



Un astéroïde peut-il frapper la Terre demain ?

Comment peut-on modéliser la détection d'un astéroïde et les effets produits lors d'un impact?



par les élèves de l'atelier physique du Lycée Palissy

Avec LACLAVERIE Jean-Michel
Professeur encadrant
Lycée Bernard Palissy- AGEN
Académie de Bordeaux

Résumé

Introduction Rambaud Alice

1- Les astéroïdes dangereux

1.1- Un Réseau international de détection Charline Trouilh

1.2- Des échelles pour évaluer le risque d'impact Charline Trouilh

1.3- Trajectoires Charline Trouilh

1.4- Modéliser numériquement les trajectoires des astéroïdes dans le référentiel géocentrique?
Clément Pelet

1.5- Comment les astronomes déterminent la position, la taille, la composition et la vitesse d'un
astéroïde Jeanne Laclaverie

2- Modélisation du mouvement d'un astéroïde au laboratoire: Protocole de détermination de position et de vitesse Ambre Jarrier

3- Analyser le mouvement propre d'un astéroïde Jeanne Laclaverie

4- Combustion d'un Chamallow pour reconstituer la croûte de fusion d'une météorite Trouilh Charline

5-Conséquences mondiales de l'impact Brossard Lucas

Conclusion : Rambaud Alice

Annexe1: Détermination de distance avec les ultrasons et un Arduino

Annexe 2 : Notre programme de simulation d'un impact d'astéroïde sur la terre avec Processing Clément Pelet

Résumé:

Il y a 66 millions d'années une météorite de 10 km de diamètre s'est écrasée sur Terre et a fait disparaître les plus grands êtres vivants que notre planète a porté. S'ils ont disparu, pourquoi pas nous ?

Les scientifiques ont montré que les risques de disparaître sont quasiment nulles dans un univers aussi grand. Pourtant il existe tout de même bien une faible menace de croisement entre la trajectoire de la Terre et celle d'un astéroïde. Alors que se passerait-il si l'un d'entre eux venait à s'écraser ? Et comment s'en protéger dans le cas échéant ?

Après avoir présenté les astéroïdes et les méthodes actuelles de détection, nous décrirons nos expériences de laboratoire permettant de modéliser la détection d'astéroïdes et l'effet de leur impact sur la terre. Notre travail se termine par une modélisation informatique d'un système solaire simplifié et du passage d'un astéroïde sur la trajectoire de la terre.

Nous nous sommes inspirés de certaines expériences présentées à la cité de l'espace à Toulouse (chamallow et rotation de l'astéroïde)

Merci à Vincent Bachelet, docteur en physique et professeur dans notre lycée, pour ses conseils.

Introduction:

Les astéroïdes sont de petits corps rocheux n'excédant pas quelques centaines de kilomètres (Cérès, de loin le plus grand d'entre eux mesure 950 km de diamètre), les plus petits ne mesurant que quelques centimètres (pour les fragments plus petits, on parle généralement de "poussières"). Ils correspondent aux briques de construction des planètes. C'est pour cela que leur étude est si précieuse: ils témoignent des premiers instants de notre système solaire. Parfois les astéroïdes tombent sur Terre, et les fragments ramassés sont appelés des météorites. Leur étude sert alors un double intérêt: la compréhension de la formation des planètes et la protection de la Terre.

Les géocroiseurs potentiellement dangereux peuvent heurter la surface du globe. Ils doivent être suffisamment gros pour ne pas être arrêtés par notre atmosphère et transformés en étoiles filantes. Jusqu'à 50 mètres de diamètre, il y a beaucoup de chances qu'ils soient détruits par leur passage dans l'atmosphère terrestre en produisant un dégagement d'énergie jusqu'à l'équivalent d'une bombe de 5 mégatonnes qui exploserait dans la haute atmosphère. Au-delà de cette taille, l'objet atteindrait sûrement la Terre en provoquant des dégâts. Ces dégâts resteraient limités jusqu'à une taille d'objet de l'ordre du kilomètre, taille à partir de laquelle les conséquences toucheraient l'ensemble de la planète. Un corps de 2 kilomètres de diamètre provoquerait une explosion équivalente à une bombe d'un million de mégatonnes et un corps de 15 kilomètres à une bombe de 100 millions de mégatonnes. Dans ce dernier cas, la plupart des espèces vivantes disparaîtraient. Les astronomes pensent qu'il y a plus de 1000 objets plus grands qu'un kilomètre (jusqu'à une taille de 25 kilomètres) et peut-être un million d'objets géocroiseurs dont le diamètre dépasse 50 mètres susceptibles de croiser la trajectoire de la terre.

L'analyse des météorites en laboratoire permet de connaître en détail leur composition, les minéraux

qui les compose, les conditions dans lesquelles elles se sont formées, les échelles de temps mise en jeux, etc. Ce sont des échantillons directs d'astéroïdes. En reliant les météorites aux astéroïdes, nous pouvons mieux comprendre l'histoire du système solaire

Il est donc intéressant d'étudier les astéroïdes pour mieux connaître notre système solaire et son histoire. Il est indispensable de prévoir la trajectoire des plus gros d'entre eux pour pouvoir s'en protéger.

La vitesse d'un astéroïde par rapport à la Terre est comprise entre 11 et 75 km/s donc, son énergie cinétique est comprise entre $4,7 \cdot 10^{18}$ J et $2,2 \cdot 10^{20}$ J pour un astéroïde de 78 milliards de kilos comme Bennu.

L'énergie de la bombe d'Hiroshima était de 70 TJ, soit $70 \cdot 10^{12}$ J, donc les astéroïdes peuvent avoir une énergie comprise entre $67 \cdot 10^3$ et $3,1 \cdot 10^6$ bombes. Cette énergie est 1500 fois plus grande que celle de la plus puissante éruption volcanique enregistrée sur Terre.

Nous présenterons tout d'abord nos connaissances sur les astéroïdes dangereux puis la modélisation de la détermination de vitesse et de position. Nous étudierons la rotation d'un astéroïde et la combustion d'un marshmallow pour modéliser son entrée dans l'atmosphère. Puis nous modéliserons l'impact et ses effets.

1- Les astéroïdes dangereux

Le premier astéroïde découvert, Cérès, a une orbite située entre Mars et Jupiter, à 2.8 ua. C'est dans cette région, maintenant appelée la ceinture principale, que tous les autres astéroïdes furent découverts jusqu'à Eros en 1898, dont l'orbite croise celle de la Terre. Les objets sur de telles orbites sont appelé les astéroïdes géocroiseurs.

Sur l'orbite de Jupiter se trouvent les Troyens. Ces objets précèdent ou suivent Jupiter.

Les Centaures sont les corps dont les orbites croisent celles des quatre planètes géantes et ont des durées de vie très limitées. Ces corps sont l'équivalent dans le système solaire externe des géocroiseurs dans le système solaire interne. Dans leur cas, leur région source est appelée la ceinture de Edgeworth-Kuiper, située au-delà de l'orbite de Neptune. Les Centaures sont à l'origine des comètes à courte période (moins de 200 ans). Cette ceinture Edgeworth-Kuiper est le second réservoir de petits corps, et s'étend de 30 à 100 ua environ. Les objets qui la composent ne sont pas appelé astéroïdes mais plutôt objets transneptuniens ou objets de Kuiper. Tous les astéroïdes qui croisent l'orbite de la terre peuvent être dangereux.

1.1- Un Réseau international de détection

Dans la seconde moitié du XXe siècle, différents travaux scientifiques ont permis de découvrir la menace que constituerait l'impact d'astéroïdes pour la vie sur Terre. La NASA a mis sur pied en 1998 le programme Spaceguard de détection des astéroïdes géocroiseurs (dont l'orbite coupe celle de la Terre) ayant un diamètre supérieur à 1 km. Cette dimension a été retenue car l'impact d'un tel astéroïde pourrait amener l'extinction de l'humanité. On estime qu'il existe moins de 1 200 astéroïdes dans cette catégorie. Un objet de ce type frappe la Terre environ tous les 500 000 ans

Les performances du système de détection d'astéroïdes dangereux de la Nasa sont étonnantes:

« Nous avons pu détecter un petit astéroïde, qui fait grosso modo 20 mètres de diamètre, alors qu'il se trouvait à plus de 60 millions de kilomètres de la Terre et il était 250 millions de fois plus pâle que la plus pâle étoile visible à l'œil nu (c'est l'observation d'un géocroiseur le plus pâle jamais signalé). Notre données, qui sont déjà publiquement disponibles, permettent de mieux déterminer la trajectoire de l'astéroïde 2012 TC4 et se révéleront essentielles lors de la campagne de test du réseau international de détection et de suivi des astéroïdes, » a déclaré l'astronome Marco Micheli¹.

Les campagnes de mesure visent à obtenir des données avec le plus large éventail d'instruments, de techniques d'observation et de longueurs d'ondes afin de rassembler toutes les informations qui peuvent être collectées sur un tel objet depuis le sol.

« Nous pouvons déterminer la trajectoire de l'astéroïde avec une extrême précision, mais aussi la taille de l'objet, sa période de rotation et son orientation, sa densité, ses propriétés thermiques, sa composition, la structure de sa surface, etc. Tous ces données fournissent une caractérisation complète des propriétés de l'objet, y compris toutes les informations qui auraient été essentielles pour comprendre les effets d'un impact et prévoir des procédures d'atténuation au sol si l'objet avait suivi une trajectoire d'impact, » a affirmé Marco Micheli.

1.2- Des échelles pour évaluer le risque d'impact

L'échelle de Turin a été créée en 1995 par Richard Binzel, chercheur au Massachusetts Institute of Technology dans le département des sciences planétaires. Cette échelle destinée au public, sert à classer les risques prévus, d'impacts d'astéroïdes ou de comètes géocroiseurs.

Elle est graduée de 0 (aucun risque de collision) à 10 (collision certaine et catastrophe globale). La première version de l'échelle de Turin (1999), a été adoptée à Turin, en Italie, lors d'une conférence de l'Union astronomique internationale sur les objets géocroiseurs. Ce qui lui donna son nom. Une nouvelle version a été publiée en 2005.

L'échelle de Palerme est, en astronomie, une échelle logarithmique utilisée pour évaluer le risque d'impact d'un objet géocroiseur. Ce risque est défini à partir de la probabilité d'impact d'un objet donné pondérée par la probabilité d'un impact similaire provenant du « bruit de fond », c'est-à-dire d'un objet quelconque de la population d'astéroïdes et de comètes.

Le risque relatif d'impact P par un objet unique est donnée par :

$$P = \log_{10} \frac{p}{f(E)\Delta t}$$

1 <https://www.rheagroup.com/fr/actualites/international-asteroid-detection-and-tracking-network-prepares-for-close-flyby>

où :

p est la probabilité de l'impact ;

Δt est l'intervalle de temps jusqu'à l'impact possible (unité : an) ;

f(E), la densité de fréquence d'impact par un objet d'énergie cinétique E (unité : an⁻¹.Mt⁻¹). f(E) est donné par l'approximation :

$$f(E) = 0.03E^{-4/5}$$

où E est mesurée en mégatonnes de TNT.

Une mégatonne de TNT correspond donc à $4,184 \times 10^{15}$ joules = 4,184 PJ (pétajoules).

Le risque relatif d'impact P par une série d'objets est donné en fonction des risques relatifs d'impacts individuels P₁, ..., P_n :

$$P = \log_{10}(10^{P_1} + \dots + 10^{P_n})$$

1.3 Trajectoires

En astronomie, les astéroïdes géocroiseurs sont des astéroïdes évoluant à proximité de la Terre. Parmi les NEA (Near-Earth Asteroids, astéroïdes proches de la Terre), on distingue trois familles principales :

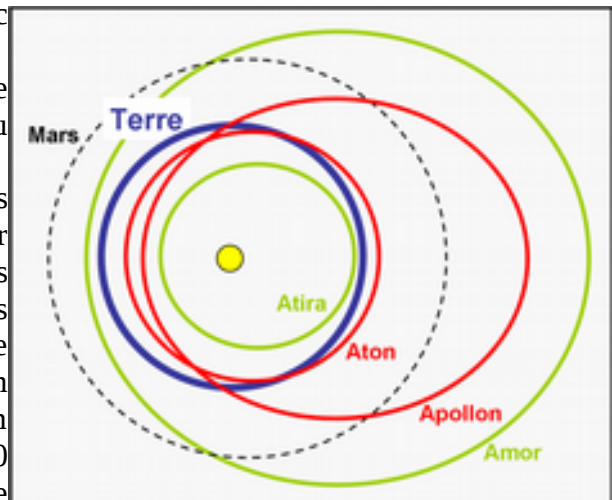
les Atons, qui possèdent un demi-grand axe de moins d'une UA ;

les Apollons, qui croisent l'orbite de la Terre avec une période supérieure à un an ;

les Amors, qui sont des frôleurs extérieurs et ne sont donc pas des géocroiseurs au sens strict du terme.

Le programme NEOWISE exploite les capacités du télescope spatial infrarouge WISE pour identifier une sous-catégorie des astéroïdes géocroiseurs baptisée PHA (Potentially hazardous asteroid) qui se définit comme ceux dont l'orbite coupe celle de la Terre à moins de 8 millions de km de celle-ci. Les résultats de cette étude, achevée en 2012, permettent d'estimer qu'il existe environ 4 000 à 5 000 astéroïdes de ce type ayant une taille comprise entre 100 mètres et un kilomètre dont 20 à 30 % sont aujourd'hui identifiés.

Il existe par ailleurs un demi million d'astéroïdes géocroiseurs d'une taille comprise entre 50 et 100 mètres. Un de ces objets frappe la Terre statistiquement tous les mille ans (un astéroïde de moins de 50 mètres tous les 100 ans).



1.4- Modéliser numériquement les trajectoires des astéroïdes dans le référentiel géocentrique?

Pour se protéger d'un éventuel impact d'astéroïde, il faut dénombrer les astéroïdes, estimer leur distance, leur taille et leur masse. Il faut aussi prévoir les trajectoires possibles, grâce aux interactions gravitationnelles avec les autres objets système solaire. Cela implique l'utilisation de puissants outils de calcul.

Nous avons voulu modéliser la trajectoire d'un astéroïde tournant autour du soleil seul, puis rajouter la terre et d'autres objets. Nous pensions que le calcul serait assez facile car seule la force d'interaction gravitationnelle entre en jeu. Mais il est en fait très complexe.

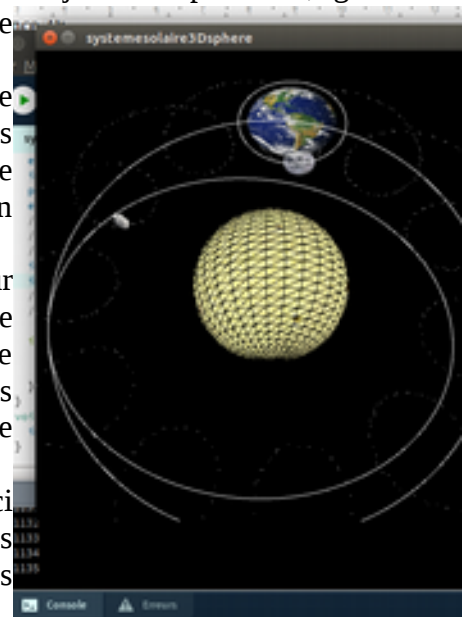
Newton savait déjà que deux corps décrivent des ellipses autour de leur centre de gravité commun. Poincaré avait découvert que les trajectoires 3 corps pouvaient être "chaotiques" : une toute petite différence dans les positions et vitesses initiales des corps pouvait causer de très importantes différences dans la trajectoire des corps.

Pour plus de 3 corps, il n'existe pas de solution analytique. Ceci signifie que pour simuler le système solaire, les scientifiques utilisent la conservation globale de l'énergie du système et des méthodes de résolution numérique.

Cela est hors de portée pour notre simulation. Nous avons donc choisi d'utiliser processing pour simuler le parcours de la terre et de la lune sur leurs trajectoires supposées circulaires. Puis nous avons introduit l'astéroïde Apophis avec une trajectoire elliptique croisant celle de la terre :

```
text(" L'astéroïde mesurant moins d'un kilomètre de diamètre, ", 20, 50);
text("son impact n'aurait eu que des conséquences « régionales »", 20, 80);
text("demi-grand axe = 0.92 ua; période= 0,89 a", 20, 470);
text("périhélie 0.9 ua, aphélie = 1,1 ua", 20, 440);
text("inclinaison 3,3°", 20, 410);
```

Le logiciel détermine les conditions d'impact. Notre travail n'est qu'une simulation simplifiée à partir des trajectoires modélisées et non pas directement des forces de gravitation. Il a cependant nécessité un mois de travail en ISN.



1.5- Comment les astronomes déterminent la position, la taille, la composition et la vitesse d'un astéroïde.

Source principale: <https://promenade.imcce.fr/fr/pages4/476.html>

Composition: À la rare exception du retour d'échantillon de l'astéroïde (25,143) Itokawa par la sonde Japonaise Hayabusa en 2011, l'étude de la composition des astéroïdes se fait à distance, en analysant la lumière qu'il réfléchissent et comparant ces propriétés à celles de météorites ou minéraux analysés en laboratoire.

Courbes de lumière: Le moyen d'investigation principal de la période de rotation et orientation des astéroïdes est la courbe de lumière, c'est à dire la variation de la brillance d'un astéroïde en fonction du temps. Les astéroïdes ne faisant que réfléchir la lumière du soleil, la quantité de lumière que nous mesurons dépend de la surface apparente de l'astéroïde. Au cours de sa rotation autour de son axe, la surface que nous voyons projetée sur le plan du ciel varie, et dessine une courbe sinusoïdale. La période de rotation se détermine directement de cette courbe et peut donc se réaliser en une simple nuit d'observation. La période de rotation est connue pour environ 15000 astéroïdes à ce jour.

Imagerie directe: Il est très difficile techniquement de les observer directement. Même le plus grands d'entre eux, Cérès, à un diamètre angulaire qui correspond à celle d'une pièce de 2 Euros située à 4 km.

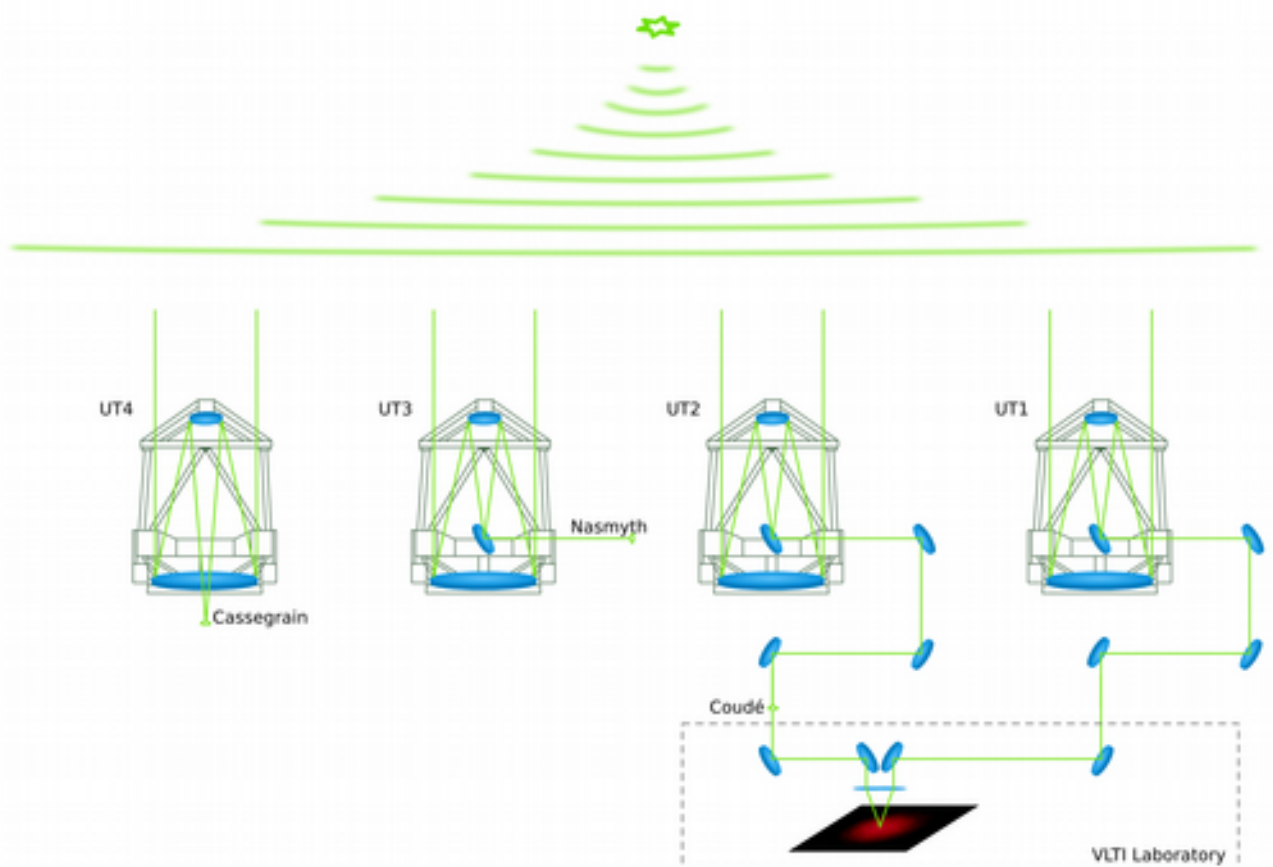
Le télescope spatial Hubble, non affecté par la turbulence atmosphérique car situé en orbite terrestre, a été utilisé avec succès pour observer les deux plus grands astéroïdes, Cérès et Vesta.

Jusqu'aux années 1990, avec le premier survol d'un astéroïde par une sonde spatiale (Ida par Galileo en chemin vers Jupiter), les astéroïdes étaient restés des sources ponctuelles.

L'autre difficulté est liée à la turbulence atmosphérique, qui "floute" les images en dégradant leur résolution. Heureusement, une technique de correction en temps réel de cette dégradation fut mise au point à la fin des années 1980, appelée optique adaptative. C'est grâce à elle que des images de Cérès et Pallas purent être obtenues en 1991 avec le télescope de 3.6m de l'ESO

Occultations stellaires: Une autre méthode de mesure directe de la taille et de la forme apparente des astéroïdes consiste à mesurer le temps de disparition d'une étoile lorsqu'un astéroïde passe devant. La connaissance de la vitesse relative de l'astéroïde par rapport à la Terre, directement dérivée de la connaissance de son orbite, permet de convertir ce temps de disparition en une longueur sur le disque apparent de l'astéroïde, appelée une corde.

Interférométrie:



La figure d'interférence est composée de franges, dont la séparation, le contraste sont principalement reliés à la taille de l'objet dans le ciel.

Radiométrie dans l'infrarouge thermique: Si la majeure partie du rayonnement qui nous parvient

des astéroïdes dans le visible est dû à la réflexion de la lumière solaire, ce n'est pas le cas dans l'infrarouge. En effet, le rayonnement de corps noir pour ces corps dont la surface a une température de 200-300 K pique autour de 10 microns. Le flux mesuré dans ces longueurs d'onde fourni, à partir de la connaissance de la température de surface, le diamètre apparent de la cible.

Échos radar: En enregistrant le temps entre l'envoi d'un signal radar et sa réception avec une antenne permet de connaître la distance et la vitesse de l'astéroïde par effet Doppler-Fizeau. Malheureusement, la puissance d'un écho radar diminuant avec la distance de la cible à la puissance 4, seuls les objets passant près de la Terre peuvent être étudiés ainsi. Ceci limite cette technique aux objets géocroiseurs, ceux passant typiquement à moins de 0.01 ua de la Terre.

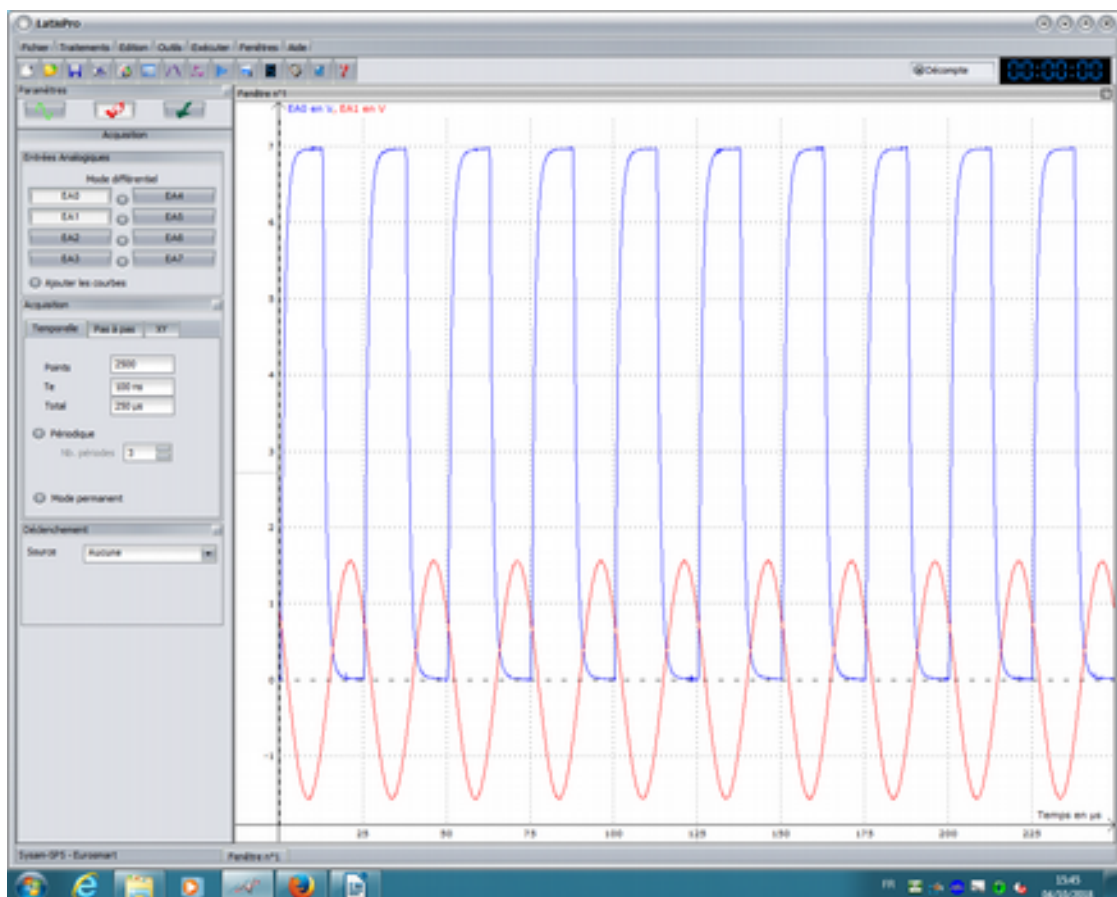
2- Modélisation du mouvement d'un astéroïde au laboratoire: Protocole de détermination de position et de vitesse

1- Déterminer la position

1.1 Les caractéristiques des ultrasons

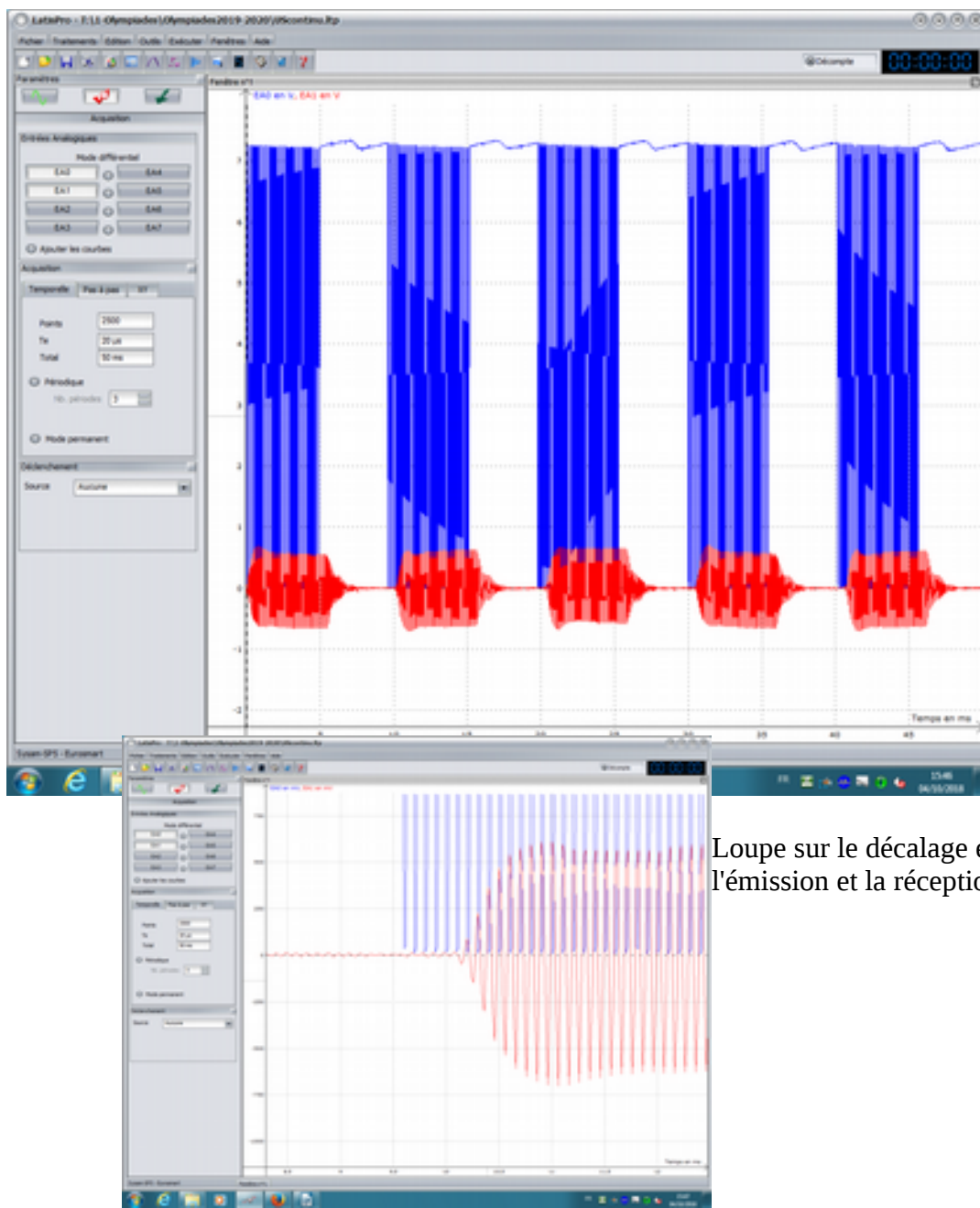
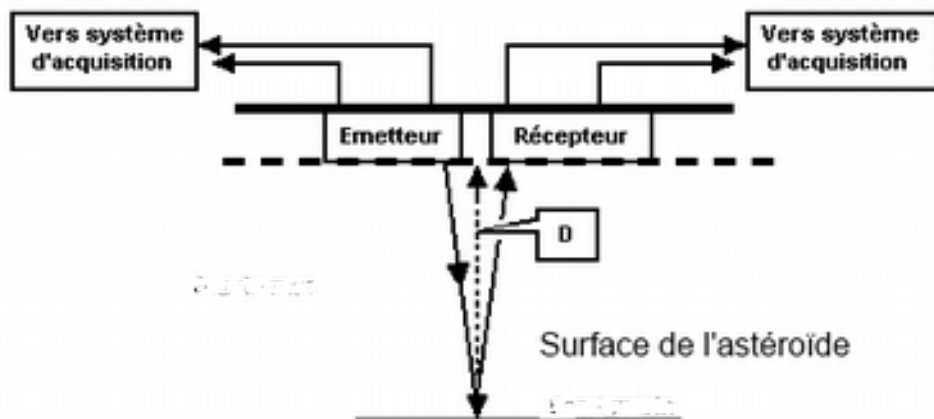
Nous utilisons l'émission continue d'ultrasons pour déterminer leur fréquence et leur période, grâce à l'outil mesure automatique. La durée d'acquisition est très courte 200µs. Nous trouvons

$$f = 40\,000 \text{ Hz et } T = 25 \mu\text{s}$$



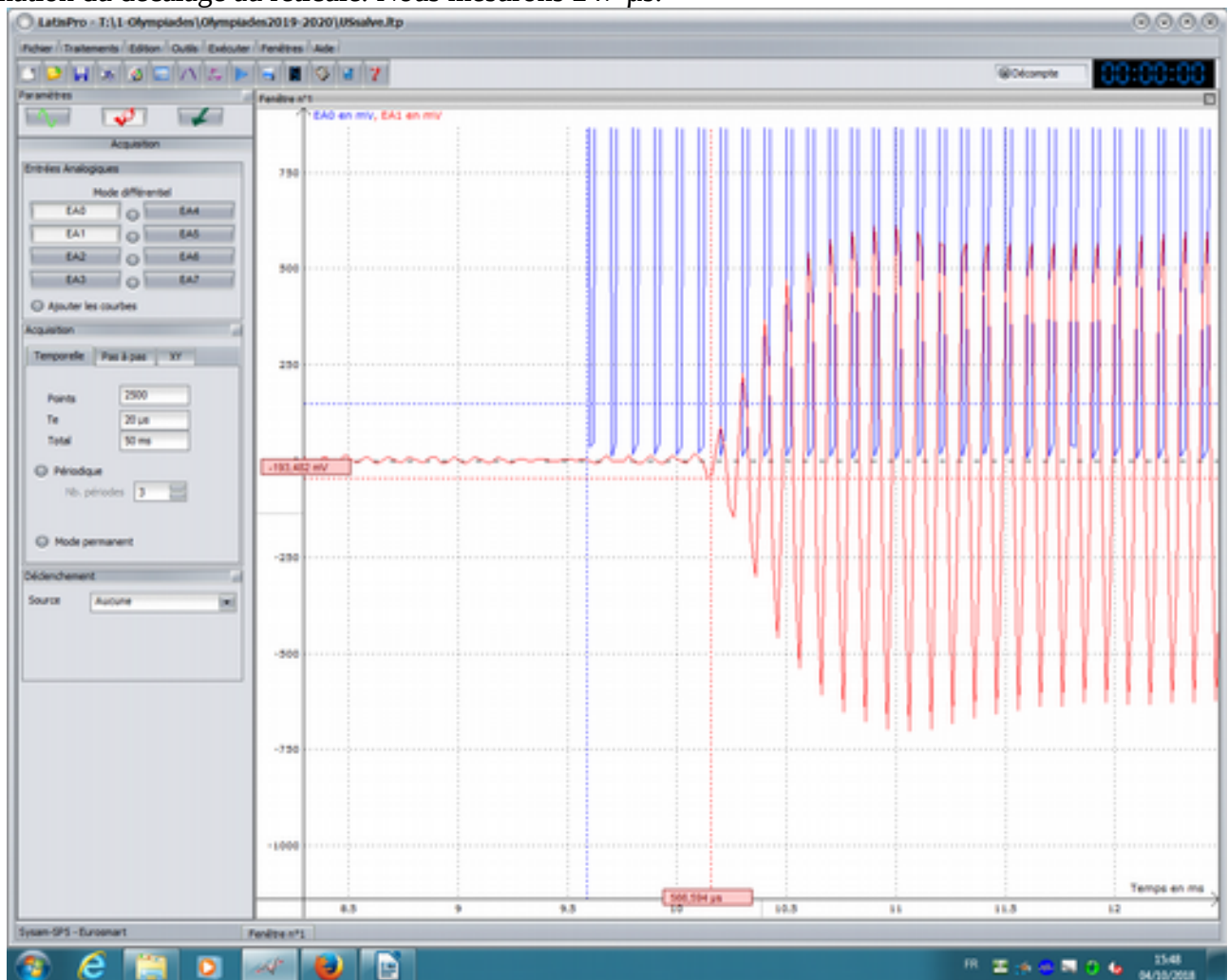
1.2- Détermination de distance par émission de salves et mesure de durée

Pour déterminer une distance grâce aux ultrasons nous utilisons le mode salve.



Loupe sur le décalage entre l'émission et la réception

Détermination du décalage au réticule. Nous mesurons 247 μ s.



Calcul de la distance entre le système de détection et l'astéroïde. La célérité du son étant de 340 m/s, la distance parcourue par l'onde est donc $340 \times 247 \times 10^{-6} = 0,084 \text{ m} = 8,4 \text{ cm}$.

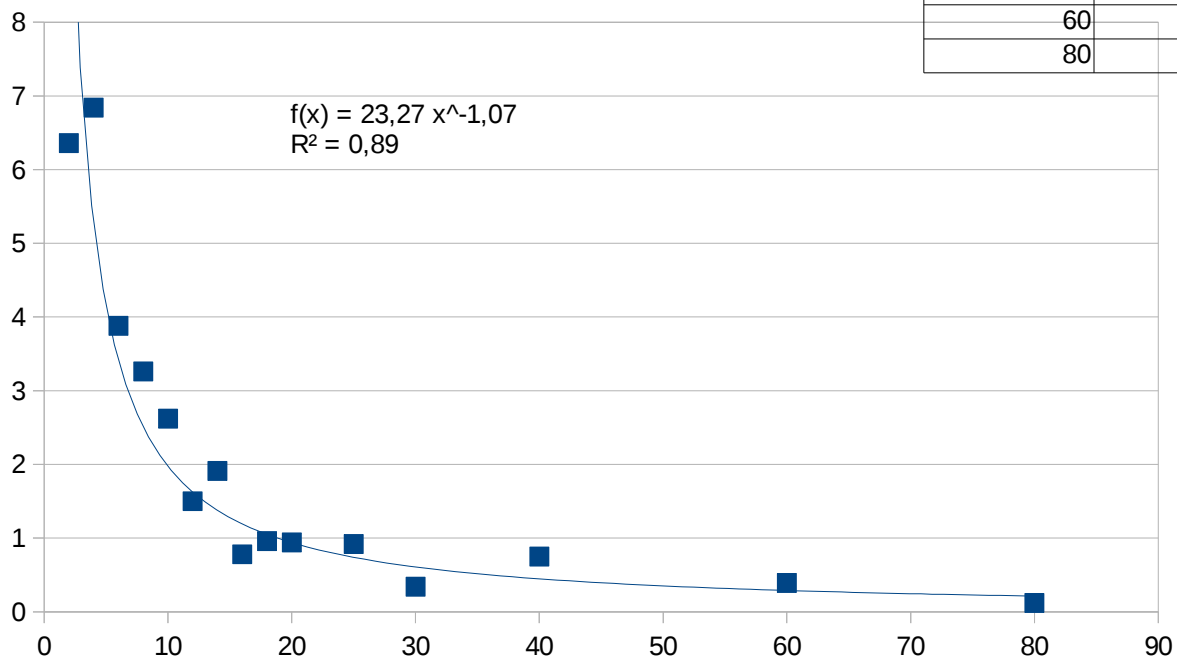
En annexe nous présentons le même travail fait avec un Arduino.

1.3 Détermination de distance par l'atténuation du signal

Protocole :

On éloigne l'émetteur du récepteur tout en prenant des mesures (Distances en cm émetteur/récepteur et $V_{\max}-V_{\min}$). Le logiciel relié aux instrument nous donne les mesures de V_{\max} et V_{\min} . Nous plaçons les mesures dans un tableau libre office calc et nous sélectionnons les distances et les mesures $V_{\max}-V_{\min}$ et cliquons sur « diagramme » puis (XY)dispersion. Nous cliquons sur l'option courbe de tendance puis sélectionnons la courbe puissance et afficher l'équation ainsi que afficher le coefficient de détermination.

Distances (cm)	$V_{\max}-V_{\min}$
2	6,36
4	6,84
6	3,88
8	3,26
10	2,62
12	1,5
14	1,91
16	0,78
18	0,96
20	0,94
25	0,92
30	0,34
40	0,75
60	0,39
80	0,12



Nous avons donc trouvé un lien mathématique entre la différence ($V_{\max}-V_{\min}$) du signal enregistré et la distance du modèle d'astéroïde. La décroissance de l'amplitude du signal est très rapide car l'énergie émise se répartit sur une portion de sphère, de même pour l'énergie réfléchi. De même, en astronomie radar, l'amplitude du signal réfléchi est un indice pour déterminer la distance.

3- Analyser le mouvement propre d'un astéroïde

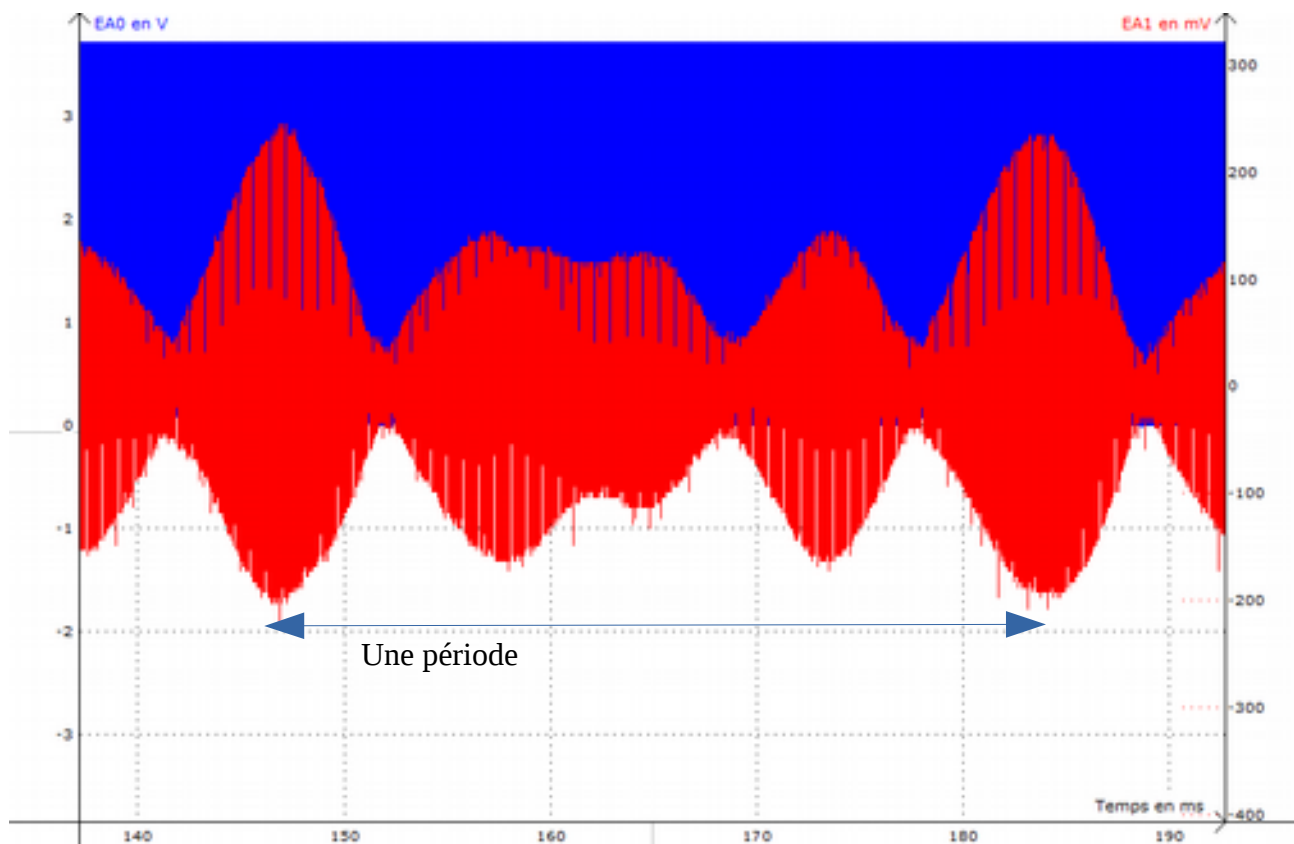
Pour modéliser la détection de la rotation d'un astéroïde, nous avons utilisé un système de 6 miroirs tournants, représentant l'astéroïde, tournant sur lui-même grâce à une manivelle et un axe de rotation. Un émetteur d'ultrasons envoie un signal réfléchi sur le modèle d'astéroïde tournant. Un capteur d'ultra-sons mesure les variations de l'amplitude du signal due à la rotation de l'objet. Il est ainsi possible d'évaluer la



période de rotation de l'astre, mais également de mettre en évidence des interférences.

Nous voyons une suite de maxima et de minima correspondant à des ondes réfléchies à la fois sur deux miroirs et qui interfèrent.

Nous déterminons une période de rotation de 4 tr/s pour ce modèle.



4- Combustion d'un Chamallow pour reconstituer la croûte de fusion d'une météorite

La rentrée d'une météorite depuis l'espace jusqu'à l'atmosphère, est très rapide, celle-ci arrive à grande vitesse. La durée de la chute n'est que de quelques secondes, 100 Km à parcourir à une vitesse de 15 km/s. C'est au cours de sa traversée de l'atmosphère que la météorite subit des frottements, ces derniers vont être à l'origine de certaines modifications au niveau de l'aspect. Les météorites de diamètre compris entre quelques centimètres et quelques dizaines de mètres ne sont pas complètement vaporisées. Souvent elles explosent dans l'atmosphère et se fractionnent, les plus gros morceaux atteignent la surface de la Terre. L'échauffement commence vers 100 km. C'est en général vers 40-30 km qu'elles se fractionnent. Cependant, le ralentissement de la météorite ou de ses fragments entre 100 km et la base de la stratosphère (15 km) est tel qu'ils pénètrent dans la

troposphère à la vitesse d'équilibre de la chute libre d'un corps dans l'air (de 200 à 400 km/h). À cette vitesse, il n'y a plus d'échauffement, malgré la densité de l'atmosphère. On peut remarquer dans ce cas que le dégagement de chaleur entre 100 et 20-30 km a vaporisé une bonne



partie de la météorite et de ses fragments. Cette vaporisation a éliminé beaucoup de chaleur, et l'intérieur des gros morceaux de la météorite reste froid.

Quand les météorites vont se confronter à l'atmosphère, elles vont alors s'échauffer. Pour mieux comprendre et surtout modéliser ce phénomène nous avons réalisé une expérience. Son objectif était d'échauffer une Guimauve. Pour cela nous avons fait chauffer un bec électrique avant de disposer une guimauve au dessus. On a donc pu observer le phénomène de modification d'aspect avec la coque externe qui s'est durcie, mais aussi noircie. Un thermomètre est placé à l'intérieur de la guimauve et un autre en surface. L'intérieur s'échauffe beaucoup plus lentement que la surface. Sa température n'évolue presque pas pendant les 10 s de l'expérience.

5-Conséquences mondiales de l'impact

Si un astéroïde s'abattait sur la Terre, et que celui-ci s'écrase dans par exemple une partie de l'Europe, en fonction de sa taille il pourrait annihiler toute forme de vie à cause des conséquences engendrés. En effet le choc sur la Terre provoquera une forte activité volcanique, pour cause du réveil des couches de magma sous les volcans, ceci même causé par les séismes provoqués à l'échelle du globe. L'activité sismique pourra entraîner des tsunamis qui détruiraient des milliers de vie. Le nuage de poussière causé par un volcan née d'un crash d'astéroïde, mettrait en danger l'humanité en bloquant les rayons du soleil, rendant l'atmosphère plus froide, la vie végétale piliers de la chaîne alimentaire, ainsi à cause de toute les conséquences liés au crash la vie pourrait disparaître. Les conséquences provoquées par l'impact de celui-ci varie en fonction de sa taille, de sa masse, de sa composition, de la vitesse dans son entrée dans l'atmosphère. Lors de l'impact d'une météorite, son énergie cinétique est convertie en chaleur, ondes sismiques et ondes de choc , déformation du sol et leur éjection de débris.

Nous avons choisi de modéliser le choc d'un astéroïde avec la terre avec le matériel suivant :

- règle(1m)
- bac
- 2 billes
- semoule moyenne
- balance

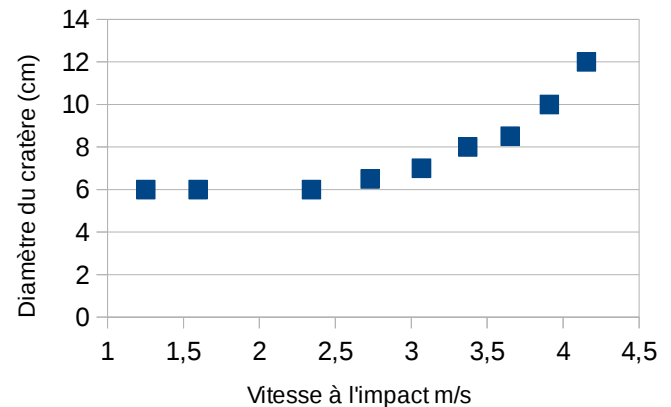
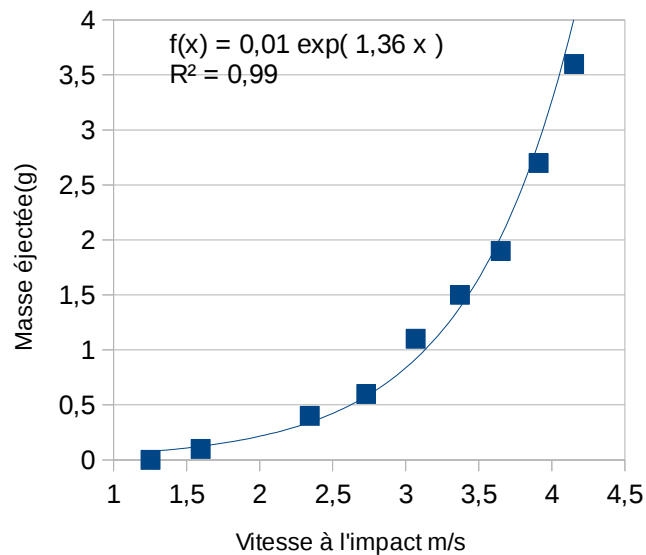
Un bac de semoule placé sur une balle reçoit une bille en chute libre. De la semoule est éjectée. Nous déterminons la masse de semoule éjectée pour chaque événement.



Nous avons mesuré précisément les diamètres de cratères en fonction de la masse du projectile et de sa hauteur de chute, les mesures reportées sur un un tableau (librecalc) afin de créer deux courbes représentant le diamètre du cratère et la masse éjectée en fonction de la vitesse à l'impact. La vitesse est calculée en supposant que toute l'énergie potentielle initiale de la bille de 45,6 g est transformée en énergie cinétique au moment de l'impact : $v = (2gh)^{0.5}$

Il apparaît que la vitesse de la balle ne dépend pas de sa masse car c'est une chute libre.

	Hauteur de chute (m)	Masse éjectée (g)	Diamètre du cratère (cm)	Epp (J)	Vitesse impact (m/s)
1	0,08	0	6	0,0357504	1,2521980674
2	0,13	0,1	6	0,0580944	1,5962455951
3	0,28	0,4	6	0,1251264	2,3426480743
4	0,38	0,6	6,5	0,1698144	2,7291024165
5	0,48	1,1	7	0,2145024	3,067246322
6	0,58	1,5	8	0,2591904	3,3716464821
7	0,68	1,9	8,5	0,3038784	3,6507533469
8	0,78	2,7	10	0,3485664	3,9099872123
9	0,88	3,6	12	0,3932544	4,1530711528



On constate que la masse éjectée augmente de façon exponentielle en fonction de la vitesse à l'impact. Le diamètre du cratère augmente aussi en fonction de la vitesse à l'impact, mais son évolution n'est pas modélisable simplement.

Nous avons refait l'expérience avec des billes de masses différentes : la première pèse 6,25g et est la plus grande des trois, la deuxième pèse 3,5g et la troisième a une masse de 2,5g. Elles sont lâchées de 3 hauteurs différentes.

Hauteur du lâcher (cm)	Bille 1	20	Longueur du diamètre du cratère (cm)	Bille 1	6,5	Masse de semoule perdu (g)	Bille 1	0,9
		40			8			1,8
		70			9			6,4
	Bille 2	20		Bille 2	3,5		Bille 2	0
		40			4,5			0,4
		70			7,5			1,9
	Bille 3	20		Bille 3	3,5		Bille 3	0
		40			4			0
		70			5			0,5

Plus la bille est lourde, plus son énergie potentielle initiale est grande, plus le diamètre du cratère est grand et plus la masse de semoule éjectée est grande.

Nous avons comparé nos résultats avec ceux d'un article scientifique conseillé par Vincent Bachelet, professeur de physique et docteur en physique : Modeling of impact cratering in granular media by L.S. Tsimring & D. Volfson

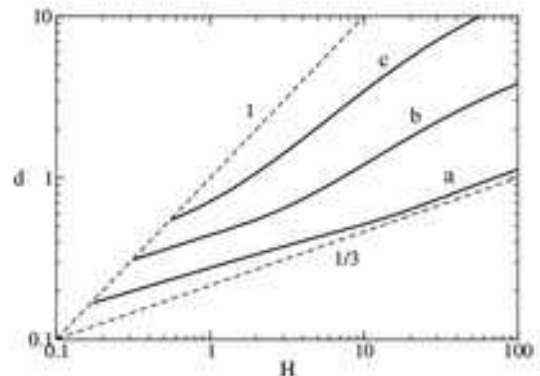
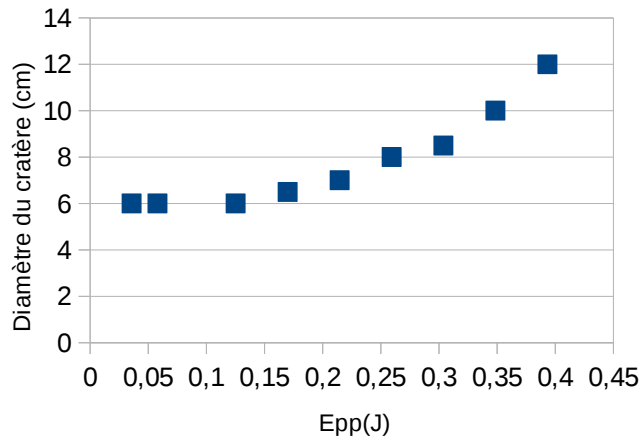


Figure 3: The final penetration depth as a function of the initial ball energy H according to the model (10) with $A = 100$, $B = 1$ for three values of $\rho_s/\rho_b = 1(a)$, $0.3(b)$, $0.1(c)$. Two dashed lines indicate scalings $d \propto H$ and $d \propto H^{1/3}$.

Nos mesures montrent que lorsque l'énergie cinétique de la balle avant l'impact (ou son énergie potentielle initiale) augmente, le diamètre du cratère augmente aussi. La courbe de l'article de recherche est aussi croissante et a une forme complexe qui dépend des particularités de chaque milieu. Mais elle ne représente pas tout à fait le même grandeur en abscisse. Il s'agit de la profondeur de pénétration, que nous n'avons pas pu mesurer, et pas du diamètre du cratère. Mais les deux ont des comportements qui peuvent être proportionnels. Notre échange avec M Bachelet nous a permis de découvrir que le sol peut être modélisé par un milieu granulaire, dont le comportement complexe à l'impact dépend d'un grand nombre de facteurs. Donc aucune loi simple.

Ces impacts sont visibles géologiquement mais aussi par l'étude de l'évolution de la vie sur terre. En entrant dans l'atmosphère le géocroiseur se consume, et n'atteint le sol que rarement, ou sous forme de poussière ressemblant à des cendres. Pour qu'une météorite soit réellement dangereuse sa taille doit être de 10 à 100 m et détruirait une ville si elle atterrissait sur la terre ou provoquerait un raz de marée si elle tombait dans un océan. Heureusement ce genre d'impact n'arrive que rarement, mais il représente tout de même un danger.

Par ailleurs, à force d'étudier et de prendre des mesures sur différents astéroïdes tombés sur Terre au cours des millions d'années, il a été possible de donner une moyenne de l'impact d'un astéroïde sur Terre en fonction de sa taille et du nombre d'année ce genre d'astre entre en collision avec nous. Evidemment, ce ne sont que des statistiques et cela doit donc être pris avec des pincettes car ce n'est jamais complètement vrai et les statistiques sont vraies si et seulement si on a répété un nombre énorme de fois l'expérience. Nous avons seulement observer les différents impacts au cours de notre histoire ce qui n'est pas forcément suffisant afin de dresser un tableau valable. Cependant, nombre de scientifiques étudiant ce domaine pensent que :

-Un impacteur de 10 cm à 10 m, il en tombe environ 200 par an, ce sont les premières météorites auxquelles on peut porter attention. Toutefois, les astéroïdes de cette taille brûlent en général dans l'atmosphère, certains peuvent tout de même endommager des voitures ou des toitures. Les accidents mortels sont quasiment inexistants.

-Un impacteur de 50 mètres, il en tombe un par siècle, il provoque un cataclysme local et est classé au niveau 8 sur l'échelle de Turin. Dans ce genre de cas, les pertes humaines seraient équivalentes à un tremblement de terre de grande envergure ou à un raz-de-marée.

-Un impacteur de 100 mètres, il en tombe un par millénaire, un impact de ce genre de météorite causerait, s'il tombe sur une croûte continentale, une destruction totale d'une zone de taille équivalente à une ville de type Paris. Si l'impacteur atterrit sur une zone océanique, il provoquerait un raz-de-marée avec des vagues atteignant 35 mètres de hauteur.

-Une météorite de 500 mètres tombe une fois tous les 100 000 ans. Il conduit à la destruction complète d'un état de taille moyen comme par exemple la Belgique. Les conséquences sont les mêmes que celles d'un impacteur de 100m dans l'océan, excepté le fait que les vagues seraient de taille encore plus importantes.

-Une météorite de 1 kilomètre s'écrase toutes les 300 000 années, créant un cataclysme régional et la destruction d'une zone de la taille des Etats-Unis ou de la Russie. Les pertes humaines s'élèvent à environ 100 millions de morts.

-Enfin, les plus dangereux d'entre tous, les astéroïdes de plus de 10 kilomètres, similaires à celui qui a causé la mort des dinosaures, tombent une fois tous les 100 millions d'années. Celui-ci causerait une extinction globale des espèces sur la Terre, on appellerait cela un cataclysme planétaire. On prévoit même l'extinction de l'humanité dans un cas pareil.

Cependant, ce n'est pas l'astéroïde en lui-même qui cause les extinctions massives, non bien sûr que non. Ce sont les conséquences de l'impact qui cause ces extinctions. Nous allons décrire petit à petit ce qui se passerait après l'impact d'une météorite d'une taille approximative de 10 km.

Premièrement, l'astéroïde s'écrase et cause un cratère proportionnel à sa taille et à sa vitesse de rentrée atmosphérique. L'éjection de matériaux à partir du point donné d'impact dépend entièrement des critères cités ci-dessus, comme nous avons pu nous-même le constater dans notre expérience avec le lâcher de calot. Ainsi, une taille aussi phénoménale engendrerait une expulsion de matériaux gargantuesque, et ainsi sature l'air en poussière en tout genre.

Secondement, vient les effets "collatéraux" de l'impact : ce sont les ondes sismiques créées. En effet, ces ondes vont se propager à travers tous les coins du globe entraînant des séismes par-ci par-là. Les ondes se propagent très rapidement dans le sol, atteignant rapidement chaque ville reculée du monde. De plus, au vu de la taille d'un astéroïde pareil et d'une vitesse atmosphérique probablement exceptionnelle, les séismes seraient probablement d'une grande ampleur, réveillant ainsi l'activité volcanique globale. Donc on peut en déduire que si il y a des survivants à l'impact de la météorite et à son onde de choc, si il y a tout de même des survivants après des séismes très violents, ils mourront probablement de cette activité volcanique.

Pour comprendre la vitesse de propagation d'une onde dans l'eau nous avons fait 5 vidéos, en filmant la chute d'une balle dans l'eau puis la vague formée. Nous avons effectué la détermination de la vitesse de l'onde , avec des chutes de balles de plus en plus lourdes:

Vidéo	0,534 m/s
Vidéo 1	0,625 m/s
Vidéo 2	0,449 m/s
Vidéo 3	0,406 m/s

Vidéo 4	0,272 m/s
Vidéo 5	0,507 m/s

Nous n'avons pas pu constater de lien entre l'énergie apportée par le projectile et la vitesse de l'onde. En effet elle dépend de la nature du milieu de propagation et pas de l'énergie qui se propage.

Conclusion

Pour conclure nous pouvons seulement dire que bien que l'homme depuis son apparition craint l'espace et les étoiles, il a appris à ouvrir les yeux sur l'univers, à agrandir sa perspective et à aimer ce grand espace infini rempli d'inconnu. Il a aussi appris à se protéger face à des menaces dont il n'avait même pas conscience auparavant et cette protection est de plus en plus efficace grâce aux innovations scientifiques du brillant genre humain. Ces esprits qui ont pu déterminer des lois pour comprendre notre univers et mieux l'appréhender, pour pouvoir prévoir les conséquences des catastrophes, ont permis à l'humanité de mieux se protéger de l'impact d'un astéroïde.

La question qui nous a amené à travailler sur ce sujet, "La vie peut-elle disparaître suite à l'impact d'un objet céleste (météorite, astéroïde) provenant de l'espace ?" a apporté une réponse claire sur la fragilité de la vie, oui cela peut se produire mais cela peut surtout être empêché. Pour finir, ce travail fastidieux et dur nous a rempli de fierté, bien qu'une nouvelle vocation ne se soit pas imposé à nous, nous nous sommes enrichi de connaissance sur un sujet qui nous passionnait d'ores et déjà, nous avons pu réfléchir à des problèmes qui ont agrandi notre conception du monde. Malgré des difficultés du fait que ce sujet et ces calculs ne nous étaient pas habituels, nous avons surmontés cela et avons pu progresser tous ensemble, personne n'est resté le poids mort de l'équipe et avons tous travaillé à notre niveau. Ce sujet a été plus simple à aborder grâce à l'aide de notre professeur de physique-chimie qui nous a poussé à aller plus loin et à la collaboration de notre groupe formé durant l'activité physique. Ces mois écoulés ont été pour nous tous l'occasion de collaborer ensemble et d'apprendre de nous ainsi que sur les autres.

En conclusion, le danger vient aujourd'hui des objets non connus. L'expérience du passé nous montre que le risque est très faible, bien plus faible que n'importe quel autre risque d'origine terrestre. Il n'y a donc pas lieu de s'inquiéter. Nous pouvons donc inventorier tranquillement tous les objets potentiellement dangereux pour laisser à nos descendants les informations nécessaires à leur protection.

Sources :

Site de la Nasa : probabilité d'impact d'astéroïdes :

<https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/>

Échelles de probabilité d'impact d'astéroïdes :

<http://www.astronoo.com/fr/articles/echelle-de-turin.html>

https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89chelle_de_Palermo

TPE astéroïde : <http://astperioide.free.fr/Partie1.html>

programme python de simulation gravitationnelle :

<http://www.f-legrand.fr/scidoc/docimg/sciphys/meca/kepler/kepler.html>

Trajectoire des planètes : <http://www.ac-nice.fr/clea/OlyLJM/Oly04/html/Ellipses.html>

Nature des astéroïdes :

<https://promenade.imcce.fr/fr/pages4/476.html>

Modeling of impact cratering in granular media L.S. Tsimring & D. Volfson

Institute for Nonlinear Science, University of California, San Diego, La Jolla, CA 92093-0402

Annexe1: Détermination de distance avec les ultrasons et un Arduino (d'après un TP fait en classe)

L'émetteur récepteur d'ultrasons est alimenté en 5V par l'Arduino (connection 5V et GND). L'émission est gérée par le pin 2 (c'est une sortie OUTPUT) et la réception reçue sur le 3 (INPUT) 9600 symboles seront transmis par seconde. L'émission du signal dure 100 microsecondes suivie de 10 microsecondes de pause.

Le sketch mesure la durée entre l'émission et la réception du signal en millisecondes (grâce à la fonction pulseIn(reception, HIGH)) puis calcule la distance en mètres et l'écrit sur le port série avec 3 décimales.

Les mesures sont répétées toutes les secondes.

```
int emission = 2;
int reception = 3;

void setup() {
  pinMode(emission, OUTPUT);
  pinMode(reception, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  digitalWrite(emission, HIGH);
  delayMicroseconds(100);
  digitalWrite(emission, LOW);
  delayMicroseconds(10);
  float duree = pulseIn(reception, HIGH);
  float distance = duree*340*1E-6/2;
  Serial.print(" ");
  Serial.print(distance,3);
  Serial.println(" ");
  delay(1000);
}
```

Annexe 2 : Notre programme de simulation d'un impact d'astéroïde sur la terre avec Processing (projet mené en ISN)

```
int cx = 250;
int cy = 250;
int r = 100;
int rlune=30;
PImage lune;
PImage soleil;
PImage terre;
PImage asteroide;

PImage sun;
int xlune=0;
int ylune=0;
int xasteroide=0;
int yasteroide=0;
int aasteroide=110;
int basteroide=90;
int [] positionLuneX;
```

```

int [] positionLuneY;
int compteurPositionlune=0;
PShape globe;
void setup()
{
    size(500, 500, P3D);
    terre = loadImage("terre.png");
    soleil=loadImage("soleil.png");
    lune=loadImage("lune.png");
    asteroide=loadImage("asteroide.png");
    sun=loadImage("sun.jpg");
    globe = createShape(SPHERE, 35);
    globe.setTexture(sun);
    positionLuneX = new int [0];
    positionLuneY = new int [0];
    noStroke();
    fill(255);
    sphereDetail(40);
}

void draw()
{
    background(0);
    camera(width/2, mouseY, mouseX, width/2, height/2,
    0, 0, 1, 0);

    text("(99942) Apophis en collision avec la Terre 13
    avril 2036 ?", 20, 20);
    text(" L'astéroïde mesurant moins d'un kilomètre de
    diamètre, ", 20, 50);
    text("son impact n'aurait eu que des conséquences «
    régionales »", 20, 80);
    text("demi-grand axe = 0.92 ua; période= 0,89 a",
    20, 470);
    text("périhélie 0.9 ua, aphélie = 1,1 ua", 20, 440);
    text("inclinaison 3,3°", 20, 410);
    float t = millis()/1000.0f;
    int x = (int)(cx+r*cos(t));
    int y = (int)(cy+r*sin(t));
    int xlune = (int)(x+rlune*cos(12*t));
    int ylune = (int)(y+rlune*sin(12*t));
    int xasteroide = (int)(cx+aasteroide*cos(0.89*t+
    PI/2));
    int yasteroide =
    (cy+basteroide*sin(0.89*t+PI/2));
    //positionLuneX[compteurPositionlune]=xlune;
    positionLuneX= append(positionLuneX, xlune);

    positionLuneY= append(positionLuneY, ylune);
    println(positionLuneX.length);
    for (int i=0; i<positionLuneX.length-1; i++) {
        point(positionLuneX[i], positionLuneY[i]);
    }
    //positionLuneY[compteurPositionlune]=ylune;
    compteurPositionlune++;
    noFill();
    ellipse(cx, cy, r*4/2, r*4/2);
    pushMatrix();
    translate(250, 250, 0);
    //directionalLight(255, 255, 0, 10, -1, 0);
    //ambientLight(0,0,255);
    //texture(soleil);
    //pointLight(255, 255, 0, width/2, height/2, 3000);
    rotateY(PI * frameCount / 500);
    noStroke();
    shape(globe);
    stroke(255);

    //sphere(25);
    popMatrix();
    pushMatrix();
    //translate(0,0,0);
    rotateY(PI/20);
    ellipse(cx, cy, aasteroide*4/2, basteroide*4/2);
    image(asteroide, xasteroide, yasteroide, 10, 10);
    popMatrix();
    ellipse(x, y, rlune*4/2, rlune*4/2);
    // translate(0,0,-750);
    //rotateZ(0.5);
    //rotateX(0.5);
    image (lune, xlune-10, ylune-10, 20, 20);
    image(terre, x-25, y-25, 50, 50);
    //affichage_astre(soleil, 225, 225, 50, 50);
    //image(soleil, 250-25, 250-25, 50, 50);

    if ( xasteroide>x-10 && xasteroide<x+10 &&
    yasteroide>y-10 && yasteroide<y+10) {
        //noLoop();
        text("Collision possible", 50, 110);
    }

    void affichage_astre( PImage astre, int positionX, int
    (int)positionY, int tailleX, int tailleY) {
        image (astre, positionX, positionY, tailleX, tailleY);
    }
}

```