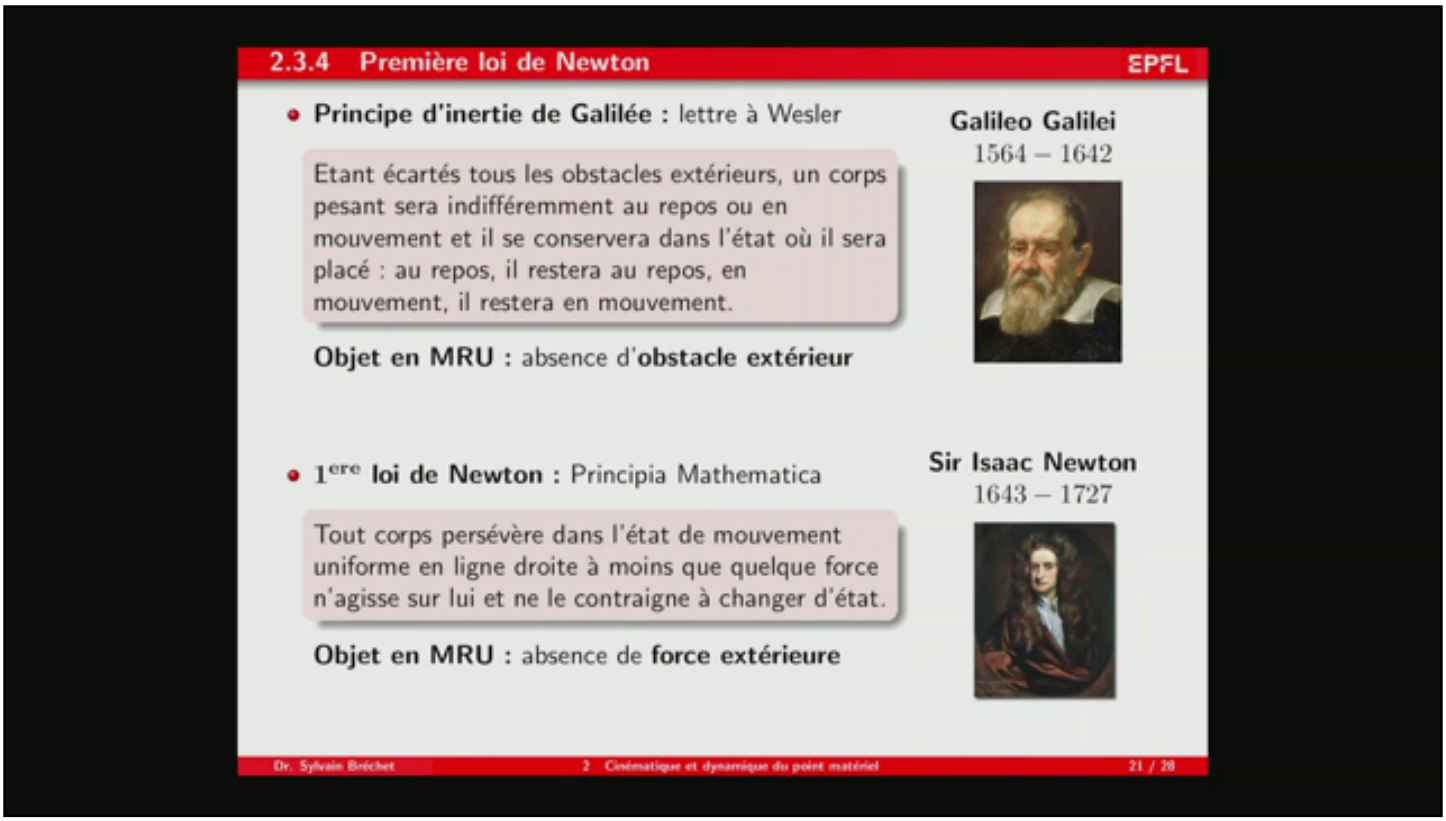
81m 25s



Jules César d'accord ? cette statue de Jules César, dans 150 ans s'il est encore là, elle aura exactement la même masse même si c'est difficile à vérifier, il faudrait débouler de la place sur une balance et faire la vérification ceux qui sont perspicaces me diront oui, mais attendez, c'est pas tout à fait vrai parce qu'il y a quand même de la pluie, donc il y a de l'érosion qui se fait oui, mais bon, on peut considérer que cette érosion elle est compensée par l'accumulation des fiants de noisons qui se viennent se déposer sur la statue et donc, globalement, si on regarde l'évolution de la masse de la statue au cours du temps, on voit qu'elle est à peu près constante la masse n'a pas changé s'il y a des systèmes fermés dans la masse est constante il y a aussi des systèmes dans la masse et variable, on va voir 2 exemples ensemble au chapitre 10 tout d'abord la baignoire, si vous prenez comme système la quantité d'eau qui est dans la baignoire, vous ouvrez l'entrée d'eau la quantité d'eau augmente vous enlevez le siphon, l'eau s'écoule par le siphon la quantité d'eau diminue, donc vous avez un système dont la masse peut varier c'est le cas aussi d'une fusée, puisque pour que la fusée décolle, il faudra qu'il y ait une éjection de carburant il faudra donc la masse diminuer au cours du temps on fera l'exercice dans cette auditoire au chapitre 10, la 10ème semaine on va faire décoller une fusée qui va traverser l'auditoire, d'accord ? on va voir qu'il y a de possibilités une fusée à base d'eau et une fusée à base d'air, le résultat ne sera pas le même comme on aura l'occasion de voir plus tard dans ce cours, ok ? bien

notes

résumé

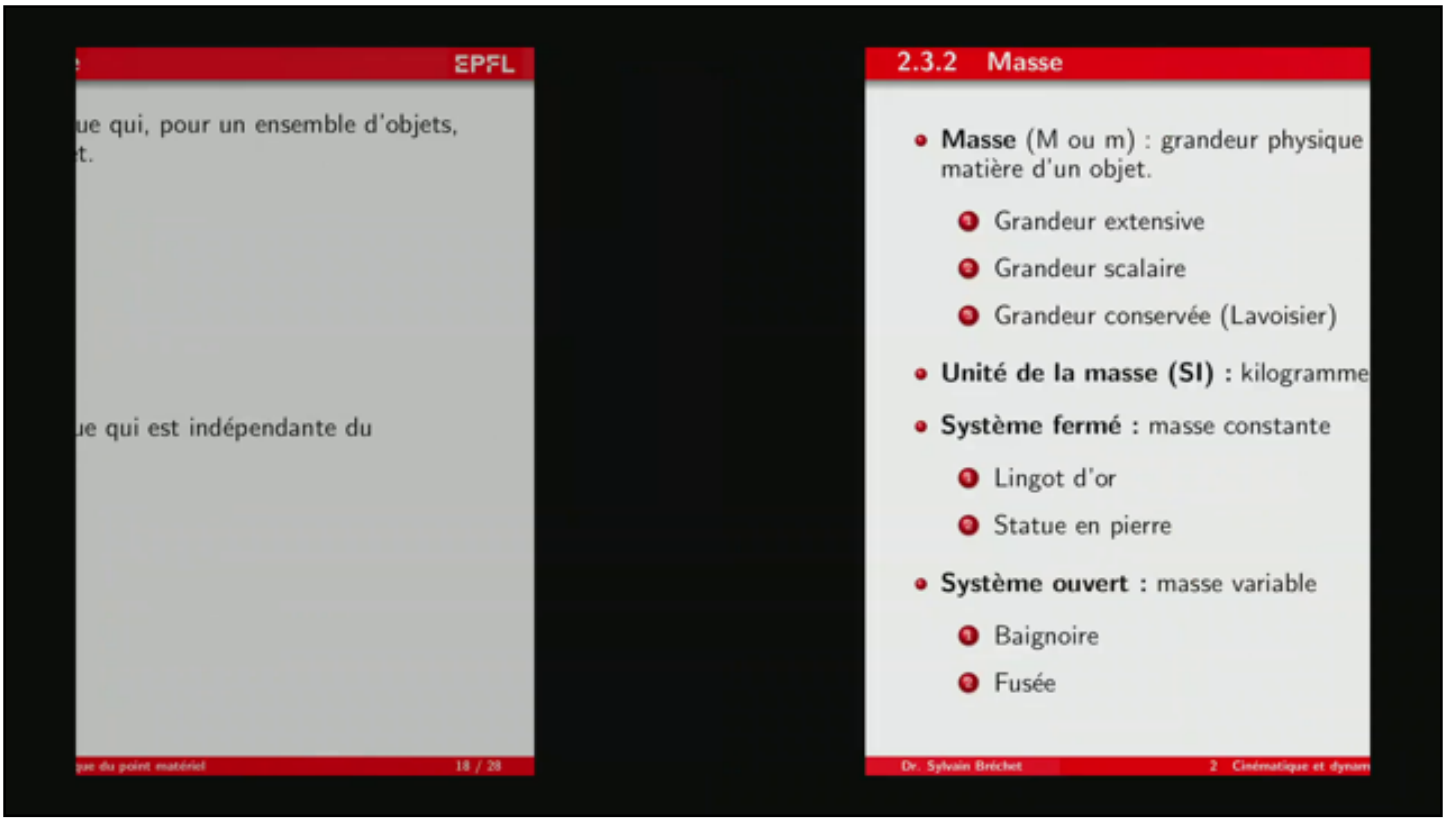


viens maintenant la discussion physique et la modélisation en cinématique le mouvement de tout objet est décrit par la grandeur intensive qui est la vitesse qu'on mesure par rapport à un référentiel donné très bien quand on fait de la dynamique, on sait que l'objet a une certaine quantité de matière qu'il masse M et cette grandeur est ex-tensive donc pour décrire proprement le mouvement en dynamique d'un objet qui est de masse M on a besoin d'une grandeur qui soit ex-tensive qui soit vectorielle qui dépend de la masse M de l'objet et de sa vitesse V cette grandeur c'est la quantité de mouvement ok ? alors maintenant faisons des maths on va traduire ce qu'on veut faire selon le modèle mathématique on veut trouver l'expression de la quantité de mouvement qu'est ce qu'on sait ? c'est une fonction de la masse et de la vitesse qui plus a une fonction vectorielle écrite dans ceci c'est donc une fonction vectorielle qui prend comme argument la masse de l'objet ainsi que le vector vitesse V ok ? ça pour l'instant c'est tout ce qu'on sait on répondra à cette question après avoir énoncé les deux lois de Newton on verra comment la quantité de mouvement est liée à la masse et la vitesse je sais que beaucoup d'entre vous ont déjà une idée mais l'idée à laquelle vous pensez c'est pas la définition de la quantité de mouvement c'est un cas particulier à vitesse suffisamment faible on va voir qu'avec un raisonnement physique basé sur l'extensivité de la masse ainsi que celle de la quantité de mouvement on arrivera à trouver la forme générale et on fera ensemble une expérience qui à basse vitesse permettra de montrer quelle est la forme définitive de la quantité de mouvement en mécanique classique pour l'instant

notes

résumé

84m 30s

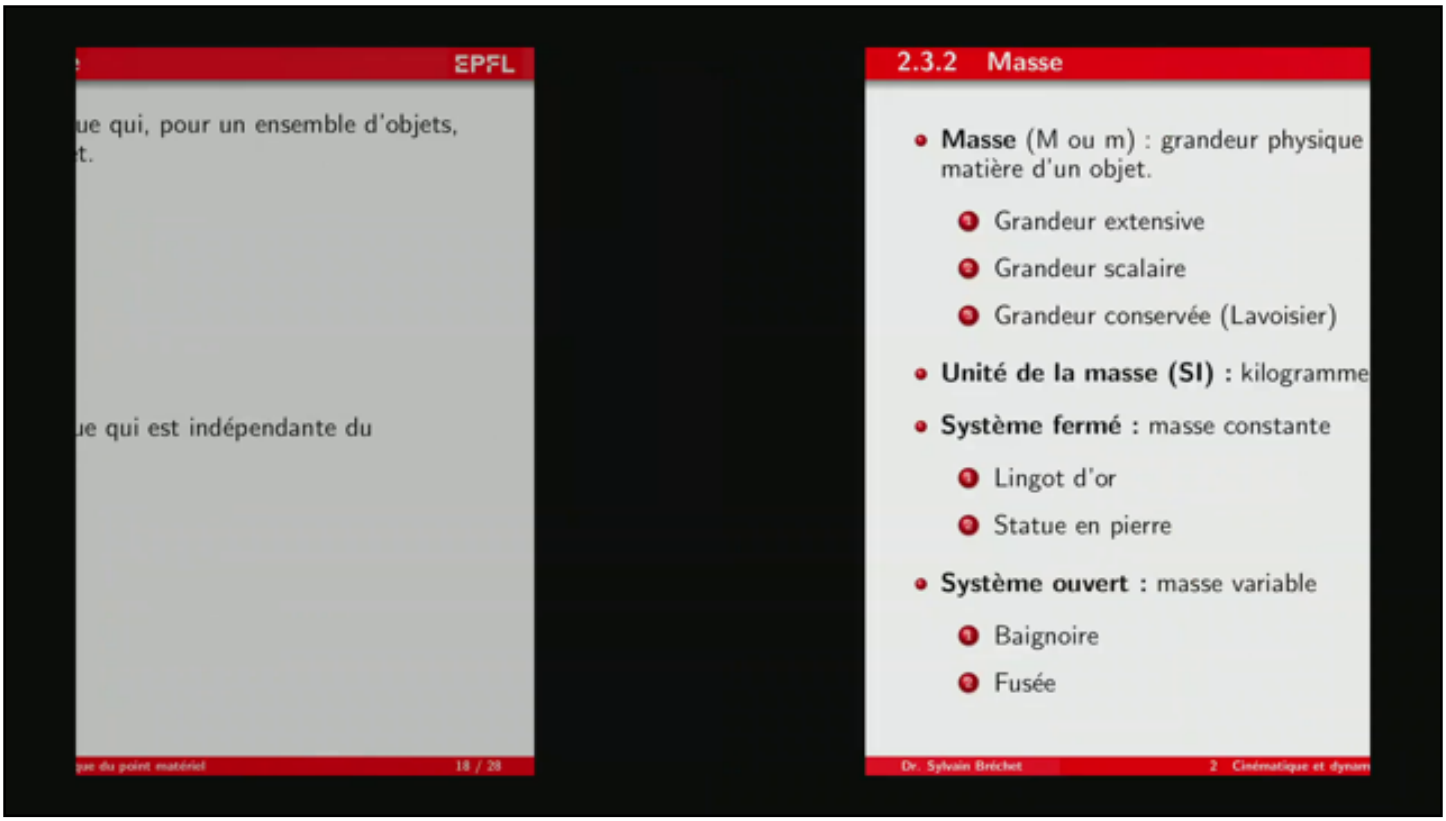


on va énoncer la première loi Newton et avant de faire on va s'intéresser au principe d'inertie de Galilé comme je l'ai mentionné rapidement la semaine passée avant Galilé le paradigme Régnion était le paradigme Aristotelicien d'après Aristote il faut distinguer deux choses et ça paraît complètement intuitif si on avait jamais fait de la physique c'est ce qu'on dirait nous aussi il y a l'état de repos la bouteille des viens qui bouge pas par rapport aux références universites et l'état de mouvement voilà les deux états possibles et donc pour Aristote pour qu'il y ait un mouvement il faut que quelque chose qui génère le mouvement il faut une force motrice une intération externe Galilé a compris que c'était pas vrai il a compris que le mouvement naturel d'un corps existait c'est un mouvement qui se fait à vitesse constante alors ça c'est assez génial pourquoi ? parce que quand on regarde un mouvement à la surface de la Terre si je fais glisser ce stylo par exemple sur la table il y a du frottement il y a du frottement à la table il y a du frottement partout tout le temps donc disons pour Aristote ce frottement était propre à l'objet même qui interagit avec l'environnement Galilé a compris que non c'était une interaction externe qui génère un mouvement particulier le frottement donc le mouvement naturel se fait en absence de cette interaction externe et globalement nul alors on a un mouvement naturel ce mouvement naturel doit donc se faire à vitesse constante c'est le genre de mouvement qu'on retrouve avec le poc qu'on fait glisser il se déplace à vitesse constante là on arrive à le mettre en évidence parce que le poussandère permet de réduire le frottement à son expression minimale donc on a un mouvement qui est vraiment celui qu'on a en absence de frottement dans la pratique quasi axopac mais à l'époque

notes

résumé

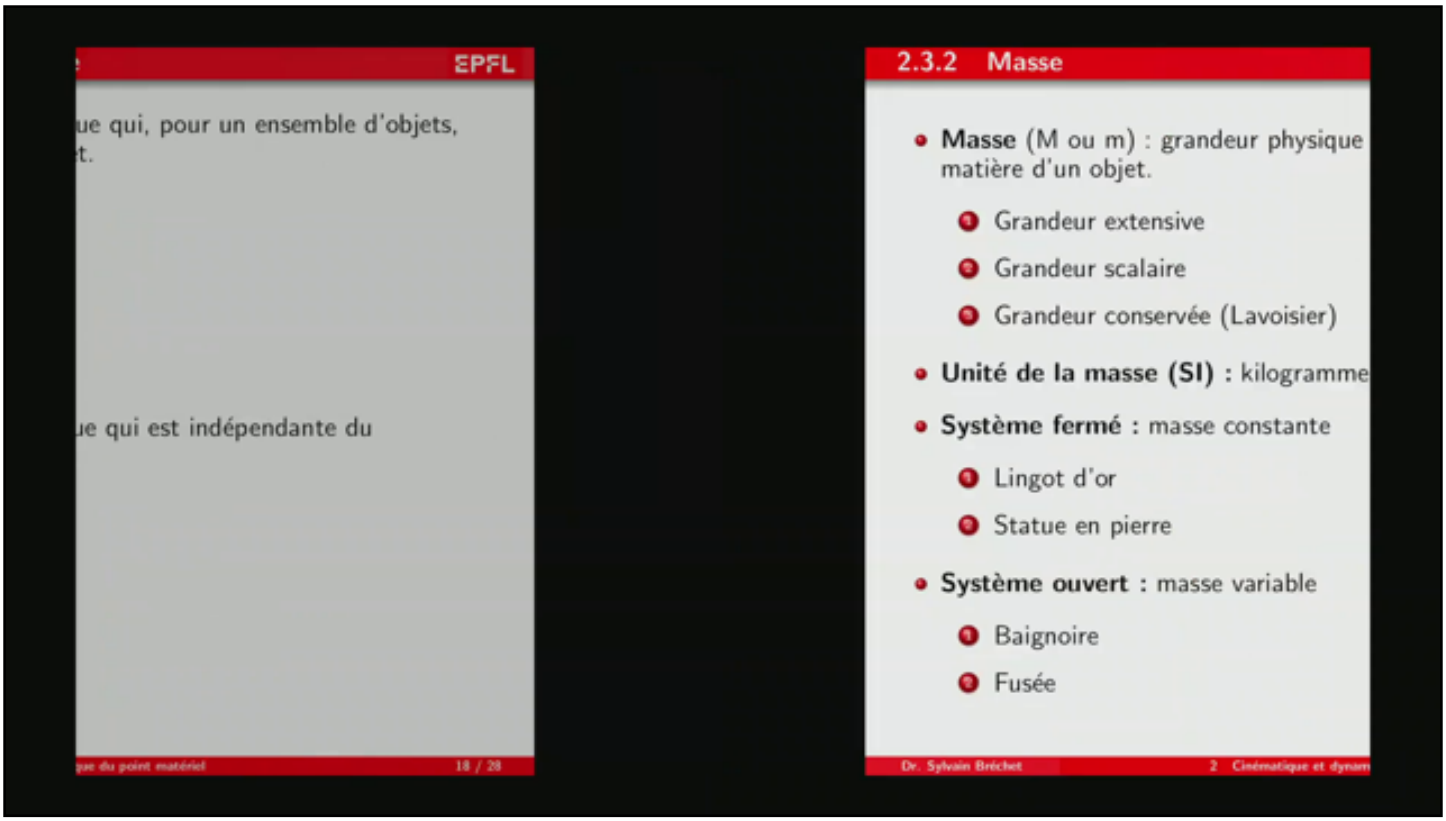
86m 25s



Galilé il n'avait pas accès à ça à pise il n'y avait pas tellement de pâtiss noirs d'accord donc c'était difficile pour lui de se rendre compte que le mouvement naturel devait se faire à vitesse constante et c'est en ce sens là que son intuition était complètement géniale cette petite différence a tout fait basculer et ça a amené à la fin du paradigme Aristotelicien au début d'un nouveau paradigme celui qui a mené à la physique classique et donc Galilé résume ses pensées à son ami Westerler dans une lettre où il dit étant écarté tous les obstacles extérieurs un cœur pesant c'est à dire un objet qui a une certaine masse sera indifféramment au repos ou en état de mouvement et il se conservera dans l'état où il sera placé au repos il restera au repos en mouvement il restera lorsqu'il dit indifféramment d'accord c'est à dire qu'il garde son mouvement la nature de son mouvement donc s'il est en mouvement il aura une vitesse qui va rester constante au cours du temps donc cinématiquement c'est Galilé qui a posé les bases de l'UMRU la vitesse est une constante s'il n'y a pas d'obstacle extérieur par obstacle extérieur il faut comprendre force extérieure alors pourquoi est ce qu'on parle pas aujourd'hui encore du principe d'inertie de Galilé lorsqu'on se réfère à la première loi de Newton pourquoi on parle de la première loi de Newton quel est l'apport de Newton puisque si vous voulez la première loi de Newton c'est une version déguisée du principe d'inertie et bien l'apport de Newton il est double il est tout d'abord dynamique ce que Newton a compris c'est que non seulement la vitesse est constante mais la vitesse est une grandeur intensive c'est la quantité de mouvement qui est la grandeur extensive qui est la constante donc p est une constante si la masse est constante et que la vitesse

notes

résumé



est une constante et pour que la vitesse soit constante il faut donc que l'obstacle extérieur qui est en fait une force extérieure soit nulle et donc avant de prendre la pause vous lien l'extrait des principes de mathématiques de Newton enfin la traduction de la marquise du Châtelet qui était l'amante de Voltaire qui a écrit tout corps persévère dans l'état de mouvement uniforme en ligne droite à moins que quelques forces n'agissent sur lui et ne le contraignent à changer d'état donc Newton il a eu ce trait de génie de se dire le concept de force qui a été utilisé d'abord par Archimètre par Stévin d'accord dans le cas statique doit avoir un impact dynamique et c'est la cause même de la variation d'états de mouvement naturel et donc en absence de cette force on a un mouvement naturel un mouvement rectim uniforme caractérisé par une quantité de mouvement constante et une vitesse constante on prend la pause et après la pause on va voir quelles sont les conséquences de cette première loi qui sont absolument fantastiques j'annonce encore rapidement au chapitre 9 de ce cours lorsqu'on parlera de la gravitation universelle vous allez voir que ce qui arrive à faire la relativité générale c'est de s'affranchir de la deuxième loi Newton pour revenir à la première mais que le prix à payer sera courbé la structure de l'espace et du temps voilà on prend la pause voilà le cours va reprendre

notes

résumé

2.3.4 Première loi de Newton

EPFL

- **Principe d'inertie de Galilée :** lettre à Wesler

Etant écartés tous les obstacles extérieurs, un corps pesant sera indifféremment au repos ou en mouvement et il se conservera dans l'état où il sera placé : au repos, il restera au repos, en mouvement, il restera en mouvement.

Galileo Galilei
1564 – 1642



Objet en MRU : absence d'**obstacle extérieur**

$\vec{v} = \overrightarrow{cste}$

- **1ere loi de Newton :** Principia Mathematica

Tout corps persévère dans l'état de mouvement uniforme en ligne droite à moins que quelque force n'agisse sur lui et ne le contraigne à changer d'état.

Sir Isaac Newton
1643 – 1727



Objet en MRU : absence de **force extérieure**

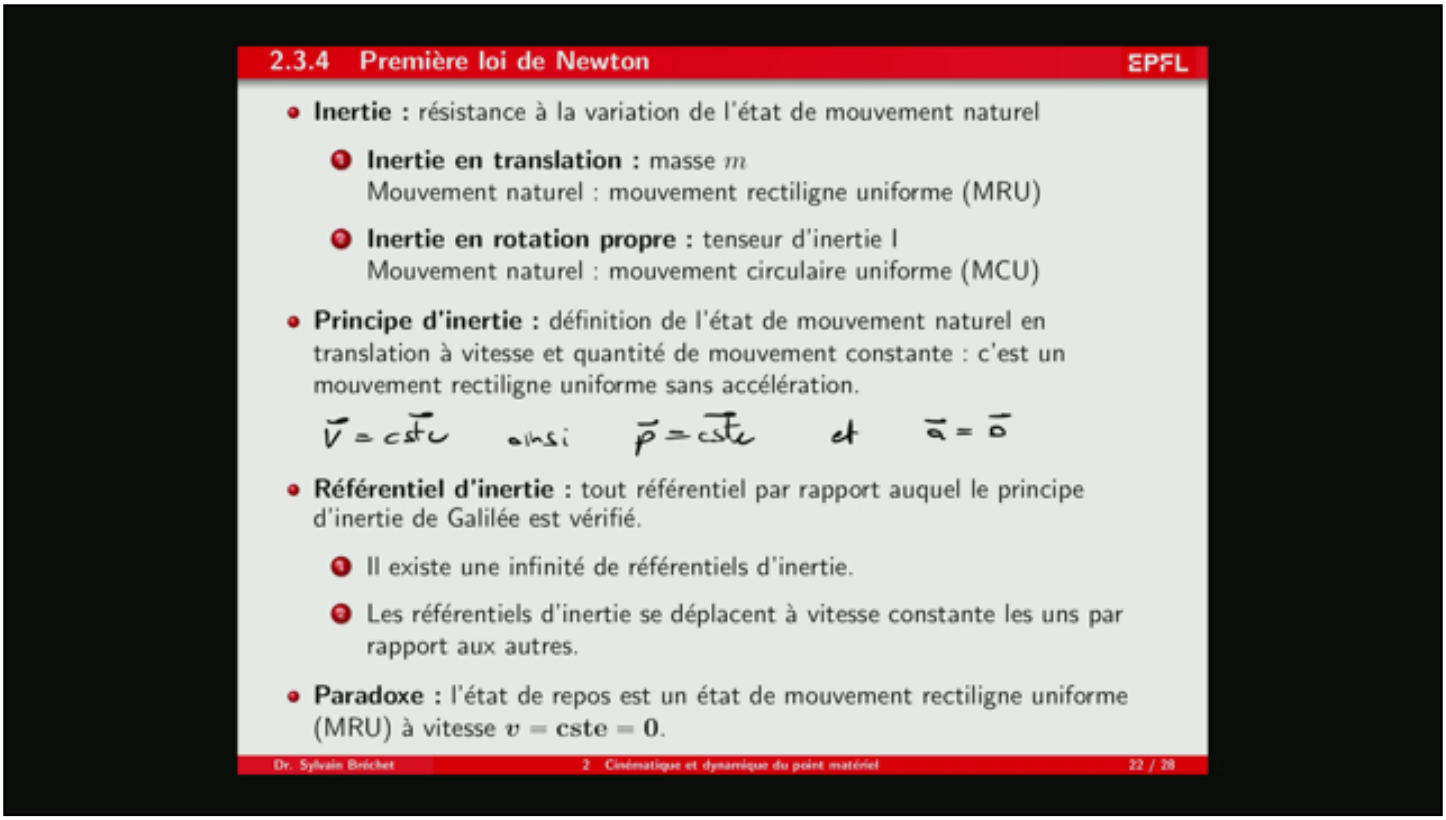
$\vec{p} = \overrightarrow{cste}$ si $m = cste$ et $\vec{v} = \overrightarrow{cste}$

juste avant la pause on a

notes

résumé

92m 1s

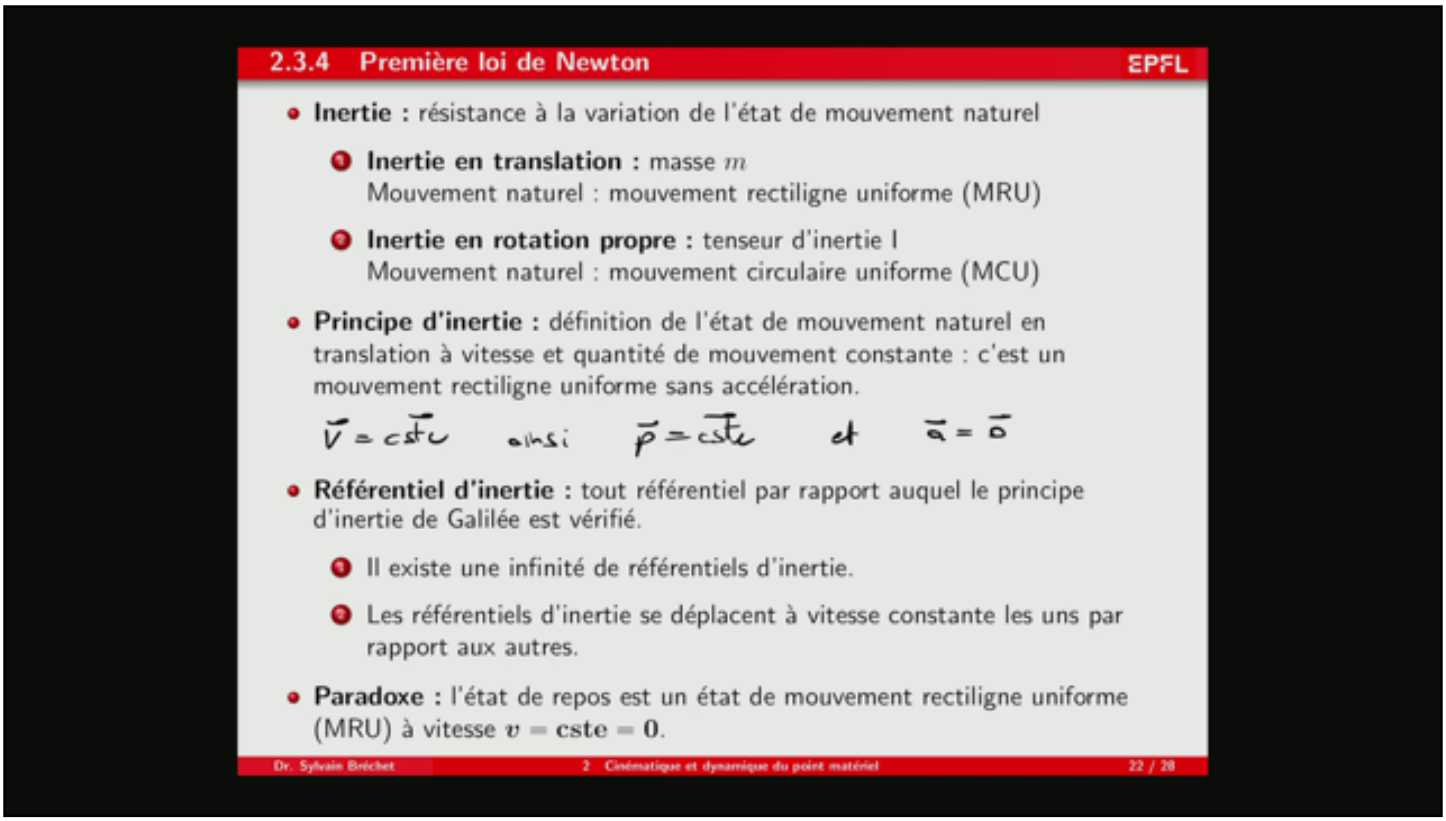


énoncé la première loi Newton qui dit en substance que le mouvement naturel d'un corps en absence de force extérieure résultante est un mouvement qui a lieu à quantité de mouvement constante la quantité de mouvement est une fonction de la masse et la vitesse si la masse est constante la vitesse le saura aussi mais derrière cette première loi Newton on retrouve le principe d'inertie de Galilé le mot inertie il vous pose peut-être la question de vous dire mais ça signifie quoi l'inertie peut-être certains d'entre vous vous dites bon l'inertie apparemment c'est lié à la rotation c'est pas faux mais pas seulement c'est quoi l'inertie c'est la varie c'est une résistance à la variation de l'état naturel de mouvement d'accord alors en translation l'état naturel de mouvement c'est un mouvement érectiline uniforme pourquoi parce que si l'état naturel de mouvement varie la vitesse varie il y a une accélération et ce qui va s'opposer à l'accélération c'est l'inertie en translation c'est la masse d'accord en rotation l'état de mouvement naturel c'est un mouvement de rotation propre qui se fait à vitesse angulaire constante d'accord et ce qui va s'y opposer c'est l'inertie l'inertie qui va s'opposer à une accélération angulaire en rotation on va les voir les deux avec le puck je vais le faire tourner sur lui-même vous garderez bien le puck au sol vous allez voir que son centre de masse son centre se déplace à vitesse constante et son mouvement de rotation propre va se faire à vitesse angulaire constante regardez voyez il se déplace à vitesse constante et le mouvement de rotation je le refais pour ceux qui n'ont pas pu le voir voyez, mouvement de rotation se fait à vitesse angulaire constante alors apparemment vous l'avez pas vu parce que, alors je le refais juste pour vous regardez bien voyez le centre se déplace à vitesse constante et le mouvement de rotation

notes

résumé

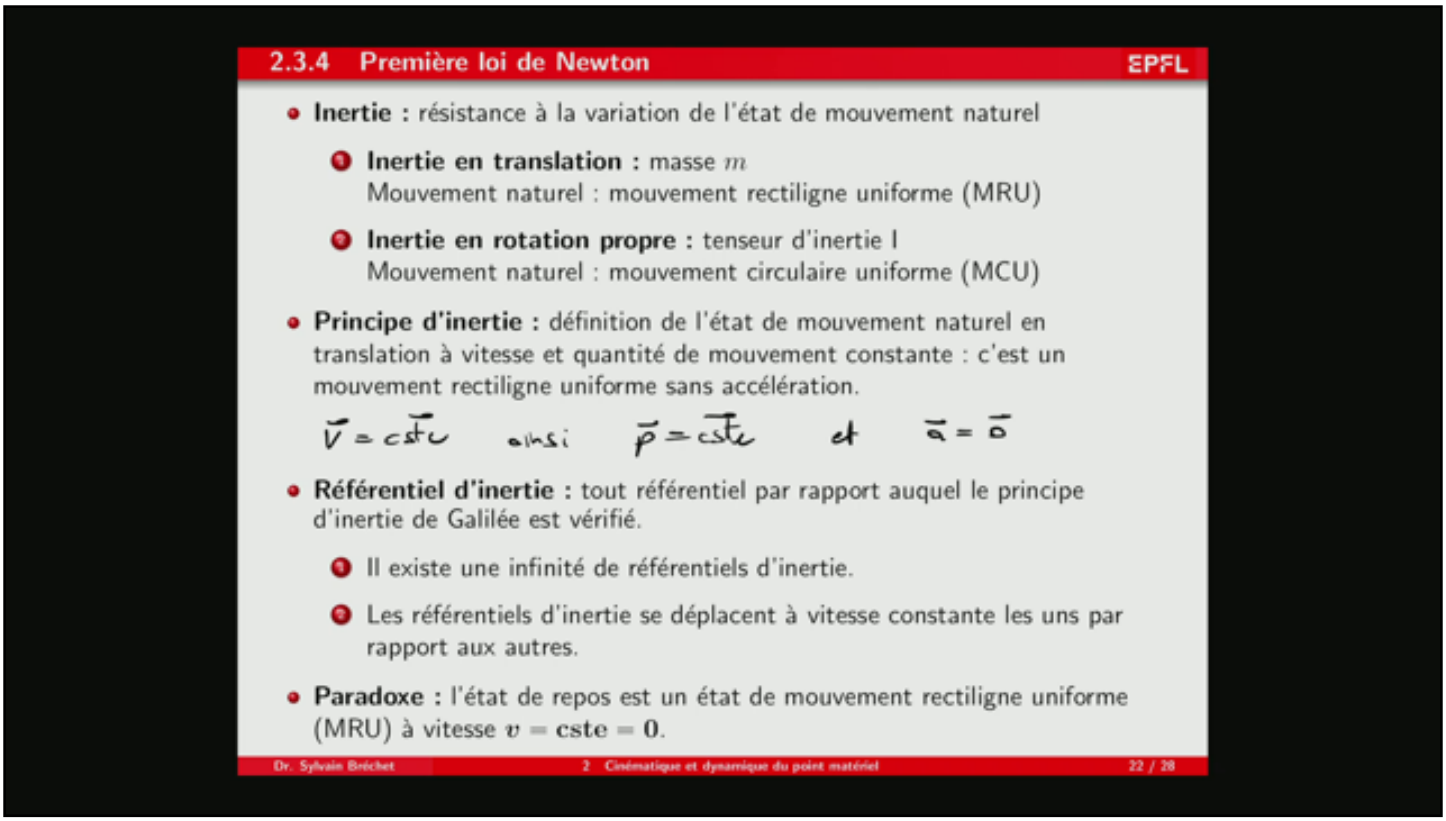
92m 5s



se fait à vitesse angulaire constante d'accord voilà donc, ceci nous permet donc de comprendre le principe d'inertie c'est quoi ? eh bien c'est une définition même de l'état de mouvement naturel d'accord ? l'état de mouvement naturel va se faire à vitesse constante donc à quantité de mouvement constante et donc, concrètement si la vitesse est constante ça dériverait temporal et nul donc l'accélération sera nul à quoi ça sert ? à définir des référentiels privilégiés un référentiel dit d'inertie est un référentiel par rapport auquel le mouvement d'un corps en absence de force extérieure résultante est un mouvement rectiline uniforme à mérue à vitesse et quantité de mouvement constante c'est le cas en première approximation de la Terre lorsqu'on étudie le mouvement d'un corps d'accord ? si on prend le ray arrière qui est ici je vais juste l'enclencher alors apparemment le fil ça va aider hop alors bien alors maintenant si j'enclenche la soufflerie je prends ici un glisseur non, je n'ai pas fait ce que j'aurais dû faire j'aurais dû appuyer sur l'autre bouton puisque cette soufflerie va juste éjecter de l'air dans le vide voilà c'est ce bouton là que j'aurais dû prendre donc maintenant si je prends le glisseur d'accord il se trouve sur un coussin d'air il y a de force qui s'exerce sur ce glisseur son poids vers le bas la force de réaction normale du coussin d'air vers l'eau elle se compense sans mouvement naturel est un mouvement rectiline uniforme d'accord ? et donc par rapport aux référentiels de la Terre on a bien le comportement qu'on veut en absence de force extérieure on a un mouvement naturel donc la Terre est un référentiel d'inertie est-ce que c'est vrai ce que je viens de dire au sens absolu est-ce que la Terre c'est un référentiel d'inertie ? non, pourquoi ? exactement et si elle tourne sur elle-même par rapport à un

notes

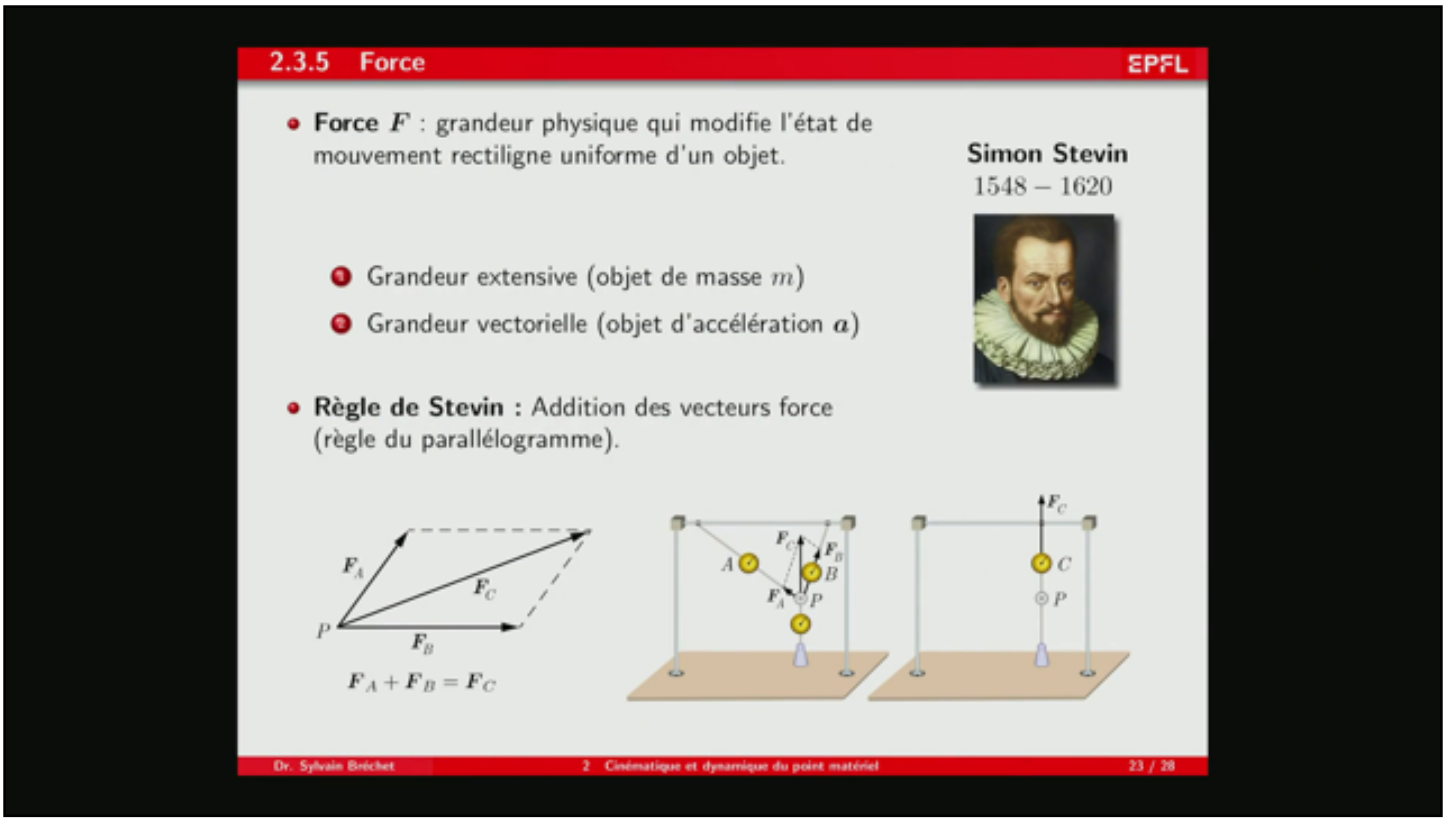
résumé



référentiel dans lequel elle ne tournerait pas qu'est-ce qu'elle a ? une accélération une accélération sans tripette, d'accord ? elle tourne autour du soleil deux accélérations sans tripette différentes le système solaire lui-même se déplace dans notre galaxie la volactée cette volactée se déplace dans le groupe local et en si de suite vous l'aurez compris on est dans un gigantesque manège cosmique tout tourne autour de tout il n'y a donc au sens strict aucun référentiel d'inertie alors pourquoi ça marche ? est-ce que quelqu'un a une idée ? oui c'est vrai ça joue un rôle effectivement on verra que c'est le cas pour le pendule si on regarde un pendule qui aussi nous rend un intervalle de temps suffisamment court la rotation de la Terre ne l'influence pas alors que pour un intervalle de temps plus grand il faudra en tenir compte c'est le cas du pendule de Foucault

notes

résumé

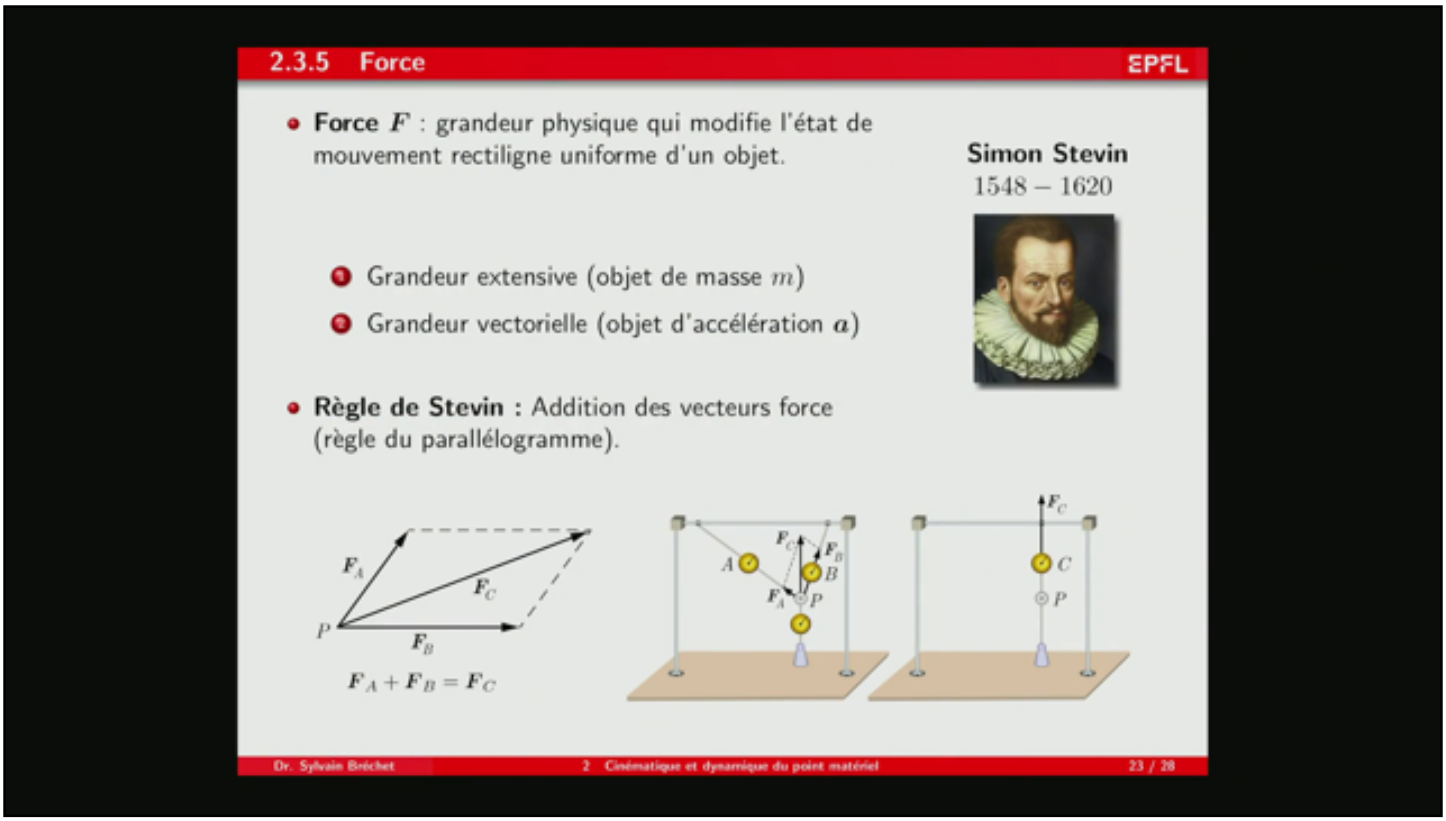


il y a quelqu'un d'autre qui a une idée ? oui à vous levez la main c'est pour ça que... ah non, ok d'accord c'était autre chose oui je vous levez la main, oui dites-moi parce qu'il y a un transfert d'accélération c'est-à-dire si la Terre par exemple est changée sous l'orbitre il ne remarquera pas mais on le ferait en compter comme ça alors... la accélération peut-il faire la paix ? alors il y a des éléments qui sont corrects dans ce que vous avez dit, dans le sens où cette accélération elle est en fait tellement petite que ça ne change rien elle est négligeable donc la plupart du temps ces accélérations dont on est en train de parler surtout quand c'est pour des grandes structures dans la galaxie etc... c'est complètement négligeable ce qui fait qu'en première approximation à la surface de la Terre, on peut considérer que la Terre, même si c'est faux au sens absolu est bien un référentiel d'inertie alors, est-ce qu'il y a un référentiel d'inertie ? est-ce qu'il y a plusieurs référentiels d'inertie qui pensent qu'il y en a une infinité ? levez la main et pourtant c'est correct, oui oui il y en a bien une infinité d'accord ? pourquoi ? c'est parce que c'est un référentiel d'inertie par rapport à référentiel d'inertie si vous prenez un objet dont le mouvement est tel que la somme des forces extérieures est nulle il a un mouvement rectil uniforme à vitesse constante si je prends par exemple cette bouteille de viande un exemple elle se déplace à vitesse constante par rapport au référentiel de la Terre alors maintenant si je me déplace à la moitié de la vitesse de la bouteille je vais pas trop le faire longtemps vous l'avez compris 2 fois moins vite que la bouteille il y aura mon référentiel à moins la bouteille se déplace à la moitié de

notes

résumé

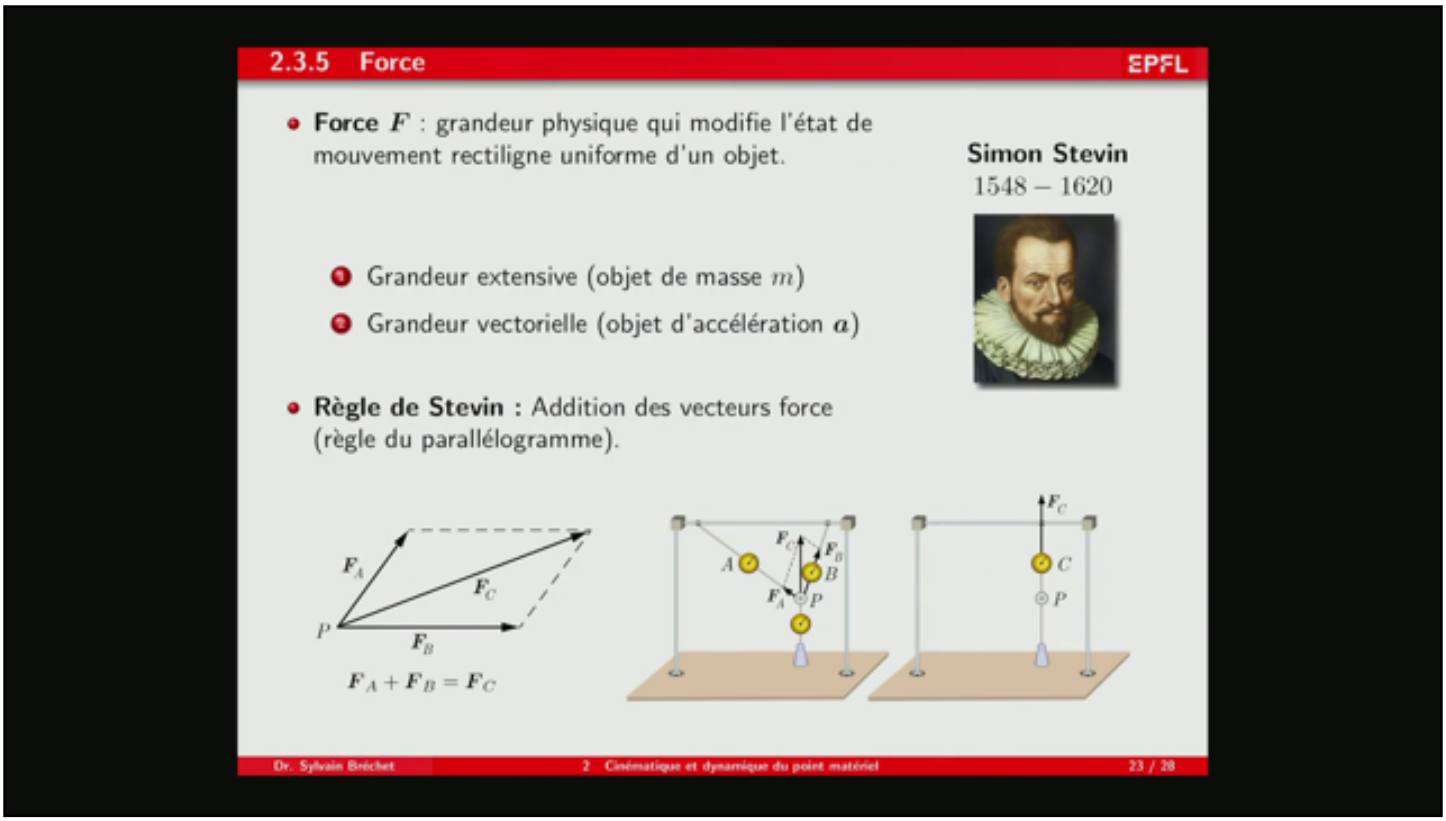
97m 49s



la vitesse par rapport auquel se déplace par rapport à votre référentiel à vous mais c'est toujours encore une vitesse constante donc c'est un nouveau référentiel d'inertie je l'ai fait pour la moitié de la vitesse je pourrais le faire pour le tiers les deux tiers n'importe quel facteur réel du moment que un référentiel se déplace à vitesse constante par rapport à un autre référentiel qui est un référentiel d'inertie c'est encore un référentiel d'inertie alors il peut se déplacer dans la même direction il peut même se déplacer dans une autre direction, peu importe le mouvement relatif se fera toujours encore à vitesse constante il y a donc une infinité de référentiels d'inertie et ça, ça va nous amener à un paradoxe qui va nous permettre de comprendre l'essentiel de ce cas-de-dix galilée, qui est subtile en réalité c'est que si je prends maintenant cette bouteille que je décide de me déplacer à la même vitesse que la bouteille par rapport à mon référentiel la bouteille est immobile d'accord ? mais je suis encore dans un référentiel d'inertie ce qui veut dire que dans mon référentiel cette bouteille a toujours encore un mouvement rectiligne uniforme, vous me direz non elle est au repos, elle n'est pas en mouvement si, elle a un mouvement rectiligne uniforme dont la particularité est que la vitesse est nulle d'accord ? donc un état de repos c'est un état de mouvement rectiline uniforme à vitesse nulle et donc la dichotomie, elle n'est pas entre un état de repos et un état de mouvement non ? elle est en état de repos ou tout autre état de mouvement rectiligne uniforme et l'état de repos est un mouvement rectiligne uniforme d'accord ? c'est une dichotomie entre cet état-là et tous les autres états où le mouvement est accéléré d'accord ? donc c'est ça la vraie distinction mouvement rectiligne uniforme mouvement accéléré rectiligne ou autre c'est

notes

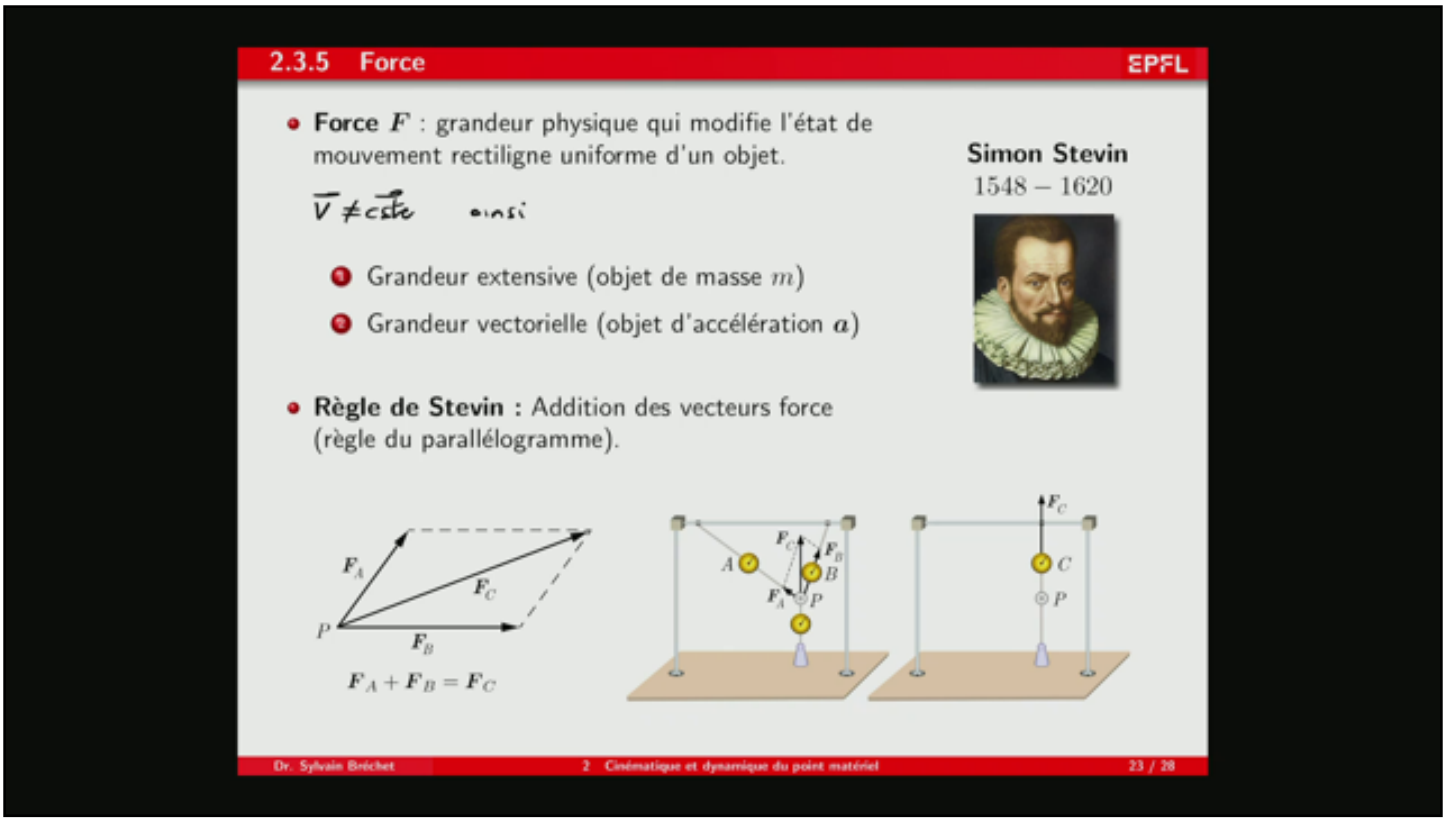
résumé



ça le grand changement de paradigme et en fait, on le comprend maintenant bien parce que pour qu'on ait des forces qui interviennent qui vont générer une accélération faudra justement qu'on ait ce mot accélération qui intervient, qui est la dérivée de la vitesse il faudra donc que la vitesse varie ok ? donc ça, ça sera l'élément essentiel il faudra qu'on ait des forces qui conduisent à une variation de l'état de mouvement naturel alors justement, ces forces parlons-en

notes

résumé

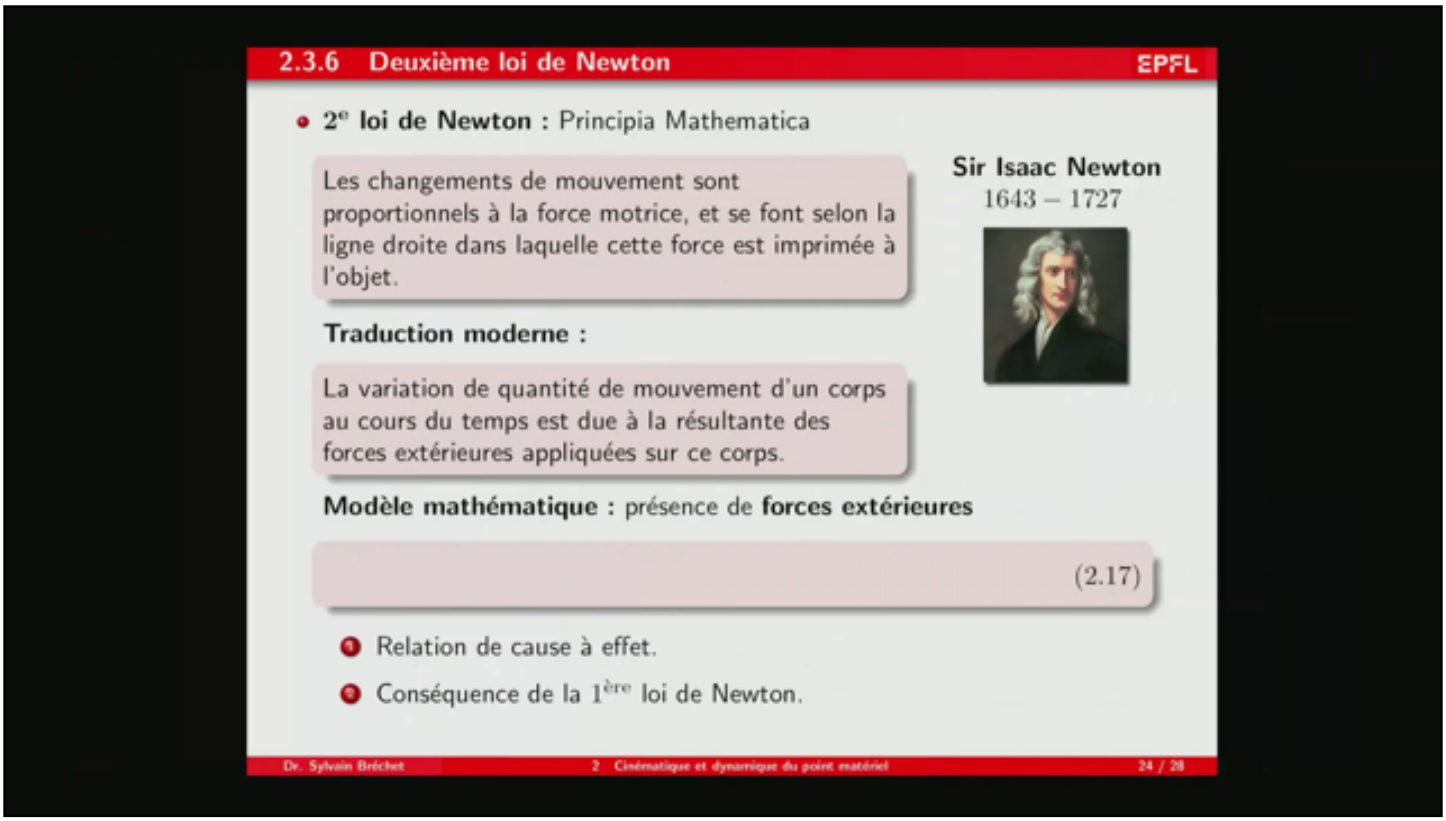


ces forces modifient donc l'état de mouvement naturel ce qui veut dire que l'action de ces forces va permettre d'avoir une vitesse qui n'est plus une constante ok ? maintenant si la vitesse n'est plus constante

notes

résumé

101m 43s

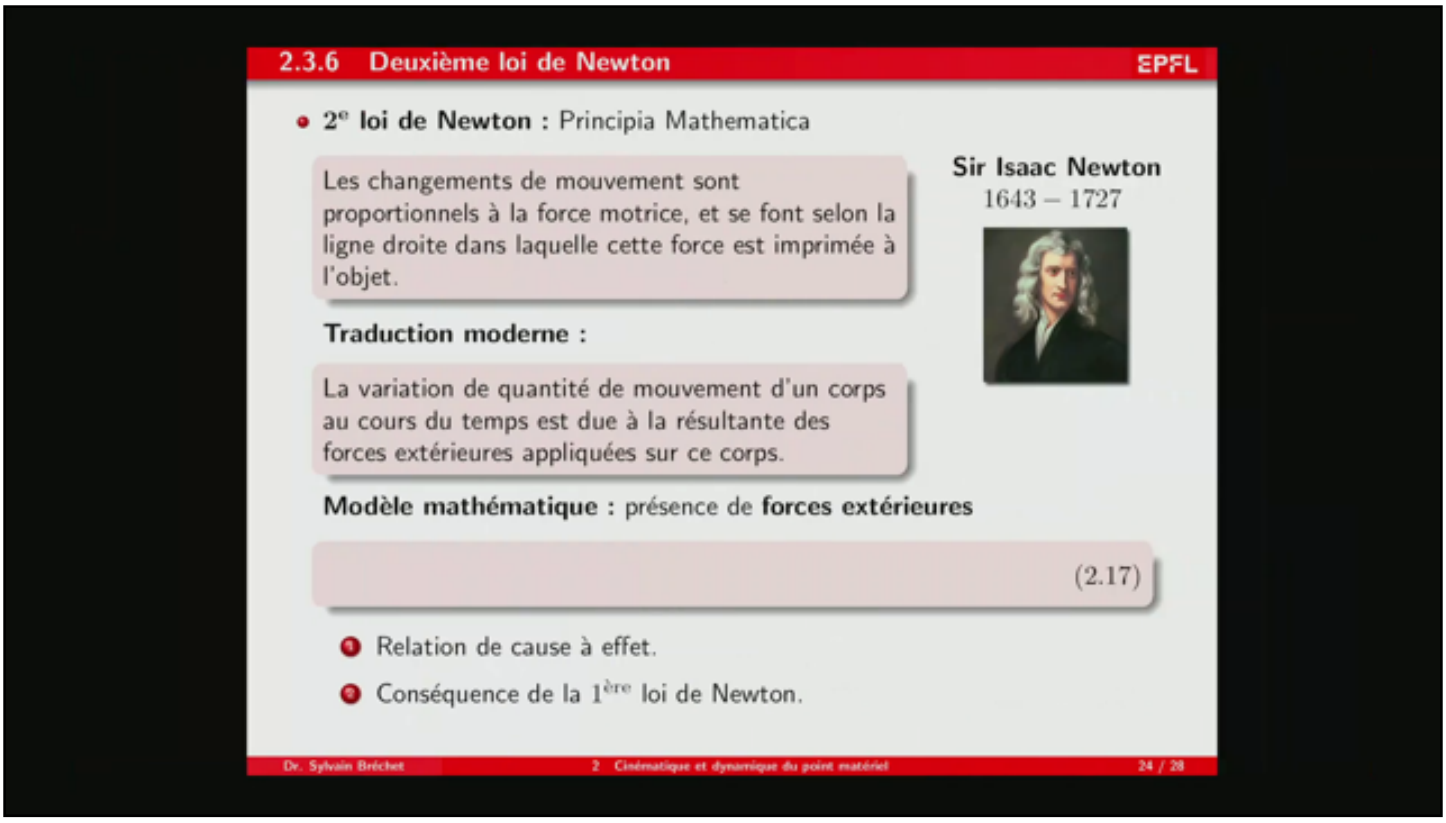


la quantité de mouvement qui est une fonction de la vitesse sera elle plus constante non plus ok ? et donc si la vitesse n'est pas constante cette vitesse varie si la vitesse varie, on aura donc une accélération non une pour l'instant, on va pas encore lier toutes ces grandeurs ensemble on va pas encore lier la force à l'accélération ça viendra plus tard qu'est ce qu'on peut dire sur la force ? cette force vient modifier l'état de mouvement naturel caractérisé par une grandeur extensive qui est la quantité de mouvement ok ? donc il faudra que la force soit aussi une grandeur extensive de 1 et de 2, il faudra qu'elle soit vectorielle puisque je peux agir sur le mouvement de la bouteille avec une force qui est dans le sens de la bouteille, je la fais accélérer mais je peux aussi lui faire changer sa trajectoire en appliquant une force qui est orthogonal donc la force a vraiment une orientation c'est essentiel voilà donc la somme des forces peut se décrire géométriquement à l'aide de la loi du parallélogramme qui va vous paraître évidente aujourd'hui qui ne l'était pas du tout du temps de Stevin puisque du temps de Stevin le concept de vector n'existait pas mais il y avait des effets en composantes ce qu'affirme la règle d'addition des forces qui est tout simplement une règle de sommation de vectors c'est que si vous avez un objet assimilable un premier matériel P sur lequel s'exerce de force une force F A comme ceci une force F B comme cela pour trouver la force résultante ce qu'il faut faire c'est somme les forces on prend la force F A prend la force F B et puis on la translate la même orientation, la même norme et puis on a une vidéo d'un F C c'est évidemment commutatif on aurait pu commencer par F B d'accord et

notes

résumé

101m 58s



additionner F A on trouverait F C qui est évidemment orienté le long du parallélogramme généré par les 2 vectors forces bon pour rendre tout ceci un petit peu plus concret on va regarder un exemple qui se trouve sur la caméra numéro 1 ah j'y appuie sur la main non normalement ça doit être la première bon peu importe vous arrivez à le voir à distance ici vous avez là un système avec une force de 1 Newton qui est exercée sur le fil par le poids d'objet ok et puis vous avez ici 2 dynamomètres qui permettent de mesurer une force liée en fait où la déformation est l'astique il y a un ressort qui est caché derrière on voit les forces qui sont exercées ici le long des fils collinèrement au fil on a une force ici de 0,55 N une autre de 0,7 N bon ce qui est intéressant c'est qu'on peut prendre la première qui est ici qui serait notre force F A la force de tension le long du fil on aura un F B qui est ici et puis si on les dessine à l'échelle on peut faire la loi du parallélogramme et puis la force de tension qui est intéressante c'est qu'elle est orientée verticalement vers l'eau est-ce que quelqu'un voit pourquoi la force résultante liée à ces deux tensions doit être vertical exactement c'est ce que Stevan avait compris à l'époque la somme des forces à l'équilibre doit être nulle donc il faut nécessairement que si la résultante de ces deux forces nous donnent une force qui est verticale il en font une autre qui la compte et puis si on le rend s'il faut que leur somme soit nulle cette force est le poids de l'objet tout simplement Newton est partie de ce genre de considération celle de Stevan qui introduit ses forces et se dit tiens le concept de

notes

résumé

2.3.6 Deuxième loi de Newton

EPFL

- **2e loi de Newton :** Principia Mathematica

Les changements de mouvement sont proportionnels à la force motrice, et se font selon la ligne droite dans laquelle cette force est imprimée à l'objet.

Sir Isaac Newton
1643 – 1727



Traduction moderne :

La variation de quantité de mouvement d'un corps au cours du temps est due à la résultante des forces extérieures appliquées sur ce corps.

Modèle mathématique : présence de **forces extérieures**

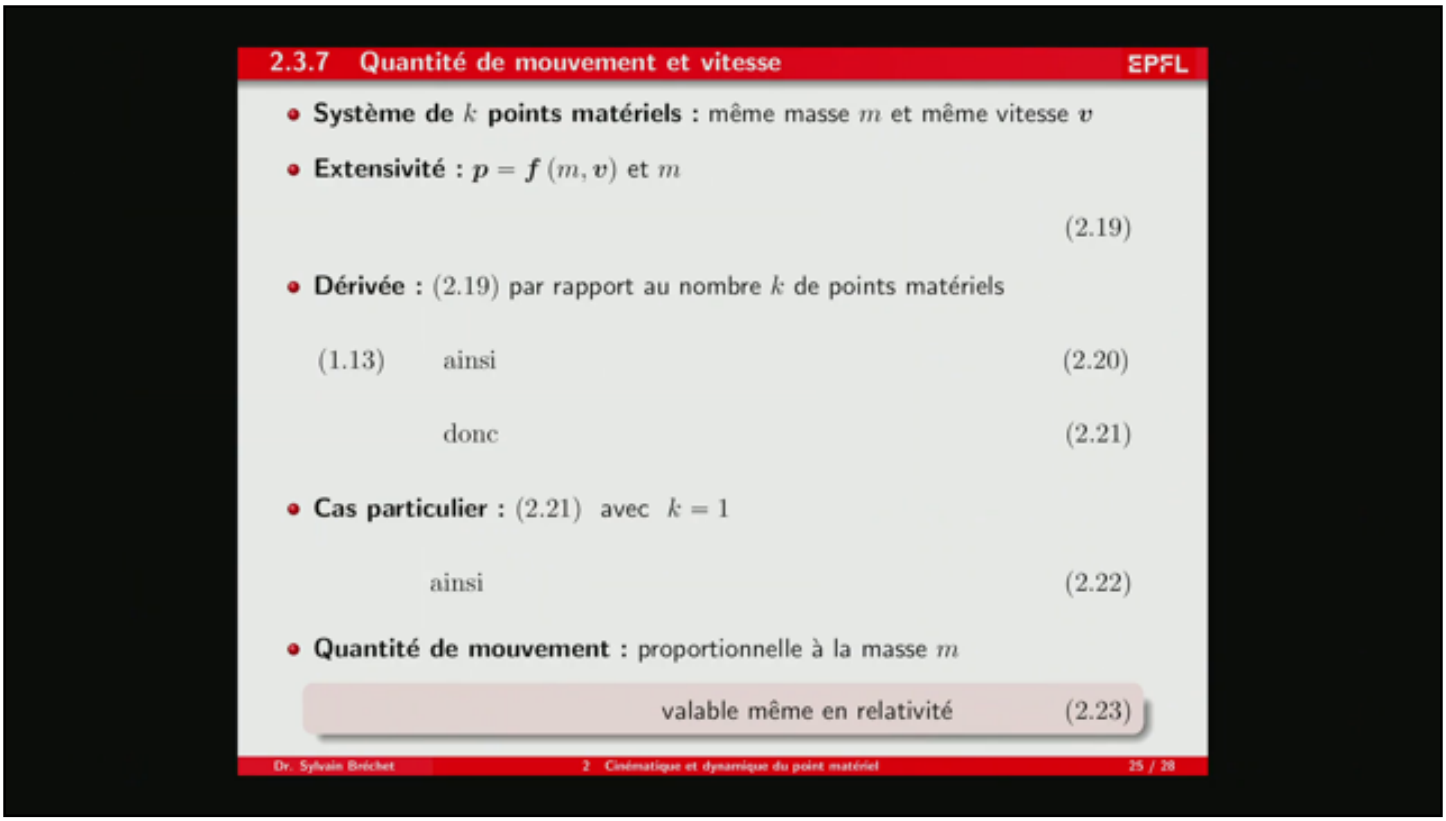
$$\tag{2.17}$$

1. Relation de cause à effet.
2. Conséquence de la $1^{\text{ère}}$ loi de Newton.

force il intervient pour décrire un état d'équilibre le cas statique et si ce même concept on pouvait le généraliser au cas dynamique alors comment il va faire il va le faire de la manière suivante on va pour l'instant pas lire l'énoncé de la 2e loi Newton on va résonner ensemble même si ça part à l'écran

notes

résumé

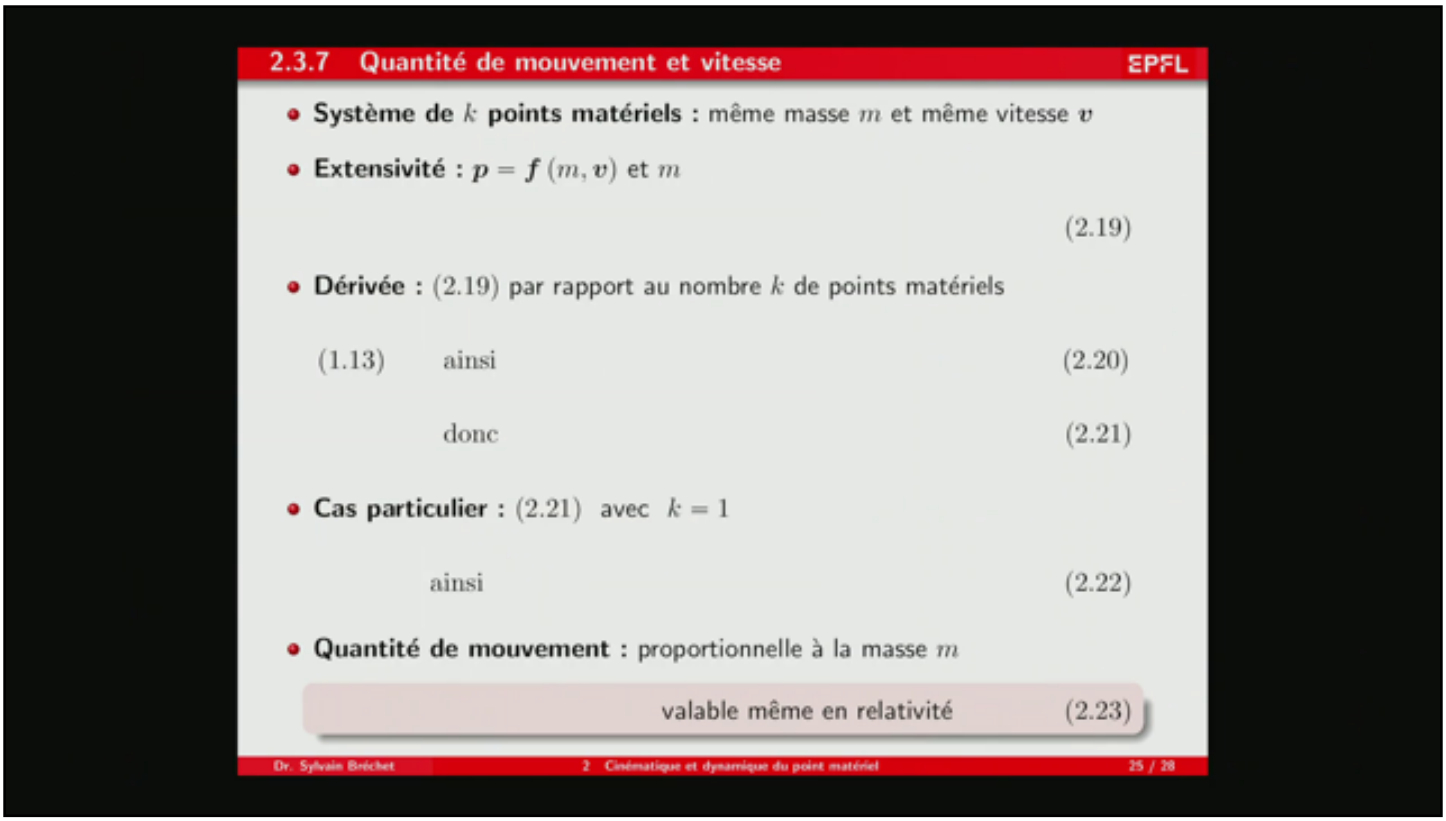


on va créer ensemble le modèle mathématique on va partir donc de la 1re loi Newton la 1re loi Newton nous dit que le mouvement naturel d'un corps c'est un mouvement à quantité de mouvement constante dans quel cas particulier dans le cas où la force résultante ou la somme vectorielle des forces au sens de Stevan est nulle très bien alors maintenant ou la somme vectorielle des forces est non nulle que va-t-il se passer ? clairement la conséquence c'est que la quantité de mouvement elle sera non nulle donc quelque part la somme des forces doit être liée à la variation de la quantité de mouvement qui va avoir lieu au cours du temps ce qui veut dire mathématiquement que à une constante prêts un facteur multiplicateur prêts la somme des forces extérieures quand on a un point matériel donc la somme des forces extérieures doit être liée à la dérivée temporelle de la quantité de mouvement et une constante prêts physiquement rien nous empêche de choisir la constante la plus simple une constante qui vaut 1 et donc on se retrouve avec la somme des forces extérieures qui est égale à la dérivée temporelle de la quantité de mouvement donc la 2e loi Newton est une conséquence nécessairement solide donc la somme des forces extérieures la 2e loi Newton est une conséquence nécessaire de la 1e loi Newton tout se cache dans la 1e loi Newton en réalité cette 1e loi Newton elle est exprimée par la marquise du Châtelet dans les Principia Mathematica de la manière suivante les changements de mouvement sont proportionnels à la force motrice, la force extérieure et se font selon la ligne droite dans laquelle cette force est imprimée à l'objet c'est-à-dire selon l'orientation donnée par la force extérieure, d'accord ? On pourrait traduire ceci dans des termes plus modernes et dire que la variation de quantité de mouvement d'un corps, qui

notes

résumé

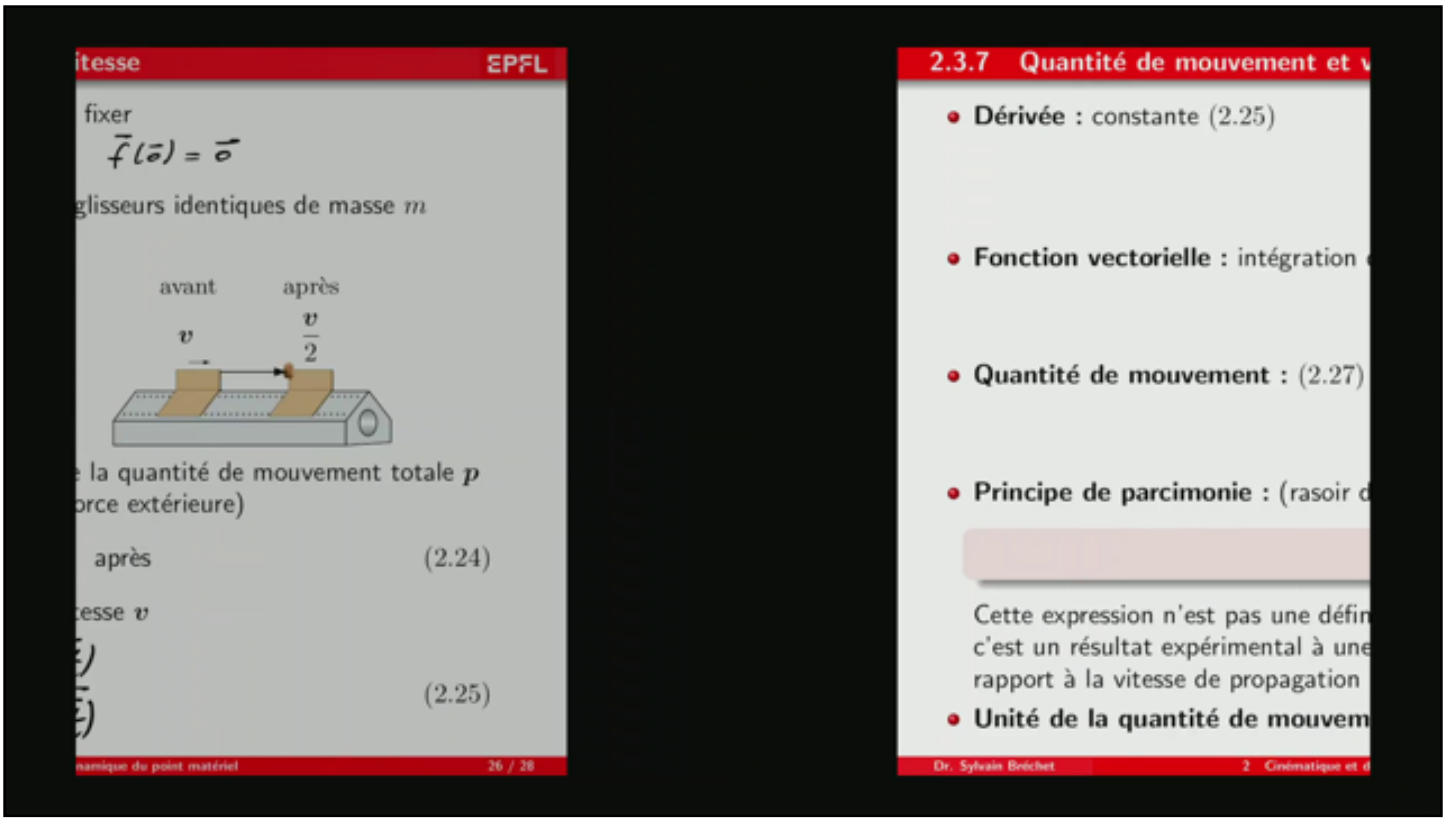
106m 3s



a lieu bien sûr au cours du temps, elle est le résultat de la résultante des forces extérieures qui vont être exercées sur ce corps. On a donc une relation de cause à effet. La cause elle est à gauche c'est la somme des forces extérieures qui va donner un mouvement différent de l'état de mouvement naturel le résultat c'est justement que le mouvement de l'objet va changer d'accord ? Donc on aura une dérivé temporelle de cette quantité de mouvement alors maintenant qu'on a fait ça on va être en mesure de répondre à une question

notes

résumé

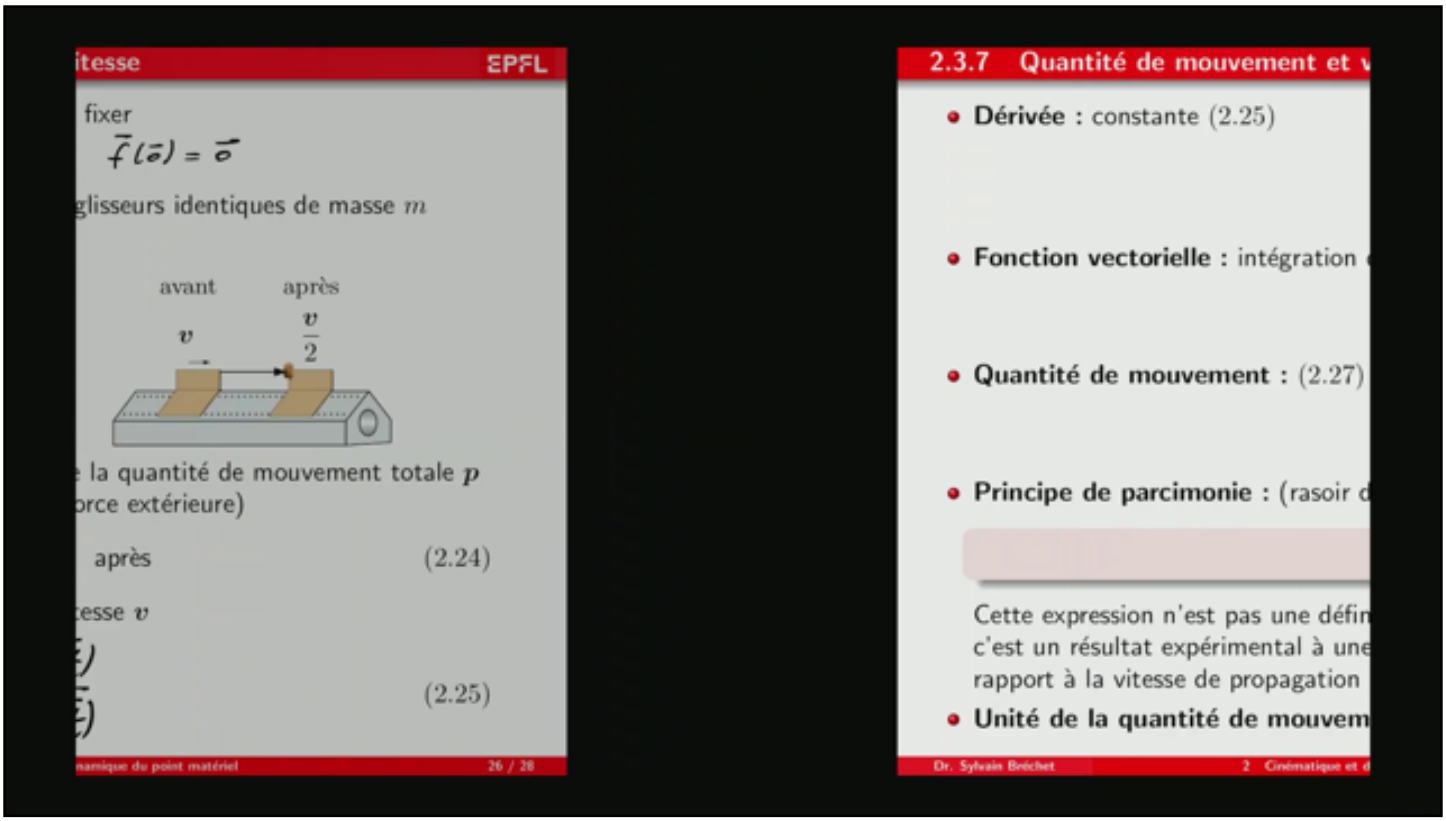


intéressante, quelle est le lien entre la quantité de mouvement, la masse et la vitesse pour s'en sortir on aura besoin de l'extensivité de la masse et de l'extensivité de la quantité de mouvement et donc on va choisir un système formé de K matériel identique et ils ont tous la même masse et la même vitesse. Imaginez que vous avez par exemple des moineaux qui se déplacent dans le ciel les moineaux ils ont tous la même masse et ils bougent de manière coordonnée avec la même vitesse, c'est ça qu'on parle alors quelle va être la quantité de mouvement total du système formé des K matériel des K moineaux la quantité de mouvement c'est une fonction vectorielle de la masse et de la vitesse. Donc la quantité de mouvement total sera une fonction vectorielle V de quoi de la masse totale. Les K pro-materiels ont la même masse la masse totale c'est K x la masse m d'un pro-materiel. Ils se déplacent à la même vitesse donc la vitesse de l'ensemble des moineaux c'est celle d'un moineau c'est la vitesse V, d'accord ? Comme la quantité de mouvement est extensive, la quantité de mouvement global de l'ensemble des K pro-materiels du système donc c'est K x la quantité de mouvement d'un seul élément donc la quantité de mouvement de l'ensemble des moineaux c'est K x la quantité de mouvement d'un moineau c'est K x F qui est fonction de M édouvée. Donc ce qui nous intéresse c'est de voir comment F évolue en fonction de M1 qu'est ce qu'on pourrait faire ? On pourrait regarder ce qui se passe lorsque K n'est pas un entier mais devient un réel si vous prenez pour K une valeur réelle, au lieu de prendre toutes les mêmes masses, vous prenez des masses légèrement différentes vous pouvez donc regarder comment F varie en fonction de K et dériver F par rapport à

notes

résumé

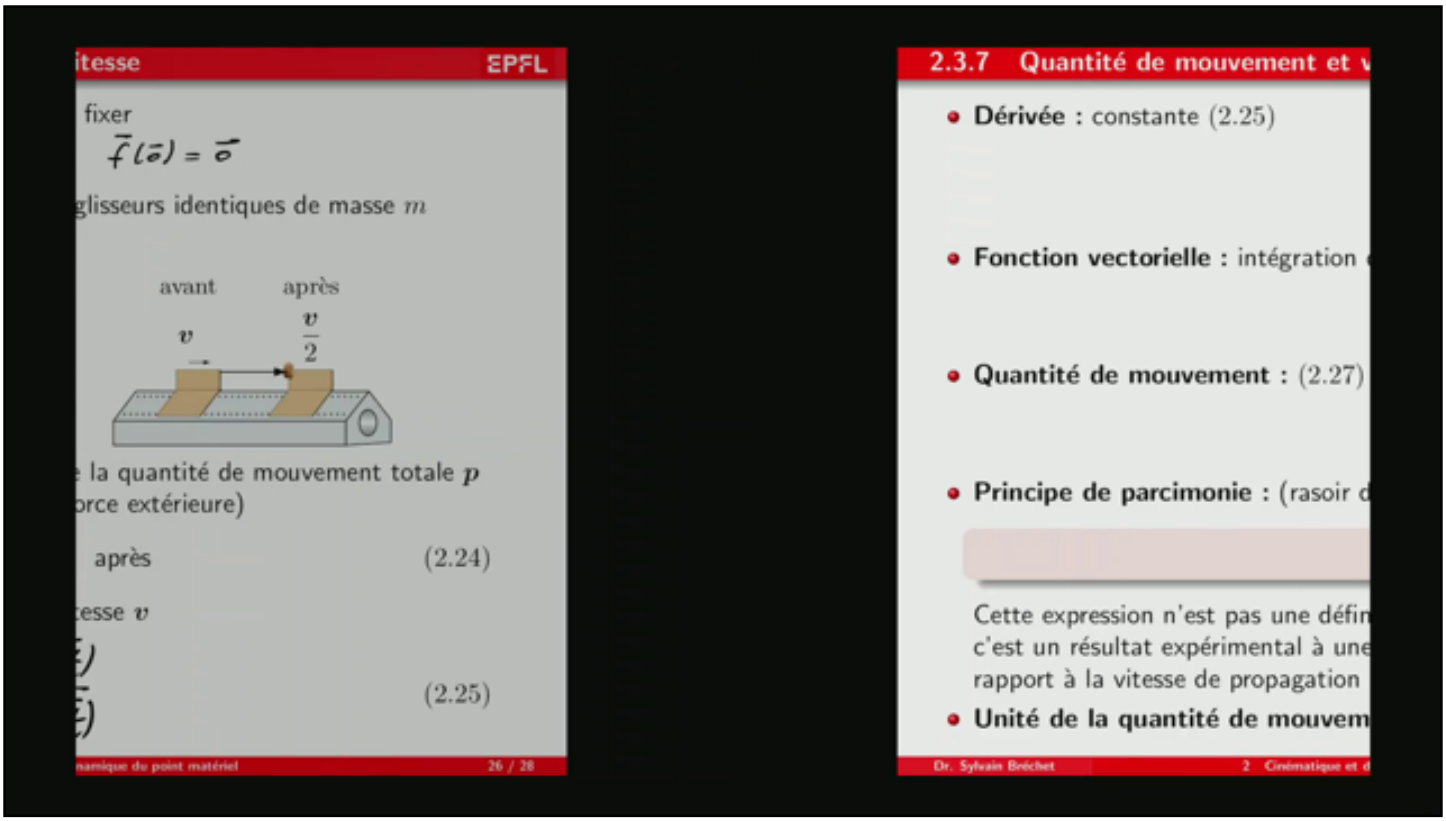
108m 30s



K. Attention K apparaît dans un argument de F dans un produit avec M donc il faudra d'abord prendre la dérivée extérieure de F fonction de KM et de V et on va dériver ceci par rapport à l'argument, premier argument de F par rapport à KM ensuite on aura la dérivée interne qui est la dérivée d'argument KM par rapport à K dans le membre de droite c'est beaucoup plus simple on a la dérivée de K par rapport à K il faut quand même l'écrire F qui est indépendant de K si vous prenez la quantité de mouvement d'un moineau elle ne dépend pas du nombre de moineaux alors maintenant la dérivée de K par rapport à K c'est 1, la dérivée de KM par rapport à K donc ceci se réduit à la dérivée de F fonction de KM et de V par rapport au produit de KFM bon la dérivée de KM par rapport à K c'est quoi ? c'est la masse M à droite on aura fonction de M et de V et ce résultat doit être vrai quel que soit le nombre de moineaux quelle que soit la valeur de K prenons un cas particulier qui va être éclairant prenons K égale 1 si K vaut 1 on se retrouve avec la dérivée de F fonction de M et de V dérivée par rapport à M qui est le rapport de F fonction de M et de V F est une fonction vectorielle qui a des composantes scalaires qu'est ce qu'on est en train de dire ? on a une fonction F de M qui est telle que sa dérivée c'est le rapport de la fonction en un point de née divisé par la variable donc c'est le rapport d'un énivération sur la distance horizontale par rapport à l'origine pour que ça fonctionne toujours il n'y a qu'une seule solution possible c'est que la

notes

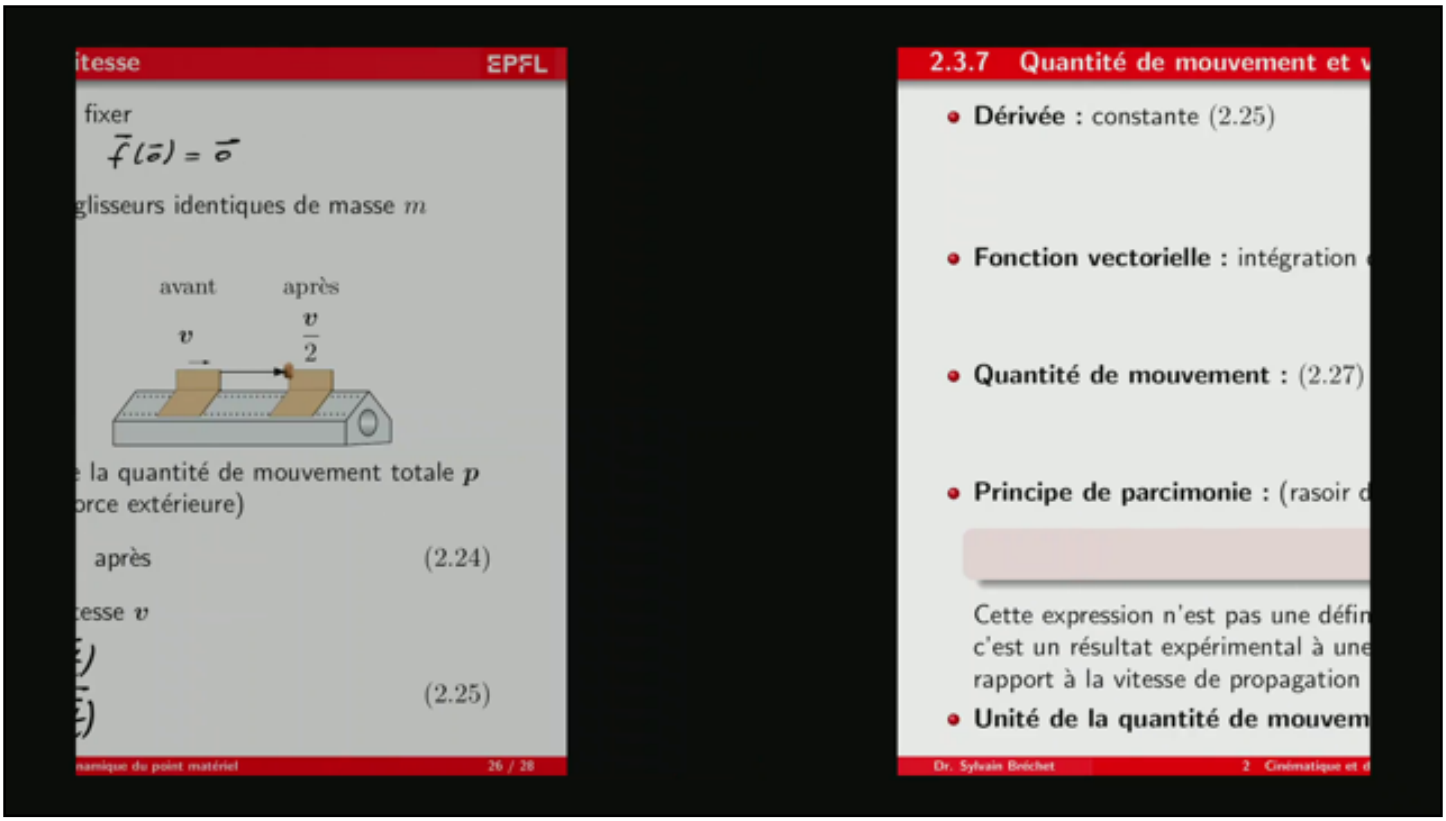
résumé



dérivée soit la même partout qu'on se retrouve avec une droite et donc forcément la quantité de mouvement cette fonction vectorielle de M et de V doit être proportionnelle à M donc P qui est une fonction vectorielle de M et de V ça doit être le produit de la masse fois une fonction vectorielle de la vitesse et ça c'est un résultat génial puisque c'est exactement la structure qu'on retrouve partout en physique que ce soit en relativité ou en mécanique classique pourquoi ? il y a une exception c'est les particules non massives mais je vous englisserai quelques mots tout à l'heure mais P est donc proportionnelle à M en relativité P s'écrit M fois V divisé par la racine carré de 1 moins V carré sur C carré donc c'est pas MV là on a dit que c'est une fonction vectorielle de la vitesse donc c'est complètement général on a utilisé des arguments liés à la physique de manière générale les propriétés complètement fondamentales des grandeurs physiques maintenant pour aller plus loin pour répondre à la question mais que va représenter cette fonction de la vitesse concrètement eh bien il faut faire on est obligé de passer par une expérimentation à une vitesse qui est petite par rapport à la vitesse de propagation de la lumière dans le vide d'accord ? alors il y a encore une dernière chose à faire c'est de placer l'origine dans la 2e langue Newton on nous dit que la somme des forces extérieures c'est la dérivé temporelle la quantité de mouvement donc vous pouvez dans tous vos modèles physiques ajouter une constante à la quantité de mouvement vous avez exactement la même physique la quantité de mouvement est définie à une constante vous pourriez avoir une physique pour laquelle pour l'état de repos vous avez une quantité de mouvement constante ça serait faisable c'est pas très judicieux le plus simple quand

notes

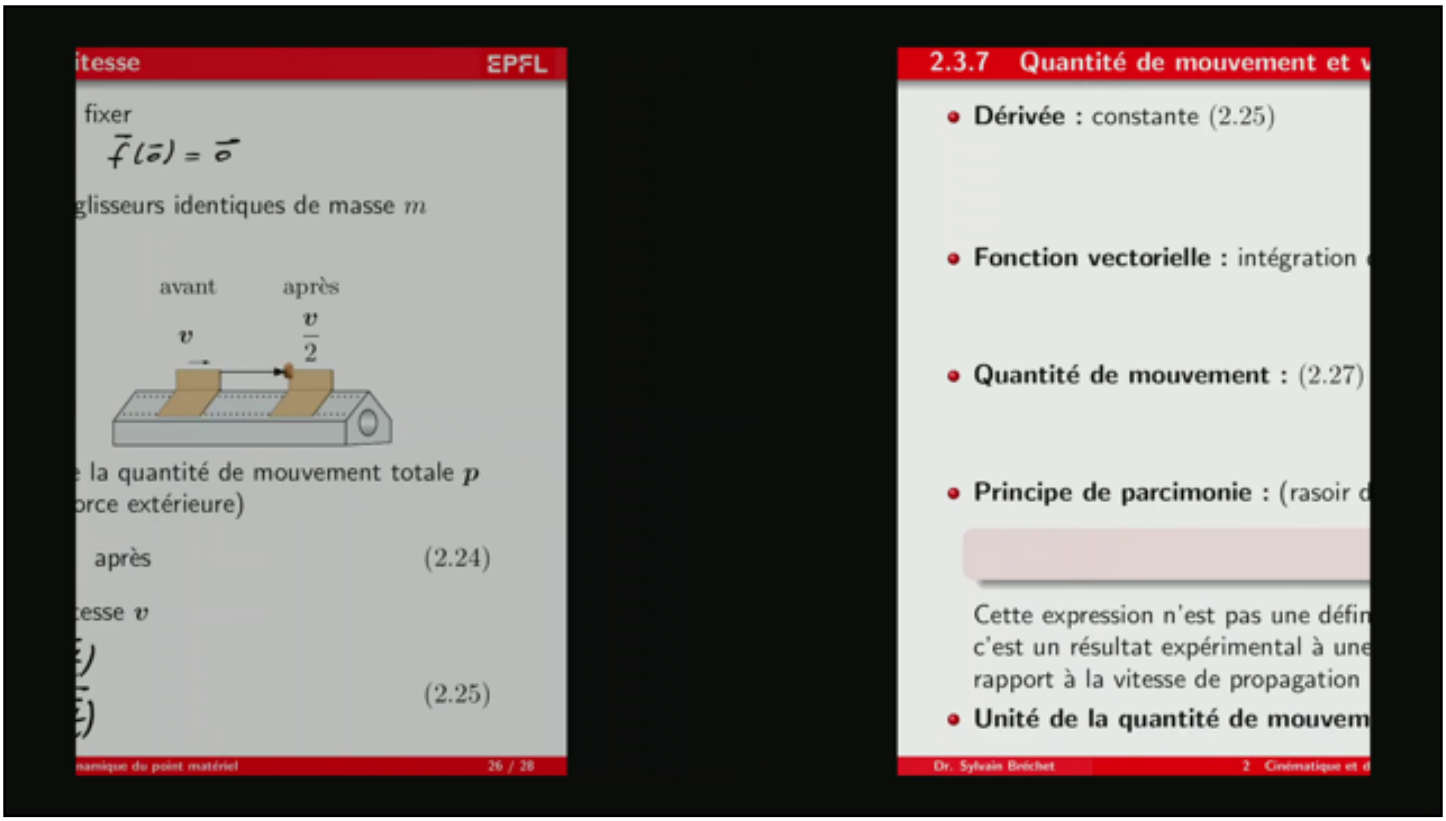
résumé



même c'est assez logique c'est de considérer que la quantité de mouvement est nulle si la vitesse est nulle on appelle ceci un choix de jauge donc si la vitesse est nulle on va donc convenir que la quantité de mouvement p est nulle et ça c'est ce que tout le monde fait on va faire pareil si on fait ceci alors on arrive à la conclusion que f de 0 f de v égale 0 est égal à p qui est égal à une constante près qui est la masse qui est donc égal à 0 maintenant on y coupe pas on va devoir faire une expérience pour répondre à la question de savoir quelle est la forme de la quantité de mouvement en termes de la masse et de la vitesse quelle est cette fonction vectorielle de la vitesse comment faire on va prendre un choc mou entre deux glisseurs on va prendre un premier glisseur au bout duquel on a une pointe qui est fixée sur le deuxième glisseur les glisseurs vont rester attachés l'un à l'autre après la collision alors ce qui va se passer c'est qu'il n'y a aucune force extérieure au système formé des deux glisseurs qui vont intervenir parce que les poids des deux glisseurs sont compensés par les forces de réaction normales les frottements sont négligeables et donc si la somme des forces extérieures est nulle ça veut dire que la quantité de mouvement p doit être conservée elle est la même avant et après le choc concrètement la quantité de mouvement avant le choc c'est le produit de la masse du glisseur fois cette fonction vectorielle de la vitesse v après le choc on aura la masse totale du système formé des deux glisseurs deuxième fois une fonction vectorielle de la vitesse qu'on va trouver après le choc pour l'instant on n'a connait pas le résultat expérimental donc faisons l'expérience alors

notes

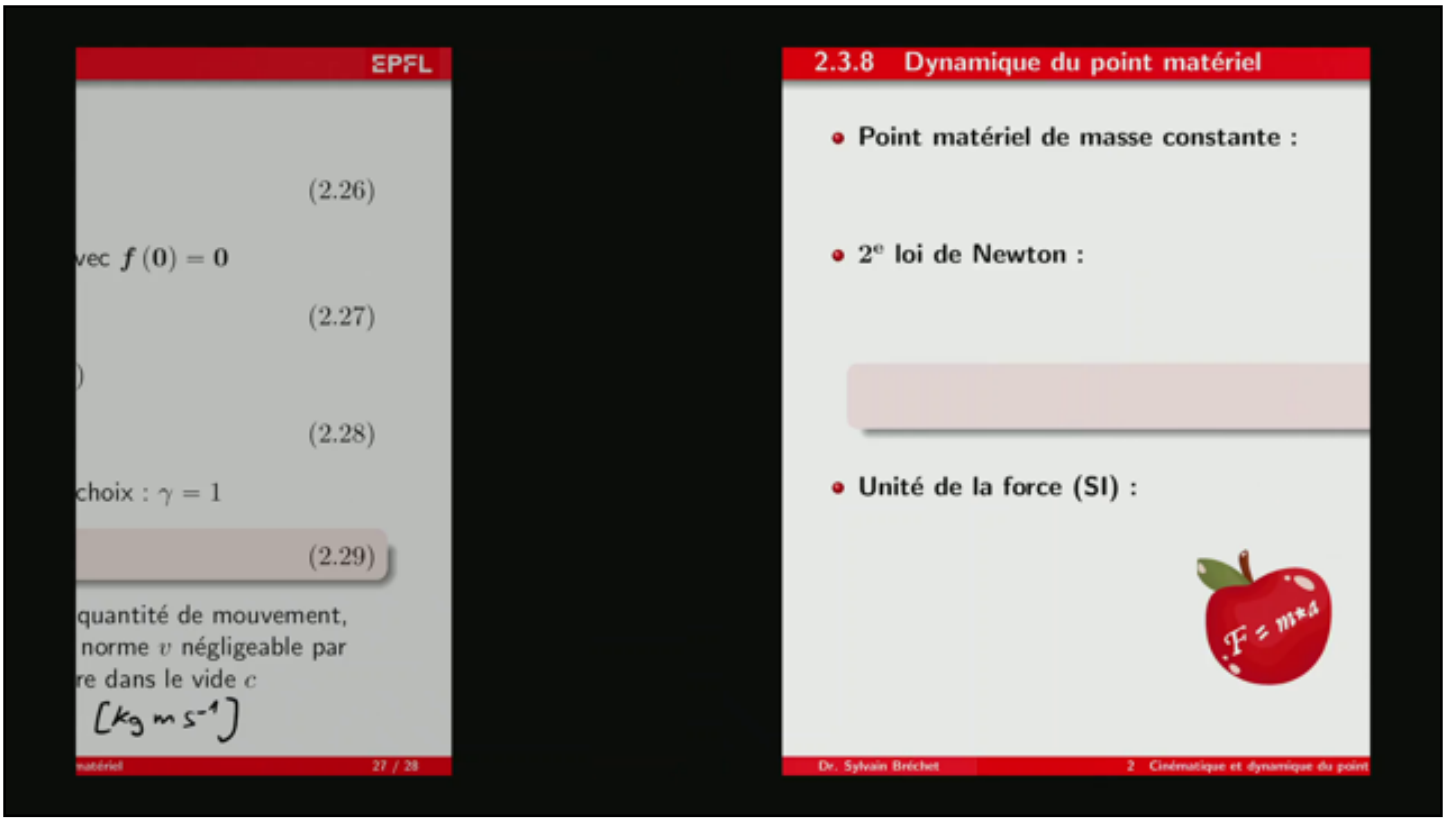
résumé



ce que je vous demanderai de faire c'est de regarder à l'œil nu je vais vous donner le résultat d'expérience et puis vous essérez de le visualiser le premier glisseur celui qui est à votre gauche se va se déplacer initialement avec une vitesse disons v et ce que vous allez voir c'est que l'ensemble après la collision se déplace à une vitesse qui est la moitié de la vitesse initiale du glisseur incident alors c'est pas parfaitement horizontal mais quasiment ok vous êtes prêts ? si on avait proprement mesuré ça avec des cellules on verrait que la vitesse finale est la moitié de la vitesse initiale bon alors maintenant transcrivons ce résultat expérimental la vitesse finale et la moitié de la vitesse initiale on peut diviser par la masse et là on peut dériver par rapport à la vitesse donc on a la dérivée de cette fonction vectorielle de la vitesse par rapport à la vitesse qui va être 2 fois la dérivée de cette fonction vectorielle évaluant la moitié de la vitesse v qu'on va dériver par rapport à la vitesse v oui mais 2 au numérateur c'est 1 demi au dénominateur et 1 demi de dv c'est d2 v sur 2 donc ceci on peut le récrire comme la dérivée de la vitesse évaluée en v sur 2 par rapport à v sur 2 qu'est ce qu'on est en train de dire ? on prend une fonction vectorielle de la vitesse et on voit que la pente pour une valeur quelconque de la vitesse prenez celle que vous voulez est égale à la pente que vous avez localement pour la moitié de cette vitesse quelle que soit les vitesses choisies il n'y a qu'une seule possibilité cette fonction vectorielle de la vitesse doit être proportionnelle à la vitesse

notes

résumé

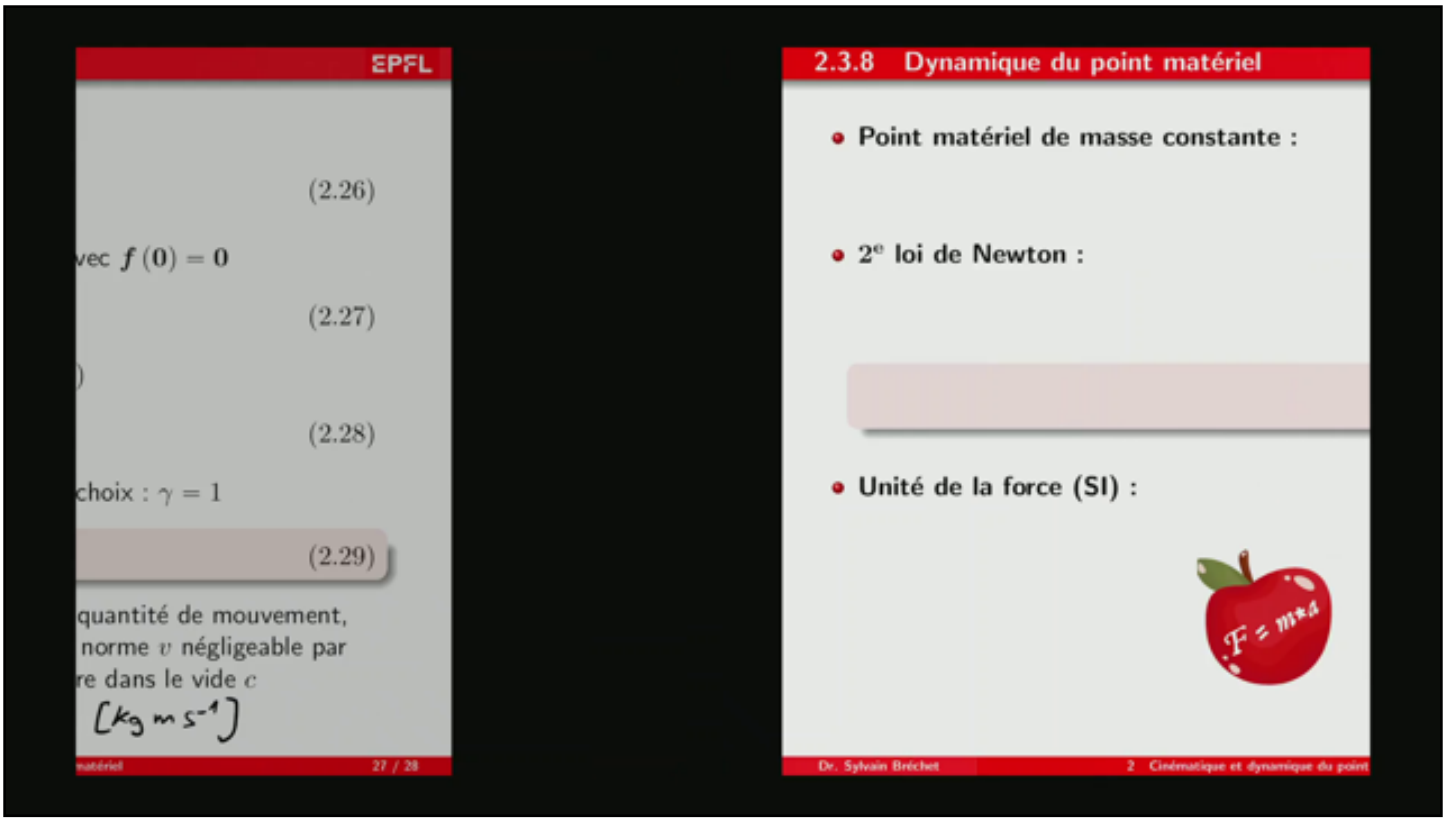


d'accord ? donc la dérivée de f de v par rapport à v doit être égale à gamma qui est ici une constante d'accord ? ce qui veut dire que f de v c'est gamma ici gamma est constant en relativité gamma n'est pas constant gamma serait le facteur le facteur de dilatation du temps qui est 1 sur la racine carrée de 1 moins v carrée sur ces carrés donc la quantité de mouvement p c'est 3f de v c'est à dire que c'est gamma fois mv alors là partons de là qu'est ce qu'on fait rien nous empêche physiquement de donner une dimension physique au paramètre gamma mais ça ne servirait à rien pourquoi est ce qu'on ferait ça ? le plus simple serait de lui donner aucune dimension physique de considérer comme un paramètre et puis on peut donner au paramètre la valeur qu'on veut mais bon on aimerait quand même une quantité de mouvement qui soit orientée dans le même sens que la vitesse donc ça serait bien de prendre un paramètre gamma strictement positif d'accord ? et puis on pourrait lui donner la valeur par exemple la valeur de Pi pourquoi pas on pourrait lui donner toute autre valeur, une autre constante par exemple mais finalement le plus simple et ça c'est un choix philosophique c'est d'utiliser ce qu'on appelle le rasoir d'Ocam le principe de parsimony à gamma la valeur la plus simple qu'on puisse lui donner ce qui est 1 et si on fait ce choix là on se retrouve avec la quantité de mouvement P qui se réduit alors au produit de la masse pour la vitesse et souvent dans les cours c'est présenté comme une définition de la quantité de mouvement non c'est un résultat théorique et expérimental à faible vitesse qui permet d'arriver à cette expression là donc maintenant on est capable de répondre à la question de savoir quelle

notes

résumé

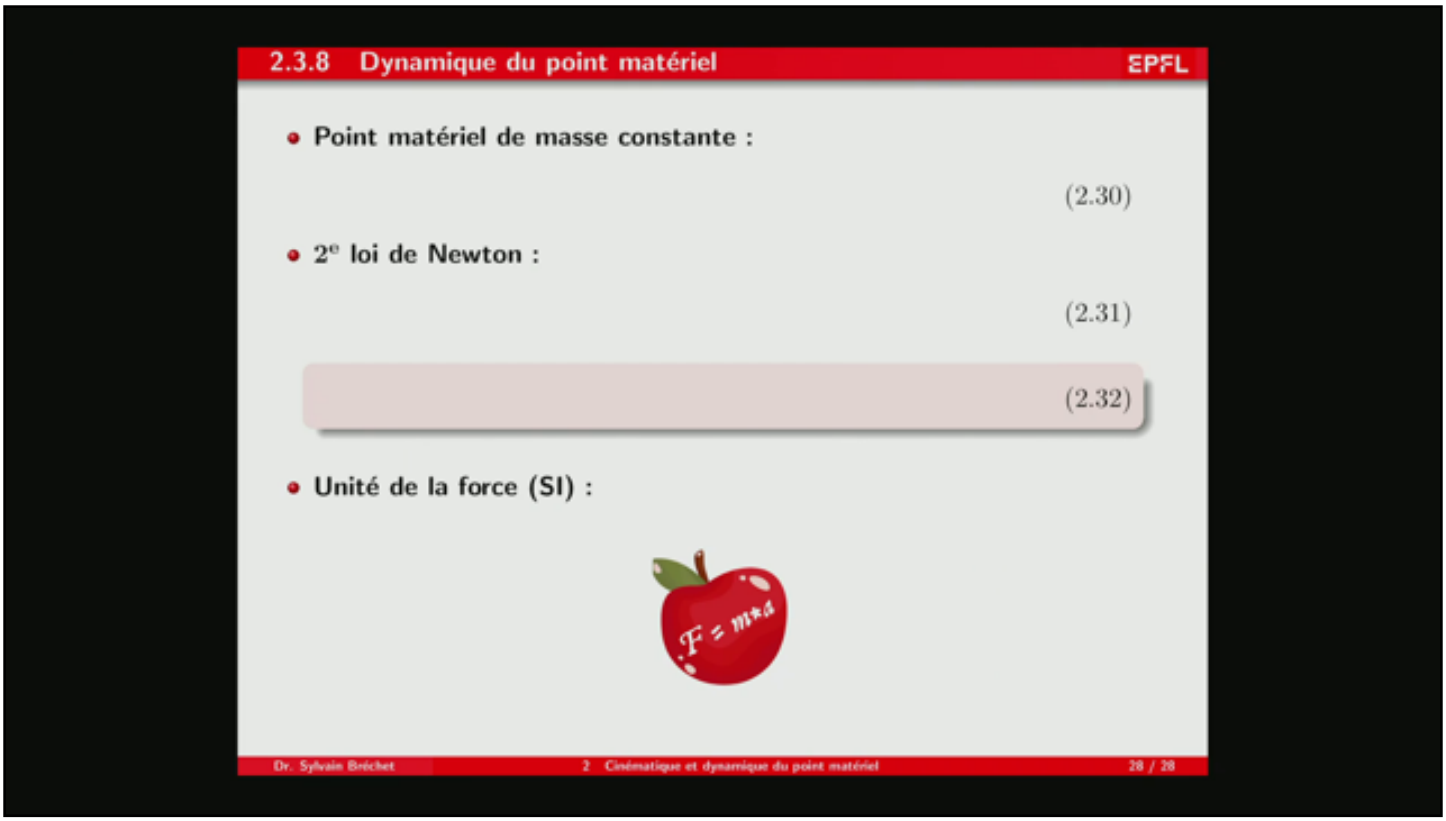
118m 22s



est l'unité de la quantité de mouvement et bien c'est le produit d'une masse pour une vitesse donc ce sont donc des kilogrammes fois des mètres divisé par des scores d'accord ok alors maintenant on peut nouer la gerbe et revenir sur

notes

résumé

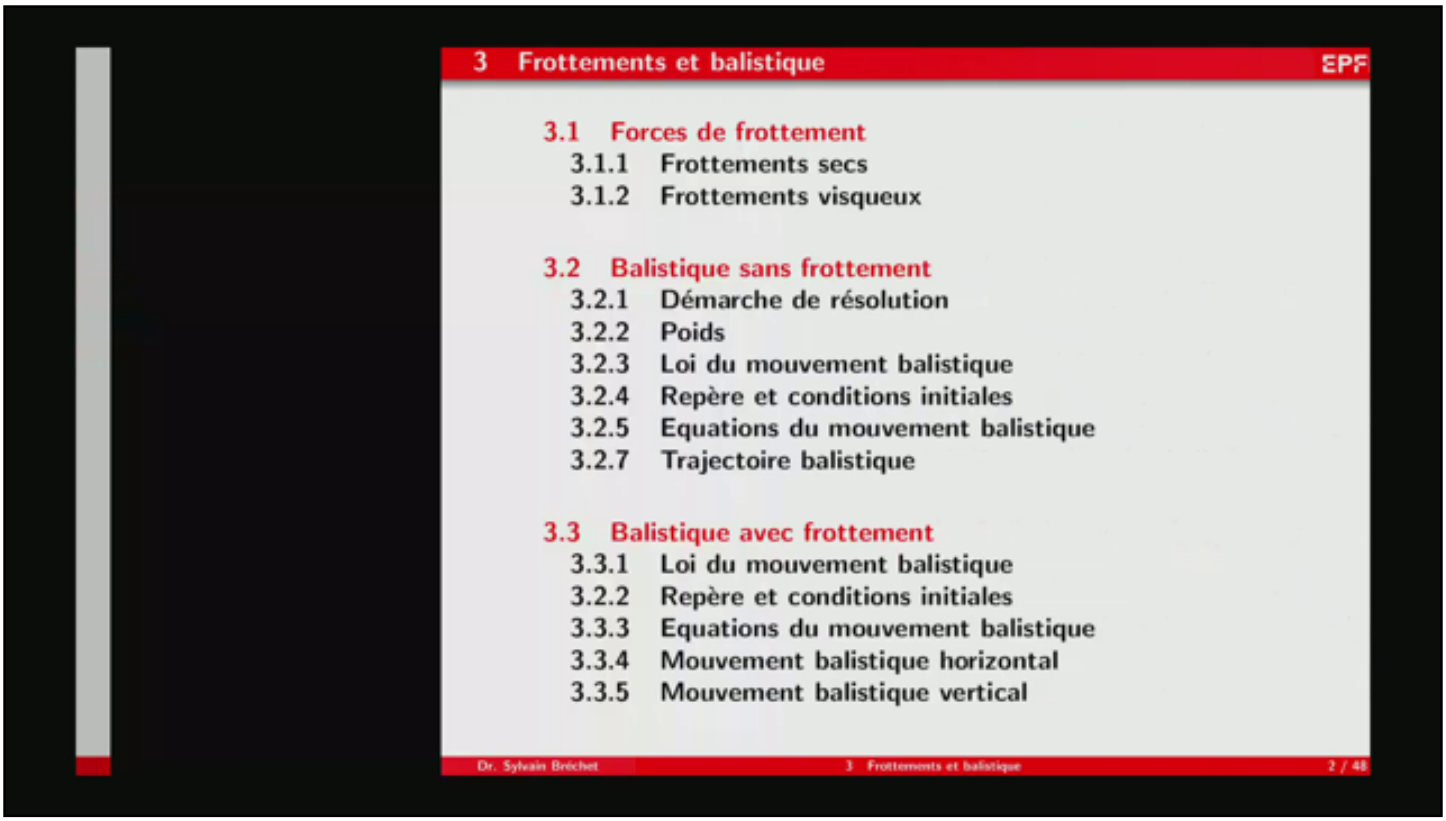


la deuxième loi de Newton

notes

résumé

120m 37s

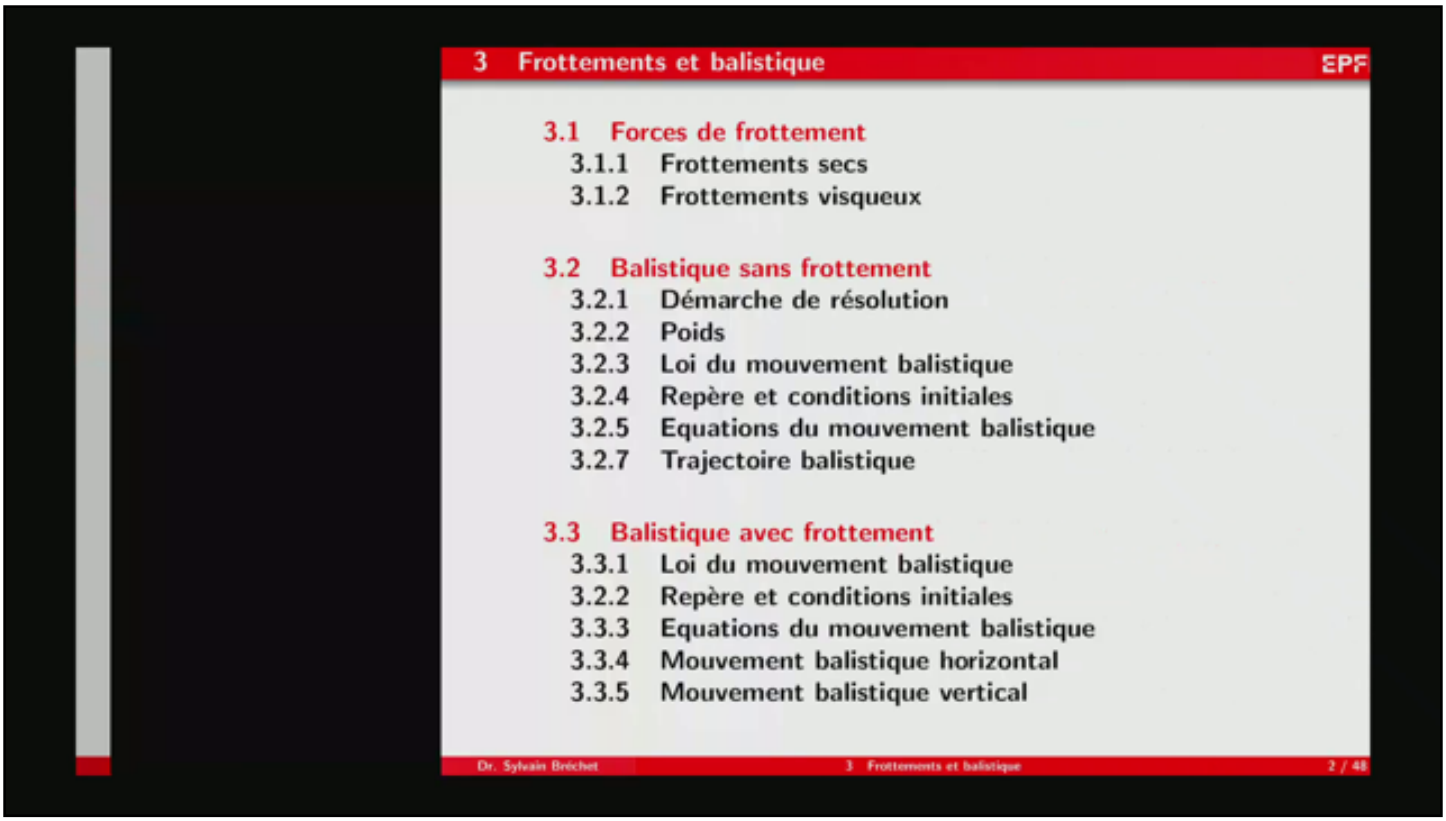


et l'adapter au cas d'un premier matériel qui se déplace à vitesse suffisamment faible par rapport à la vitesse de la lumière pour que sa quantité de mouvement soit le produit de la masse pour la vitesse pour un point matériel on considéra que la masse m est une constante bon si la masse est constante il est clair pour tout le monde que si on la dérive par rapport au temps on trouve zéro très bien revenons donc sur la deuxième loi de Newton qui nous dit que la somme des forces extérieures c'est la dérivée temporelle de la quantité de mouvement alors maintenant cette quantité de mouvement c'est le produit de la masse fois la vitesse la semaine passée tout à la fin des applications de cours on a vu que si on avait le produit de deux fonctions du temps la dérivée temporelle de ce produit c'est la dérivée temporelle du premier terme fois la deuxième plus de premier terme fois la dérivée temporelle du deuxième on aura donc m point qui multiplie v plus m fois v point or m point est nul puisqu'on a un premier matériel la masse est constante donc le premier terme disparaît il reste con le deuxième qui est le produit de la masse fois la dérivée temporelle de la vitesse et il est clair pour tout le monde que la dérivée temporelle de la vitesse c'est l'accélération merci beaucoup et donc comme vous en doutez la somme des forces extérieures c'est le produit de la masse fois l'accélération si et ça c'est la condition cinécoinone si et pour autant que la masse soit une constante d'accord ? donc ça c'est la formule qu'on va appliquer le plus souvent dans ce cours mais si je vous avais simplement dit la somme des forces extérieures c'est le produit bon vous m'auriez dit c'est joli mais ça vient d'où ? comment est-ce qu'on

notes

résumé

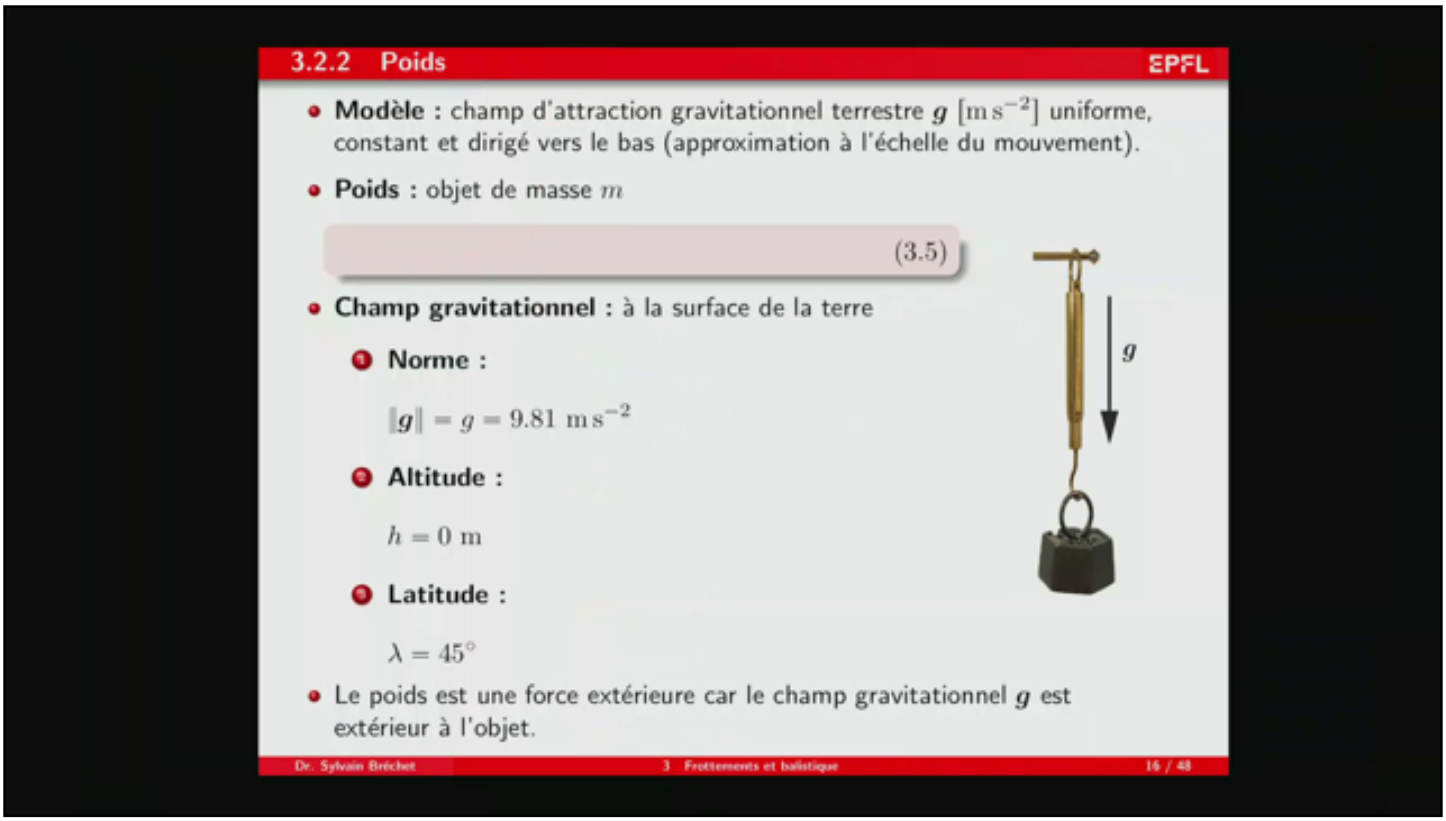
120m 38s



l'obtient ? qu'est-ce que ça signifie ? dans quel contexte ça s'applique ? comment le comprendre ? et bien on a répondu à toutes ces questions la physique se trouve pas dans la description purement mathématique d'un phénomène elle se cache dans la sémantique des parties qui interviennent qui sont symbolisées par des lettres d'accord ? donc si on sait pas que c'est qu'une force, qu'on sait pas que c'est qu'une masse qu'on sait pas que c'est qu'une accélération écrire que la somme des forces extérieures c'est le produit de la masse pour la vitesse c'est du vocalement voilà on l'apprend et c'est tout donc là on veut comprendre ce qui se passe et ce qu'on a fait aujourd'hui maintenant, l'unité liée à la force c'est le produit des unités liées à la masse dans le système des unités internationales les kilogrammes fois l'unité liée à l'accélération qui est évidemment une distance divisée par un temps au carré c'est des masses des mètres divisés par des secondes au carré cette unité est tellement importante qu'elle porte un nom le nom de Newton lui-même c'est des Newton c'est tout pour le chapitre 2 ce que j'aimerais faire, pour la théorie du chapitre 2 ce que j'aimerais faire encore rapidement dans cette fin de cours, c'est deux choses j'aimerais rapidement vous présenter le modèle du point dont vous aurez besoin en exercice vendredi c'est pas très compliqué vous connaissez déjà à peu près la réponse on va mettre les formes dans le contexte donc on va prendre les notes liées au 3ème chapitre de cours ok ? et on va aller à la page

notes

résumé

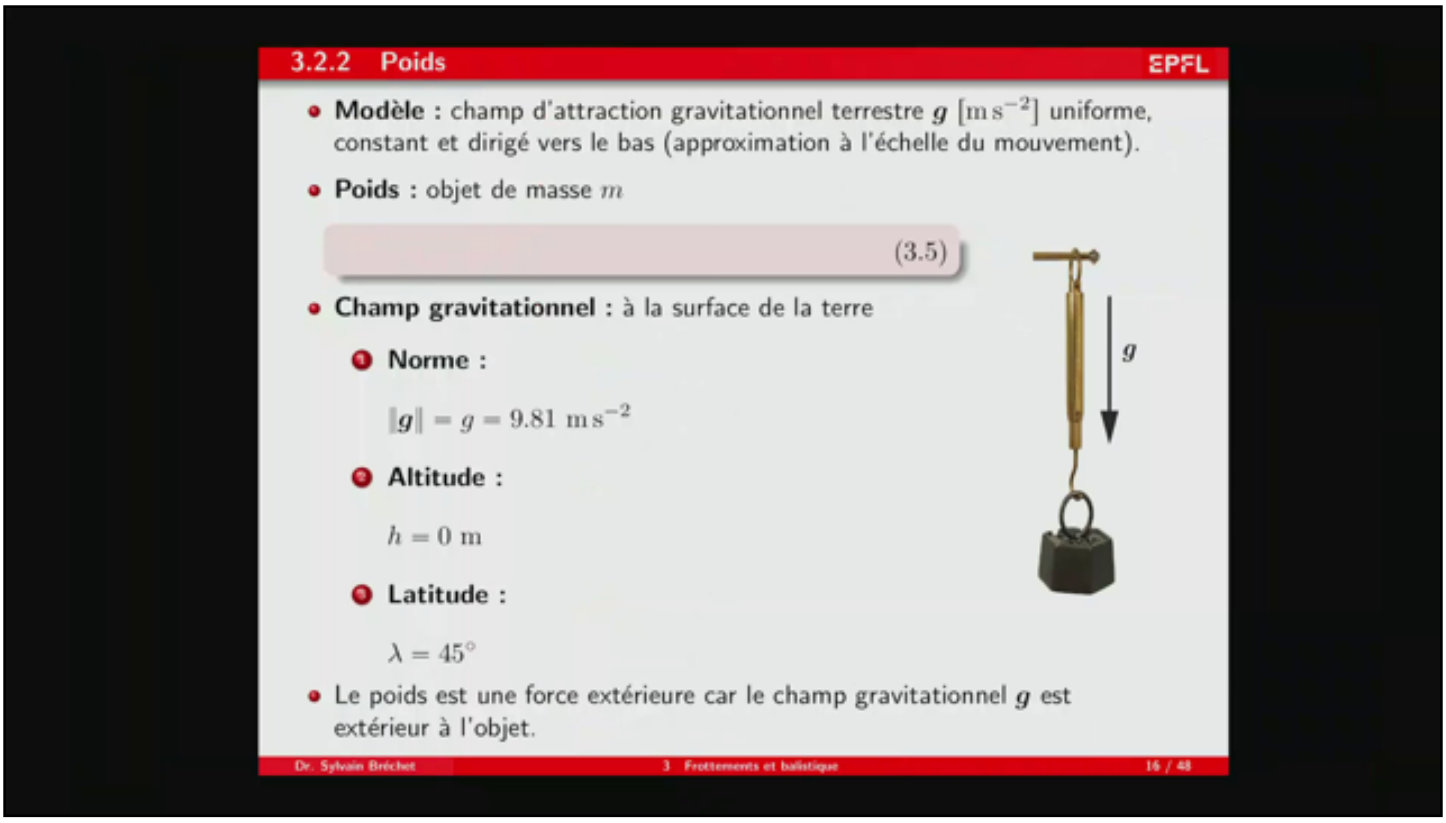


on va aller à la page 16 donc on va établir ensemble le modèle du poids voilà si vous prenez un objet comme cette bouteille d'avion si je le lâche qu'est ce qui se passe ? il est sujet à son propre poids qui génère une accélération constante orientée vers le bas c'est celle du champ gravitationnel terrestre c'est vrai mais pourquoi ? d'accord ? parce que la force de gravitation universelle qu'on établira ensemble au chapitre 9 nous dit que la force de gravitation universelle est proportionnelle au produit des masses celle de la Terre qui est l'attracteur celle de l'objet divisé par le carré de la distance qui les sépare très bien c'est quoi à peu près le rayon de la Terre ? est-ce que quelqu'un a une idée ? oui ? ouais c'est 6800 km à peu près maintenant si vous vous déplacer disons sur quelques centimètres quelques mètres comme c'est auditoire voire quelques dizaines centaines de mètres même vous allez disons au sommet du Mont Blanc vous allez à 4800 mètres eh bien le déplacement va être à peu près négligeable par rapport à la distance qui sépare l'objet du sang de la Terre donc le carré de la distance qui apparaît au dénémiateur est constant la masse de la Terre est constante le facteur de proportionnité qui apparaît qui est la constante de la gravitation universelle est constant aussi donc on va pouvoir dire que ce qui multiplie la masse de l'objet c'est une grandeur constante on génère une force on a un vecteur donc une force c'est le produit d'une masse il faut une accélération donc l'accélération liée à la force de gravitation universelle est constante c'est le champ d'attraction gravitationnelle on peut donc dire que le poids P c'est le produit de la masse faut le changer on parle de champ ça veut dire quoi un champ c'est un concept qui va être

notes

résumé

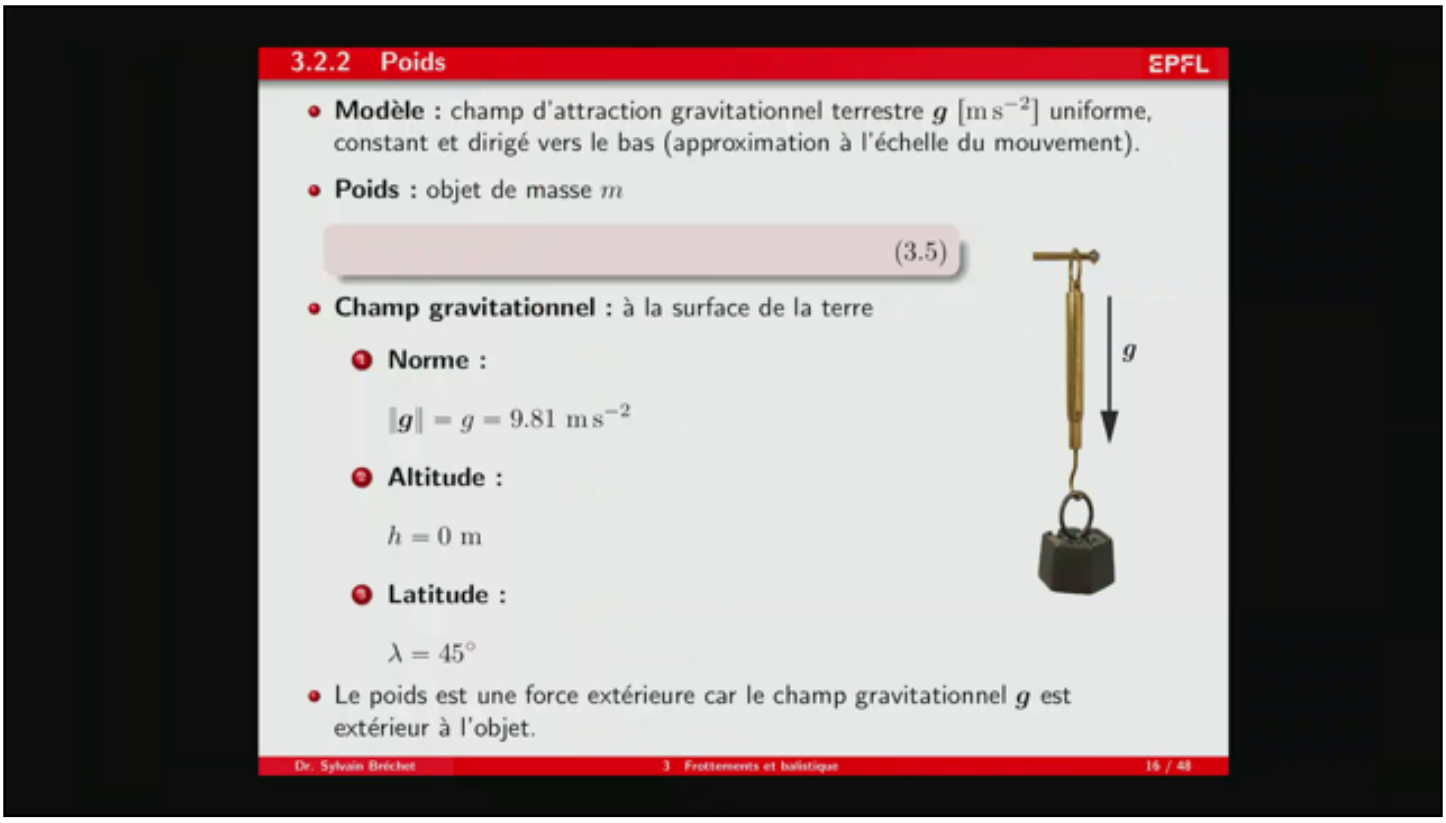
123m 49s



très utile en maths en physique aussi déjà au deuxième semestre avec le champ électrique et le champ magnétique un champ si vous pensez à l'agriculture prenez un champ de blé prenez un champ de blé au mois de juillet juste avant que la moissonneuse batteuse récupère les épis d'accord ? donc vous imaginez que vous avez une surface complètement plane ok ? le paysan a bien fait son travail et vous avez des beaux épis de blé qui ont à peu près tout ça même longueur d'accord ? et qui au soleil et au zénit sont orientés vers l'eau ce qui veut dire qu'en chaque point du champ vous allez vous retrouver si vous prenez un vecteur que vous orientez le long de l'épi avec des vecteurs qui sont orientés verticalement vers l'eau qui ont tous exactement la même norme et la même orientation ça c'est un champ vectoriel bidimensionnel le champ gravitationnel c'est un champ vectoriel tridimensionnel donc maintenant si vous prenez le volume qui est au voisinage de nous par rapport à une description de la Terre pris dans son ensemble donc sur quelques kilomètres d'accord ? le rayon de courbure de la Terre est en de 6800 km on peut considérer que cette courbure est quasiment nulle localement on fait tant de rayons de courbure vers l'infini puis on a vraiment quelque chose qui est complètement plat donc on se retrouve avec des vecteurs champs gravitationnels qui ont tous la même norme qui en tout point sont orientés vers le bas et ceci en tout point du volume c'est ça le champ gravitationnel terrestre alors qu'elle est sa norme à la surface de la Terre eh bien sa norme va dépendre de l'angle de la latitude d'accord ? elle va dépendre évidemment de l'altitude bon prenons comme référence le niveau de la mer ici on est à 400 mètres par rapport à 6800 km c'est pas

notes

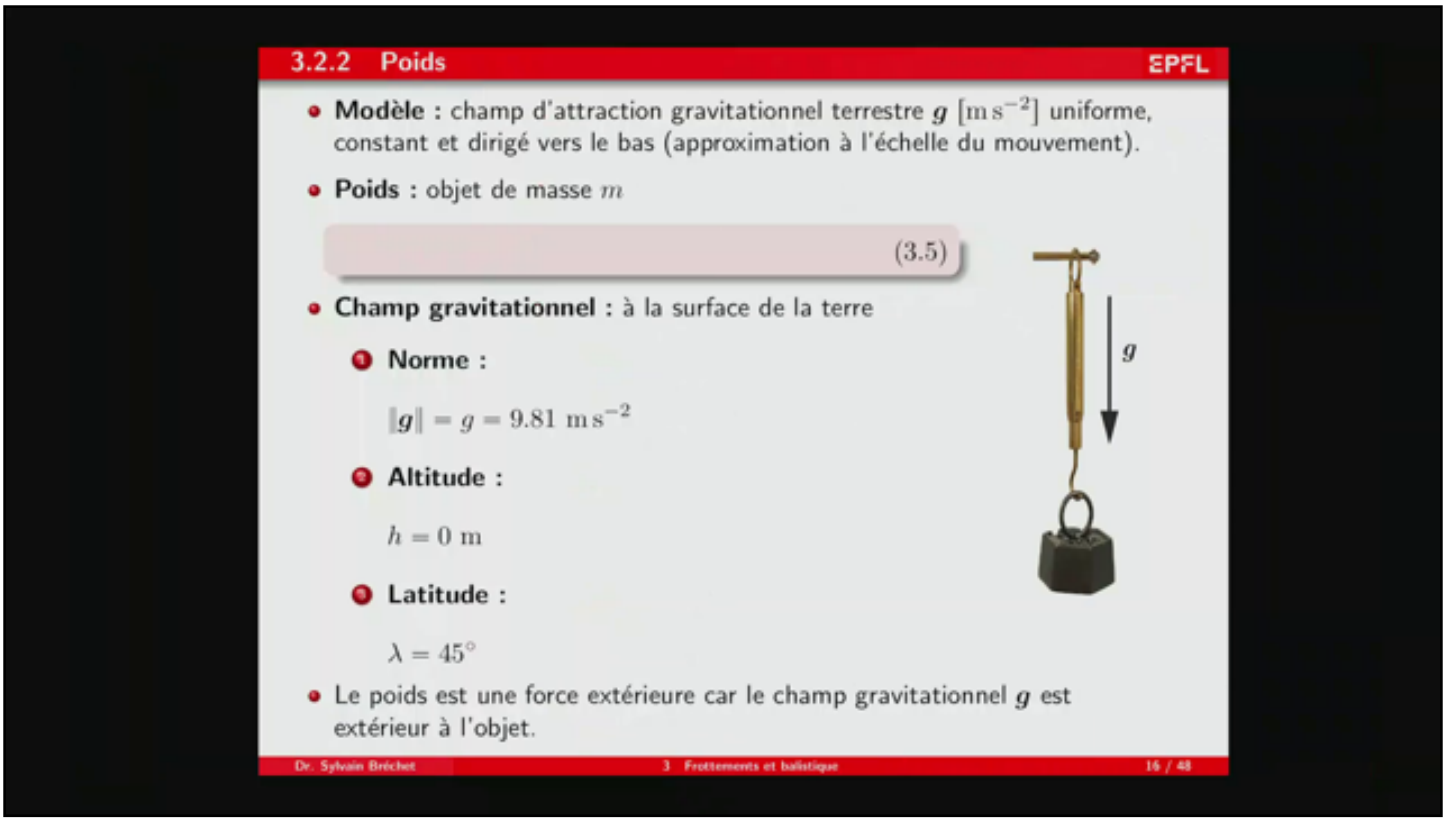
résumé



une grande différence donc on se retrouve avec un champ gravitationnel expérimental qui est de l'ordre de 9,81 mètres par seconde car est souvent on prend 10 pour simplifier les calculs cette valeur a été pris pour un angle de latitude qui est à mi-chemin entre l'équateur et le pôle nord donc de 45 degrés à l'ozane on est à 46,1 s'offreur donc on est assez voisins de 45 de toute façon ok ? alors il me reste encore 5 minutes j'aimerais rapidement, je vous parlais des profs d'analyse et je vais vous raconter une anecdote, c'est une petite histoire vous avez 2 profs d'analyse qui vont manger en sang et puis il y en a un qui est pessimiste qui dit à l'autre écoute c'est absolument affolant le niveau de mathématiques dans la population en général ils sont de plus en plus mauvais, ils comprennent rien calcul différentiel intégral, personne les connaît enfin c'est terrifiant, c'est terrifiant aujourd'hui et l'optimiste lui dit non, tu bois quand même du noir faut pas exagérer, la situation n'est pas glorieuse mais enfin elle n'est pas si catastrophique, enfin quand même et puis finalement l'optimiste propose un marché au pessimiste il dit tout à l'heure je ferai venir la serveuse et puis je lui pose une question et puis si elle répond correctement à ma question de math c'est toi qui règle l'addition sinon c'est moi qui la règle alors le pessimiste passe vite au petit coin pendant qu'il passe au petit coin l'optimiste fait venir la serveuse il dit écoutez mademoiselle, est-ce que vous avez envie de gagner 20 francs bon écoutez, tout à l'heure je vous poserai une question et vous auriez qu'à répondre x² d'accord ? non pardon, vous auriez qu'à répondre une demi de x² et puis très bien la serveuse accepte le marché le pessimiste revient, il s'assied à table l'optimiste dit, est-ce qu'on mène notre pari à

notes

résumé



exécution ? oui très bien alors ensuite l'optimiste fait venir la serveuse écoutez mademoiselle, j'ai une question à vous poser quelle est la primitive de x ? et puis la serveuse regarde les deux analystes et dit c'est une demi de x^2 bon très bien et là l'optimiste fait au pessimiste tu vois c'est pas si grave que ça bon maintenant c'est à toi de régler un autre et alors la serveuse qui avait fait quelque part en arrière revient vers la table les regardent avec un sourire et leur disent messieurs, plus une constante voilà sur ce bon appétit c'est après-midi à 15h

notes

résumé