

# Gravilab



## GRAVILAB

**Programme de simulation expérimentale à vocation pédagogique.**

**Objet :** Mécanique céleste. Etude des mouvements engendrés par la force de gravitation agissant sur des objets célestes quelconques. Détermination de la constante de gravitation universelle **G** par simulation du dispositif expérimental de Cavendish.

**Niveau d'études concerné :**

Classes terminales de l'enseignement secondaire.

**Auteur :** G. Swinnen - Verviers (Belgique).

**Auteur de la documentation :** G. Swinnen.

**Matériel requis :** Ordinateur de type PC fonctionnant sous MS-DOS ou Windows (toutes versions).

(C) 1979-95 G.Swinnen, Verviers (Belgique).

Code Portions (C) 1982-1992 Microsoft Corporation. All rights reserved.

**Dépôt légal :** D/1993/5599/15

*Le présent logiciel est le résultat de plusieurs années de recherches et d'expérimentations menées dans différentes classes de l'enseignement secondaire. Il a fait l'objet de nombreux remaniements en fonction de l'expérience accumulée, mais ne peut évidemment pas prétendre à la perfection absolue. La mise au point d'un bon programme de simulation d'expérience à but didactique est longue et difficile : c'est l'utilisation répétée en classe, avec différents groupes d'élèves, qui permet d'en repérer les défauts résiduels et suggère des possibilités d'amélioration.*

*L'auteur se réserve donc le droit de continuer à apporter à ce logiciel toutes les modifications qu'il jugera utiles, sans préavis.*

*En conséquence, il peut se faire que les caractéristiques du programme que vous avez acquis soient légèrement différentes de celles qui sont décrites dans la présente documentation. Les modifications les plus importantes (s'il y en a) devraient être décrites dans un petit fichier annexe intitulé **READ\_ME.TXT**.*

*Si vous avez acquis ce logiciel en licence sur site, vous pouvez en faire des copies en nombre suffisant pour l'utilisation simultanée sur toutes les machines situées dans un même local, sous votre direction personnelle. Vous n'êtes cependant pas autorisé à céder une quelconque de ces copies à autrui. Le logiciel a été personnalisé à votre nom, et la diffusion illicite de copies de votre version du logiciel engagerait votre responsabilité au regard de la législation concernant la protection des droits d'auteur.*

*Ni l'auteur, ni le distributeur du logiciel ne consentent aucune garantie et ne prennent aucun engagement quant aux dommages directs, indirects, spéciaux, accessoires ou incidents pouvant résulter de l'utilisation du logiciel, ou de l'impossibilité éventuelle d'utiliser le logiciel ou même sa documentation.*

*L'acquéreur ne reçoit qu'une licence d'utilisation du logiciel, lequel reste de toute façon la propriété exclusive de son auteur.*

*Toute tentative de copie illicite sera considéré comme une violation des droits d'auteur du programme, déliera le distributeur de tout accord de service après-vente éventuellement conclu avec l'acquéreur, et pourra entraîner des poursuites judiciaires.*

# Sommaire

<b>INTRODUCTION</b>	<b>5</b>
<b>I. PRÉSENTATION DU LOGICIEL.</b>	<b>6</b>
<b>II. OBJECTIFS ET DIRECTIVES PÉDAGOGIQUES.</b>	<b>10</b>
<b>III. MISE EN OEUVRE DU LOGICIEL.</b>	<b>14</b>
A. Installation du logiciel.	14
B. Remarques complémentaires.	15
C. Démarrage du logiciel.	16
<b>IV. FONCTIONS &amp; COMMANDES DU LOGICIEL.</b>	<b>17</b>
A. Satellisation autour d'un astre massif.	17
1. La commande DOCUMENTATION	18
2. La commande ASTRE CENTRAL	18
3. La commande ZOOM	19
4. La commande POSITION INITIALE	19
5. La commande VITESSE INITIALE	19
6. La commande EFFACER LES TRACES	20
7. La commande ANIMATION	20
8. Le paramètre INCREMENT DE TEMPS	20
9. L'option VECTEURS V & A	22
10. L'option TRAJECTOIRE	22
11. L'option 2e LOI DE KEPLER	23
12. La commande START	24
13. L'option PAS A PAS	24
14. L'option A L'ENVERS	24
B. Interactions réciproques de N corps célestes.	25
1. Principe	25
2. Mise en oeuvre	26
3. Suggestions (cas de deux astres)	27
4. Suggestions (cas de trois et quatre astres)	29
C. Expérience de Cavendish.	31
1. Principe.	31
2. Rappels théoriques.	31
3. Mise en oeuvre.	35
4. Exemple de Calcul.	36
D. Test d'évaluation par QCM (Système ACQC).	39
<b>V. POUR LE PROFESSEUR.</b>	<b>41</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.</b>	<b>44</b>

## Introduction

Parmi les quelques domaines d'application où les ordinateurs peuvent apporter un réel progrès pédagogique, les simulations d'expériences me semblent depuis toujours constituer l'une des démarches les plus profitables.

En effet : les professeurs qui enseignent des branches scientifiques savent bien que les méthodes pédagogiques les plus efficaces sont celles qui mobilisent au maximum l'activité de l'élève en classe, comme c'est le cas lors de séances de travaux pratiques, par exemple.

Or, l'élève utilisant un programme de simulation d'expérience bien conçu se trouve plongé dans une situation de travail très proche de celle qu'il peut vivre en laboratoire de sciences, mais avec ces différences que :

- Des expériences irréalisables concrètement pour des raisons diverses (coût trop élevé, durée d'expérimentation excessive, habileté des élèves insuffisante, etc ...) deviennent possibles.
- La situation expérimentale peut être simplifiée. Encore que ce point mérite d'être débattu, les opérations à effectuer sont en tous cas plus faciles et plus rapides que dans une expérience concrète.
- Ni le matériel expérimental, ni l'expérimentateur lui-même ne courent des risques en cas de fausse manoeuvre.
- Un véritable droit à l'erreur est instauré : l'étudiant peut décider lui-même sa stratégie expérimentale, procéder par tâtonnements, se tromper et recommencer éventuellement un grand nombre de fois ses tentatives, sans qu'il lui en coûte trop de temps ou d'argent.
- L'ordinateur peut guider l'élève et mémoriser le travail accompli. Ce dernier point a été particulièrement développé dans le présent logiciel, avec l'adoption du système ACQC (Auto-test Cyclique par QCM Commentées), nouvel outil d'évaluation formative mis au point tout récemment par l'auteur.

## I. Présentation du logiciel.

**GRAVILAB** est un logiciel de simulation expérimentale fort perfectionné, dont la première ébauche remonte à 1979. A cette époque, en effet, une première version fonctionnant sur Tandy TRS-80 simulait déjà l'expérience de Cavendish.

Plusieurs versions pour le PC ont été élaborées ensuite, chacune d'entre elles faisant l'objet d'une évaluation dans des classes véritables, jusqu'à celle qui est décrite ici même. Cette dernière version a été profondément remaniée par rapport à la précédente, pour bénéficier au maximum de l'énorme gain qualitatif apporté par le nouveau standard vidéo **VGA**, de plus en plus répandu dans les écoles. Elle bénéficie aussi de nombreuses améliorations techniques et pédagogiques :

Sur le plan technique, l'utilisation du logiciel est devenue d'une limpidité totale, toutes les fonctions étant à présent commandées par des boutons que l'on actionne à l'aide de la souris. D'autre part, les possibilités d'expériences ont été augmentées.

Sur le plan pédagogique, le logiciel se voit doter de pages de documentation supplémentaires, ainsi que d'un système d'aide à l'apprentissage par test d'auto-évaluation cyclique utilisant des QCM **commentées**, à accès libre et correction immédiate (Méthodologie ACQC).

Nous sommes convaincus que l'incorporation au programme d'un tel outil d'évaluation formative doit exercer sur l'apprentissage une action très stimulante : son accès est totalement libre et il n'est doté d'aucun dispositif de cotation.

**Gravilab** est devenu ainsi un outil pédagogique extrêmement élaboré, tout en restant parfaitement accessible au public auquel il est destiné, c.à.d. les jeunes élèves qui sont confrontés pour la première fois avec la mécanique céleste et l'étude de la force de gravitation.

**Gravilab** propose une démarche extrêmement proche de la pratique expérimentale de laboratoire, dans un domaine où de véritables expériences sont pratiquement hors de portée. En effet :

Observer les astres demande beaucoup de temps, un ciel bien dégagé, et, pour bien des corps célestes, ... qu'il fasse nuit !

Modifier les distances, les vitesses, les masses, est évidemment impossible: l'expérimentation astronomique proprement dite, à l'aide de fusées spatiales et de satellites artificiels, n'est pas à la portée de nos maigres budgets scolaires.

Il en va pratiquement de même en ce qui concerne la détermination expérimentale de la constante  $G$  : le matériel nécessaire coûte fort cher, et de toutes façons l'expérience est longue, délicate, pas très frappante, d'analyse difficile.

On ne pourra la réaliser, au mieux, qu'en démonstration devant la classe, et cette démonstration risque fort d'être peu convaincante.

Or il est aujourd'hui possible de remédier à cet état de choses, en faisant appel à des simulations sur ordinateur. On peut en effet assez aisément concevoir qu'un logiciel se charge de faire évoluer sur un écran un point lumineux, ou même un petit dessin, en lui attribuant le comportement d'un corps soumis à la seule action d'un champ gravitationnel. Depuis Newton, nous connaissons bien le modèle mathématique de la gravitation : ce modèle peut être introduit dans un programme, et la puissance de calcul de la machine fait le reste.

Dès lors, nous pouvons simuler de nombreuses situations expérimentales, soit proches de celles que nous connaissons concrètement, soit au contraire à peu près inaccessibles.

Par exemple, nous pouvons commencer par lancer notre objet d'expérience imaginaire dans le voisinage d'un astre massif tout aussi imaginaire, avec une vitesse initiale de plus en plus grande.

Nous allons alors constater :

- d'abord le simple phénomène de chute libre, avec une trajectoire de plus en plus allongée en proportion de la vitesse initiale choisie;
- et puis, au-delà d'une certaine vitesse, le phénomène de satellisation: l'objet ne rejoint plus le sol, parce que la courbure de sa trajectoire de chute libre est devenue inférieure à celle du sol lui-même. La chute libre se transforme alors en mouvement orbital, et l'objet ainsi lancé est devenu un satellite artificiel de l'astre.

La forme de la trajectoire que nous aurons ainsi obtenue sera très probablement une ellipse.

En outre, il nous sera facile d'observer que le long de cette trajectoire, le satellite évolue plus lentement lorsqu'il est éloigné de l'astre, et plus rapidement quand il s'en rapproche; nous pourrons alors demander à l'ordinateur de tracer à intervalles de temps égaux des lignes droites

joignant les centres de l'astre et de l'objet, et puis de calculer la valeur des surfaces ainsi délimitées à l'intérieur de la trajectoire: nous aurons ainsi illustré sans grande peine les deux premières lois de Kepler concernant le mouvement des planètes.

En tâtonnant un peu, nous arriverons vite à lancer un satellite sur une trajectoire à peu près circulaire. Nous pourrons alors mesurer sa période de révolution (et la noter). Si nous recommençons cet exercice à plusieurs reprises, en faisant varier le rayon de l'orbite ainsi décrite autour du même astre, il nous deviendra possible d'établir une relation liant le rayon de cette orbite à la période correspondante, et nous redécouvrirons ainsi aussi la troisième loi de Kepler.

Nous pourrons bien sûr vérifier plus directement la loi de gravitation universelle elle-même, en analysant par exemple la manière dont l'accélération d'un même objet varie suivant qu'on le place à différentes distances d'un même astre, ou bien à une même distance d'astres de masses différentes.

Nous pourrons encore reproduire le mouvement de corps célestes connus: celui de la lune autour de la terre, celui de la terre ou d'une autre planète autour du soleil, celui des satellites de Jupiter, etc ...

En changeant de programme, il nous sera également possible de simuler l'expérience historique de Cavendish, concernant la détermination expérimentale de  $G$ , sans devoir manipuler un appareillage délicat et en un temps raisonnablement court. L'expérience sera d'autant plus intéressante qu'elle sera réalisée par les élèves eux-mêmes, indépendamment sur chacune des machines utilisées, car les paramètres de départ pourront être différents. L'ordinateur se chargera en outre de guider le travail et de mémoriser les mesures.

Nous pouvons même envisager d'aller encore beaucoup plus loin :

L'ordinateur nous permet en effet d'aborder, toujours par simulation, ce qu'il est convenu d'appeler, en mécanique céleste, le "problème à  $N$  corps" :

*Est-il possible d'établir les trajectoires de  $N$  corps célestes de masses proches, laissés à eux-mêmes, sous l'effet des champs de gravitation qu'ils exercent les uns sur les autres ?*



La résolution théorique de ce problème, quand  $N$  est plus grand que 2, est extraordinairement compliquée. Le mouvement de chacun des corps célestes modifie constamment la configuration du champ de gravitation agissant sur tous les autres, ce qui transforme les calculs de trajectoire en un casse-tête quasi insoluble.

Seule la simulation sur ordinateur permet une approche de la solution, et le résultat est un imprévisible ballet tout à fait fascinant.

Le mot n'est pas trop fort : on peut effectivement ressentir une véritable fascination à regarder la course étrange de trois ou quatre corps célestes évoluant sous l'influence de toutes leurs attractions gravitationnelles combinées.

L'esprit se plaît à conjecturer les trajectoires probables, à chercher pour quelles raisons obscures tel jeu de conditions initiales aboutit à une situation dynamique stable, les objets tournant sans cesse les uns autour des autres sans jamais se heurter, alors que tel autre détermine une évolution de type catastrophique, conduisant à des collisions, etc.

Il est important, je crois, que de jeunes étudiants s'initiant aux sciences puissent éprouver ce genre d'émotions en faisant la découverte de phénomènes naturels, qu'ils puissent ressentir comme ce sera certainement le cas ici une certaine jubilation dans leur recherche.

## II. Objectifs et directives pédagogiques.

1. Ce programme a été conçu de telle manière qu'il puisse être mis dans les mains de jeunes n'ayant pratiquement aucune connaissance préalable. Il est donc parfaitement possible de l'utiliser très tôt, directement après une introduction décrivant par exemple quelques étapes importantes dans l'histoire de l'Astronomie.

Il est important que l'élève puisse avoir le sentiment de découvrir par lui-même cette matière. Il devrait être aisé de réaliser ensuite, après quelques séances de travail, une brève révision/synthèse, au tableau ou avec l'aide d'un rétroprojecteur et d'acétates.

L'objectif principal est de stimuler chez l'élève un comportement très actif dans l'approche de lois physiques fondamentales, l'essentiel n'étant pas qu'il réalise au mieux des expériences prédéfinies par le professeur, mais plutôt qu'il arrive à se poser à lui-même certaines questions, et à choisir lui-même une démarche expérimentale pour arriver à y répondre.

C'est là que réside en effet le principal avantage de la simulation (à but didactique) par rapport à l'expérimentation concrète. Dans une simulation sur ordinateur, on peut permettre à l'élève une liberté de manoeuvre quasi absolue, sans qu'il n'en résulte un danger ou une grande perte de temps. Le professeur qui accepte de suivre cette méthodologie doit cependant être averti que le cheminement de ses élèves ainsi laissés à eux-mêmes sera souvent fort lent au début : il ne doit pas s'en inquiéter (la progression s'accélèrera par la suite), mais il lui faut rester attentif à ce qui se passe dans la classe, et aider certains élèves à se poser les bonnes questions.

2. La documentation incorporée au logiciel propose de nombreuses pages d'explications concernant les expériences réalisables. Il donne des indications suffisantes pour que l'élève puisse travailler, mais ne constitue cependant pas un cours à part entière.

Nous avons estimé, d'une part, qu'il n'est pas souhaitable de donner à lire de longs textes à l'écran (cela se révèle rapidement fastidieux), et d'autre part, que les ouvrages de référence doivent retrouver toute leur importance dès lors qu'il est question d'approfondir un sujet.

Il donc conseillé au professeur d'exiger de ses élèves une certaine recherche bibliographique complémentaire. Un logiciel tel que celui-ci n'est qu'un outil pédagogique parmi d'autres. Il ne doit pas supplanter l'utilisation de bons manuels.

**3.** Un test d'auto-évaluation par QCM a été incorporé au programme. Ce test ne constitue pas une interrogation, encore qu'il puisse très utilement préparer l'élève (ou groupe d'élèves) en vue d'une interrogation véritable sur le même sujet. Il utilise la nouvelle méthodologie **ACQC**, aboutissement actuel des recherches de l'auteur pour la mise au point d'un outil pédagogique concret et efficace en matière d'auto-évaluation formative.

**L'ACQC** (Auto-test Cyclique par QCM Commentés) est fondamentalement un test d'auto-évaluation, basé sur l'utilisation de questions à choix multiple, et dont les particularités sont les suivantes :

- Le but de ce test est de faciliter un apprentissage. **Il n'est sanctionné par aucune cote**, et ne constitue donc absolument pas une nouvelle forme d'interrogation. (Il s'agit d'un outil d'évaluation formative, et non d'évaluation certificative : pour cette dernière, on peut utiliser également les QCM, mais d'une autre manière, comme celle qui est proposée avec le logiciel QCM5, par exemple).

- L'objectif concret proposé à l'élève n'est pas de réaliser un certain score (en accumulant des points), mais bien **d'arriver à répondre correctement à toutes les questions**, au terme d'un processus **cyclique** dans lequel l'ensemble du test lui sera représenté encore et encore, aussi longtemps qu'il y restera des questions non résolues. (Les questions réussies à plusieurs reprises successives sont toutefois progressivement éliminées). Chacun est donc condamné à réussir le test complet (et donc aussi à apprendre, par voie de conséquence, s'il y met un peu de bonne volonté).

- Après chaque réponse (qu'elle soit correcte ou fausse), la solution est indiquée et **un commentaire de quelques lignes apparaît**. Si la réponse fournie est correcte, ce commentaire encourage l'élève et renforce sa connaissance. Si la réponse fournie est fausse, les nouvelles explications qui sont données ainsi constituent une correction efficace de la faute, commise en général à la suite d'un raisonnement déficient ou incomplet.

Cette technique permet en outre de réduire à rien le risque que l'élève mémorise de mauvaises réponses.

- L'accès aux questions du test est tout à fait libre. A tout moment, l'utilisateur peut décider de quitter le questionnaire et de retourner à la simulation, pour revenir au questionnaire ensuite quand il pense mieux maîtriser le sujet.

- La question présente à l'écran peut toujours être "passée", c.à.d. que l'utilisateur peut toujours décider de la reporter à plus tard et d'en faire apparaître une autre à sa place. Il peut même faire défiler toutes les questions sans répondre à aucune d'entre elles. (Tout comme dans une interrogation écrite traditionnelle, ou il est permis - et même conseillé - de lire toutes les questions du test avant de commencer à y répondre). L'ordre de présentation des questions n'est donc pas une contrainte imposée par le système.

- Les erreurs commises servent l'apprentissage. Immédiatement mises en évidence et corrigées, elle permettent en effet de rectifier un raisonnement inexact, et donc d'aborder les questions suivantes - ou la suite de la simulation - dans de meilleures conditions. La compréhension de l'utilisateur s'affine donc de question en question, ce qui est bien différent de ce qui se passe au cours du processus d'interrogation classique, dans lequel l'élève ignore la validité de ses réponses tout au long du test. Notons aussi que les fautes ne sont pas pénalisantes.

- Il n'est pas nécessaire que chaque élève puisse disposer individuellement d'un ordinateur. Le test peut être proposé à des équipes. (Encore une fois, il s'agit d'apprentissage, et non d'évaluation des acquis).

La plupart des étudiants aiment travailler par petits groupes (L'idéal est de les limiter à deux individus, cependant). En discutant avec leur partenaire, ils apprennent à exprimer leur compréhension des phénomènes et confrontent leur logique avec celle d'un égal. Cela est bénéfique.

- Les questions sont présentées au départ de chaque passe du test dans un ordre aléatoire, pour limiter la tentation de copie entre postes de travail voisins. Les résultats provisoires sont mémorisés sur disquette à la fin du travail, et peuvent être récupérés au début de la séance suivante.

**Note :**

*En principe, les questions à choix multiple ne devraient jamais être utilisées, dans un but d'évaluation, qu'avec des degrés de certitude.*

*Sans cette précaution, il est statistiquement possible qu'un élève répondant au hasard arrive à réaliser un score honorable, ce qui est évidemment inacceptable. Si le professeur désire utiliser la technique des QCM pour interroger ses élèves (Les QCM constituent par ailleurs un outil d'évaluation d'une très grande qualité), il lui convient d'employer une méthodologie plus élaborée. L'utilisation conjointe des degrés de certitude, que nous estimons indispensable, permet en outre de promouvoir la poursuite d'un objectif pédagogique essentiel : former l'élève à s'auto-évaluer.*

*L'avènement de la micro-informatique permet dorénavant à chaque professeur d'exploiter l'outil QCM dans les meilleures conditions.*

*Il lui est possible en effet de se créer une "banque" de questions toujours disponibles, de préparer des feuilles d'interrogations personnalisées empêchant la fraude, de mettre en oeuvre des procédures de correction sophistiquées.*

*Nous avons nous-mêmes développé un programme d'ordinateur ambitieux pour gérer tout cela efficacement, ainsi que quelques autres tâches contraignantes du métier d'enseignant (Journal de classe, Cahier de matières, Carnet de cotes). Ce logiciel se nomme **QCM5** et fonctionne sur tout ordinateur compatible PC.*

*Il est fourni avec une banque initiale de plus de 3000 questions.*

*La documentation de ce programme comporte une description détaillée des particularités des QCM, ainsi que des modalités de leur utilisation pour évaluer les performances des élèves.*

*Nous invitons l'enseignant désireux d'utiliser les QCM dans ses interrogations, à consulter ce manuel, ainsi que les excellents ouvrages du professeur D. Leclercq (Université de Liège) dont nous citons les références en annexe de ce petit manuel.*

*Il lui est également possible de contacter **Génération 5** qui peut lui fournir des explications détaillées sur simple demande.*

***Il faut savoir, en tous cas, que l'utilisation d'une grille de correction avec degrés de certitude est un outil pédagogique incomparable pour former les étudiants à l'auto-évaluation et à la prise de responsabilités.***

### III. Mise en oeuvre du logiciel.

#### A. Installation du logiciel sous MSDOS.

Ce logiciel est très économe en matière d'utilisation de la mémoire et de l'espace disque. Il ne nécessite pas la présence de Windows et fonctionne très bien sur des ordinateurs de type 286, 386, 486, etc.

Vous pouvez indifféremment l'installer sur disquette ou sur disque dur : les performances en resteront identiques.

Le programme installé occupe un espace d'environ 300 kilo-octets.

Commencez par installer le logiciel sur une machine fonctionnant sous Windows. Ensuite, recopiez l'intégralité du répertoire d'installation sur une disquette, ou sur le disque dur de la machine cible. Lancez le programme en frappant GRAVILAB.

#### Rappel

Vous êtes autorisé à faire des copies du logiciel sur des disquettes de travail, mais seulement en nombre suffisant pour les ordinateurs qui sont destinés à travailler en parallèle **dans un même local**.

Vous ne pouvez pas distribuer le programme aux élèves ni à d'autres professeurs, même au sein de votre institution scolaire.

Conservez sous clef les disquettes de travail : en cas de copie illicite, votre responsabilité est engagée. Ne laissez pas en permanence le logiciel sur le disque dur de machines accessibles à d'autres que vous.

## B. Remarques complémentaires.

1. Le programme est utilisable avec un moniteur monochrome.

***Note** : Des problèmes d'affichage peuvent parfois se manifester avec des ordinateurs équipés de certaines cartes graphiques **VGA** connectées à un moniteur monochrome. Dans ce cas, il faut essayer la commande MSDOS : `MODE CO80` avant de lancer le programme.*

2. Pour pouvoir utiliser **GRAVILAB** dans les meilleures conditions, il est souhaitable que vous puissiez également disposer d'une souris. Cette souris doit être une souris "compatible Microsoft<sup>®</sup>", et il faut qu'un gestionnaire de souris approprié ait été chargé en mémoire, à la mise en marche de l'ordinateur. (Le programme reste toutefois parfaitement utilisable - à l'aide du clavier - si vos ordinateurs ne sont pas équipés de souris).

3. En cas d'erreur au démarrage, vérifiez les points suivants :

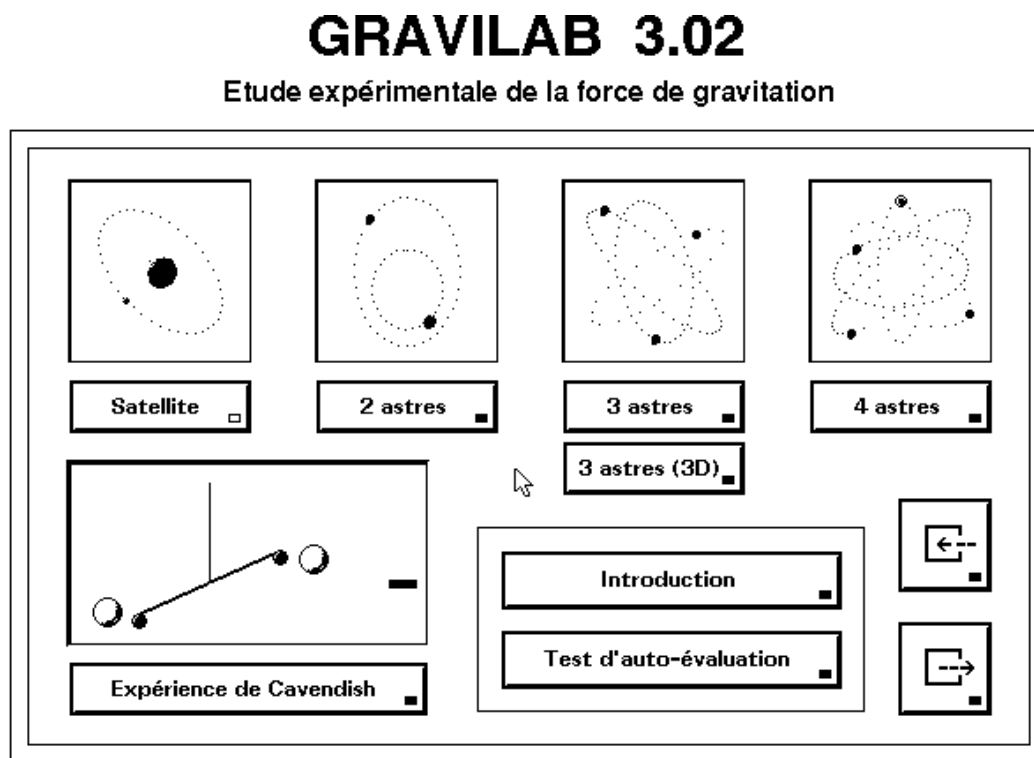
- Votre ordinateur doit accepter le mode d'affichage vidéo **VGA**, ou supérieur. Tout autre mode d'affichage ancien (CGA, EGA, Hercules, etc.) est incompatible.
- Pendant la phase de lancement, tous les fichiers créés lors de l'installation doivent être accessibles dans le répertoire courant.

Ensuite, tout se passe en mémoire vive (sauf l'enregistrement de la situation acquise en fin de séance de travail, bien entendu).

Il n'est donc pas nécessaire de laisser la disquette <programme> en permanence dans le lecteur de la machine. Quand le menu principal apparaît à l'écran, on peut remplacer la disquette <programme> par une disquette formatée quelconque : celle-ci recevra les fichiers de sauvegarde créés ou modifiés en cours de travail.

## C. Démarrage du logiciel.

Après la séquence de présentation, vous obtenez le **menu principal** :



(C) G. Swinnen 1979-1995 License granted to A. Laurent - R. du Bon Pasteur - Chambéry.

Toutes les fonctions du programme sont commandées par des boutons. Vous pouvez actionner ces boutons, soit à l'aide de la souris, soit à l'aide du clavier. Dans ce cas, vous commencez par sélectionner le bouton de votre choix à l'aide des touches fléchées (Chaque bouton est muni d'un petit témoin d'activité qui devient lumineux (=jaune) quand le bouton est sélectionné), ensuite vous frappez [Enter].

Lorsqu'aucun bouton n'est affiché (cas où l'écran est entièrement occupé par une page de texte explicatif, par exemple), vous passez à la suite du programme en "cliquant" n'importe où à l'aide de la souris, ou bien en actionnant la touche [Enter].

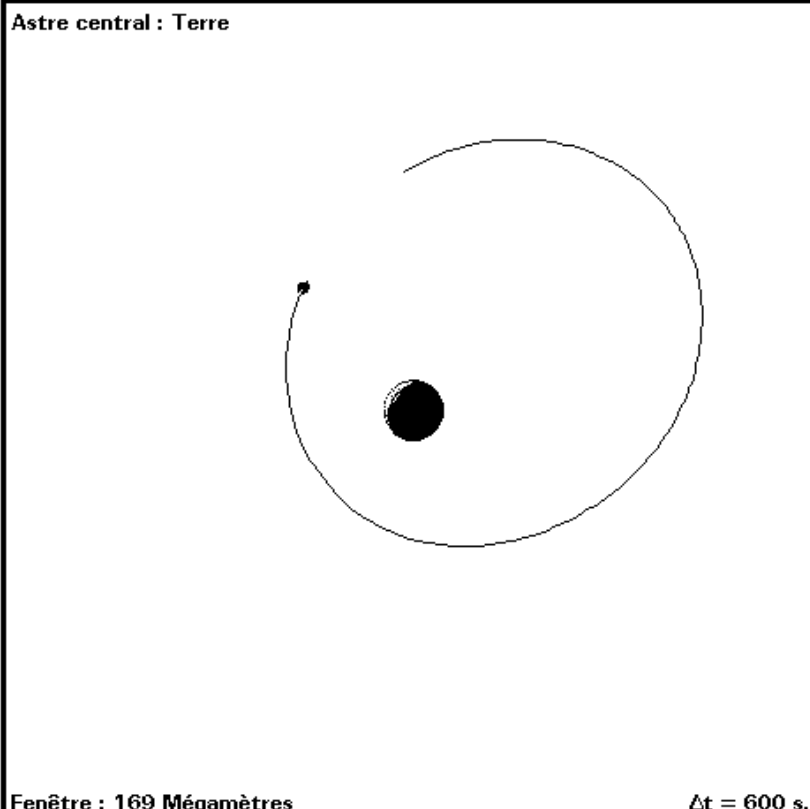


## IV. Fonctions & commandes du logiciel.

### A. Satellisation autour d'un astre massif.

Cette première fonction de **Gravilab** permet d'étudier le comportement d'un corps léger soumis à l'attraction d'un astre de masse beaucoup plus élevée, que l'on considère comme étant immobile.

On peut ainsi observer les conséquences les plus simples de la loi Newtonienne de la gravitation universelle : chute libre, trajectoires balistiques, lois de Kepler, variations de vitesse et d'accélération.

<input type="checkbox"/> vecteurs v & a	<p>Astre central : Terre</p> 
<input checked="" type="checkbox"/> Trajectoire	
<input type="checkbox"/> Pas à pas	
<input type="checkbox"/> à l'envers	
<input type="checkbox"/> 2e loi de Kepler	
Start	
Effacer les tracés	
Menu précédent	
<p>Chaque commande est documentée. Utilisez [F1] (clavier) ou le bouton droit (☺) pour obtenir de l'aide.</p>	
<p>Temps (s) 85799.88 Distance (Mm) 33.51846 Vitesse (km/s) 3.834505 Accélération (m/s<sup>2</sup>) .3551315</p>	
<p>Fenêtre : 169 Mégamètres <span style="float: right;">Δt = 600 s.</span></p>	

Les commandes disponibles sont d'utilisation assez évidente (boutons poussoirs). De plus, chacune d'entre elles est auto-documentée. Il suffit en effet d'enfoncer le bouton droit de la souris, ou la touche F1, en pointant l'un quelconque des boutons de commande affichés, pour en obtenir aussitôt une brève description à l'écran.

## 1. La commande DOCUMENTATION

**Gravilab** est un logiciel très documenté. Ne négligez pas de consulter les pages d'explications disponibles, qui diffèrent suivant la phase de simulation en cours.

Page préc. ■ Page suiv. ■ Quitter ■

\* Vérification de la seconde loi de Kepler \*

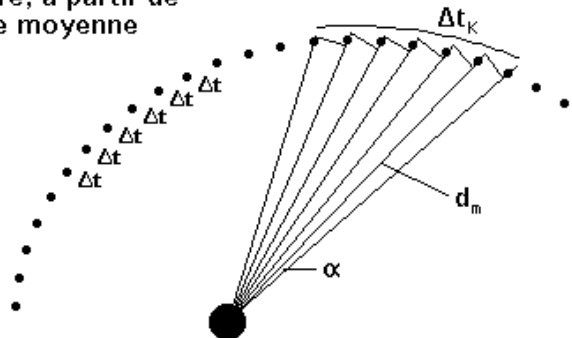
Cette loi affirme que la vitesse d'une planète orbitant autour du soleil varie de telle façon qu'une ligne droite (imaginaire) reliant la planète au soleil balaie des aires égales en des temps égaux.

Pour vérifier cette proposition, GRAVILAB est muni d'un dispositif qui calcule de telles superficies par une approximation dont le principe est le suivant :

Les positions successives occupées par le satellite sur sa trajectoire sont séparées les unes des autres par un certain intervalle de temps  $\Delta t$ , dont vous pouvez vous-même choisir la valeur (voir "Incrément de temps", pages préc.).

D'une de ces positions à la suivante, le programme peut calculer l'aire d'un triangle tel ceux représentés ci-contre, à partir de l'angle au sommet  $\alpha$  et de la distance moyenne  $d_m$  séparant l'astre et le satellite durant l'intervalle de temps  $\Delta t$ .

Les aires des triangles sont alors sommées pendant une certaine durée  $\Delta t_k$  que vous décidez également par vous-même.



## 2. La commande ASTRE CENTRAL

La commande **Astre central** permet de choisir le corps céleste autour duquel on souhaite satelliser un objet.

L'astre placé au centre de l'écran peut être au choix : le soleil, Jupiter, la terre, la lune, ou même un astre <paramétrable>, dont vous pouvez définir librement vous-même la masse et le rayon.

Vous pourrez ainsi réaliser - par exemple - une série d'expériences dans lesquelles vous lancerez plusieurs fois le même satellite de la même manière, à partir des mêmes position et vitesse initiales, mais en faisant varier la masse ou le rayon de l'astre central. (Voyez la commande <Position>, plus loin dans ce chapitre, pour savoir comment replacer aisément le satellite dans les mêmes conditions initiales).

### 3. La commande ZOOM

On peut agrandir ou rétrécir le champ d'observation à l'aide de cette commande **Zoom**. Veuillez noter que la dimension du carré d'espace observé à travers la fenêtre de travail est affichée en permanence en bas à gauche : cette dimension est exprimée en mégamètres (Mm).

**Rappel** : Un mégamètre vaut un million de mètres, soit mille kilomètres.

Il peut arriver que le satellite utilisé sorte de la fenêtre d'observation. On pourra généralement le retrouver en augmentant la dimension de cette fenêtre, avec la commande **Zoom**. Une autre possibilité consiste à actionner la commande **Position initiale**, laquelle ramène automatiquement le satellite à sa position de départ "par défaut" dans la fenêtre, s'il en était sorti.

### 4. La commande POSITION INITIALE

Cette commande permet de déplacer le satellite, à l'aide de la souris ou des touches fléchées, pour l'amener en n'importe quel point de la fenêtre d'observation avant d'effectuer un lancer.

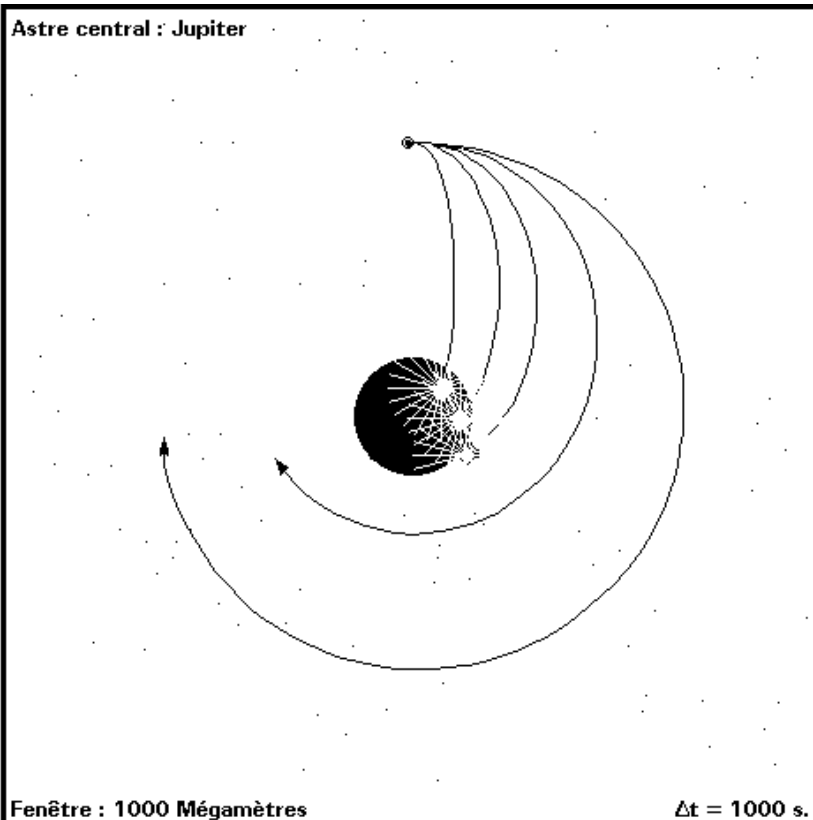
Pendant le déplacement, la distance à laquelle le satellite se trouve par rapport au centre de l'astre, ainsi que la valeur du champ de pesanteur régnant à l'endroit où il se trouve, sont affichées en permanence.

**Note** : Si vous enfoncez le bouton droit de la souris alors que la commande <Position initiale> est activée, le satellite est ramené automatiquement à une position de départ "par défaut", toujours la même, et la vitesse initiale redevient automatiquement ce qu'elle était pour le lancer précédent.

### 5. La commande VITESSE INITIALE

A l'aide de cette commande, on détermine la vitesse que l'on souhaite communiquer au satellite, avant de l'abandonner à la seule influence de la gravitation.

Il faut d'abord fournir la valeur numérique de cette vitesse (en km/s), et ensuite orienter le vecteur convenablement, à l'aide de la souris (déplacée latéralement) ou à l'aide des touches fléchées.

<input type="checkbox"/> vecteurs v & a	<p>Astre central : Jupiter</p> 	
<input checked="" type="checkbox"/> Trajectoire		
<input type="checkbox"/> Pas à pas		
<input type="checkbox"/> à l'envers		
<input type="checkbox"/> 2e loi de Kepler		
Start		
Effacer les tracés		
Menu précédent		
<p>Chaque commande est documentée. Utilisez [F1] (clavier) ou le bouton droit (☺) pour obtenir de l'aide.</p>		
<p>Temps (s) 74000 Distance (Mm) 312.747 Vitesse (km/s) 20.47079 Accélération (m/s<sup>2</sup>) 1.296055</p>		

Fenêtre : 1000 Mégamètres Δt = 1000 s.

## 6. La commande EFFACER LES TRACES

**Gravilab** vous permet d'effectuer de nombreux essais successifs dans la même fenêtre de travail, les trajectoires successives restant affichées en permanence aux fins de comparaison. Cette commande permet de les faire disparaître.

## 7. La commande ANIMATION

Cette commande provoque l'apparition d'une seconde série de boutons de contrôle permettant de sélectionner encore quelques options et/ou paramètres avant de lancer la simulation proprement dite.

## 8. Le paramètre INCREMENT DE TEMPS

Choisir judicieusement ce paramètre présente une grande importance pour l'intérêt et la validité de la simulation. En effet :

Pour un programme d'ordinateur, simuler le mouvement d'un objet laissé à lui-même dans un champ de gravitation consiste à calculer les différentes positions successivement occupées par cet objet.

Pour ce faire, il faut d'abord déterminer la valeur du champ de pesanteur à l'endroit où l'objet se trouve. Conformément à la loi de Newton, le champ gravitationnel régnant à une distance  $r$  d'un astre de masse  $M$  vaut  $G.M/r^2$ . ( $G = 6,672.10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}^2.\text{kg}$ )

On sait que la valeur numérique du champ de pesanteur régnant en un point donné est égale à l'accélération qui sera communiquée à un corps quelconque placé en ce point. La formule ci-dessus fournit donc directement l'accélération de notre satellite.

A partir de cette donnée, on peut considérer un certain intervalle de temps et calculer quelles modifications de vitesse et de position vont affecter le satellite pendant qu'il s'écoule, **en supposant que l'accélération elle-même ne varie pas pendant cet intervalle de temps** (ce qui est généralement inexact).

Il est donc clair que les calculs effectués comporteront systématiquement une certaine erreur, et que cette erreur sera d'autant plus faible que l'intervalle de temps séparant les différents calculs sera lui-même petit. A la limite, l'erreur s'annulerait, et le tracé de la trajectoire deviendrait parfait, si l'on pouvait choisir pour séparer les calculs un intervalle de temps infiniment petit.

Aucun ordinateur ne peut cependant effectuer des calculs sur la base de nombres infiniment petits.

D'autre part, plus l'intervalle de temps séparant les positions successives est faible, plus le nombre de calculs nécessaires pour établir une trajectoire complète est grand, ce qui risque de ralentir fortement le tracé de cette trajectoire par l'ordinateur.

En pratique, il faut donc choisir judicieusement l'intervalle de temps servant de base aux calculs successifs de position, en essayant de réaliser le meilleur compromis entre, d'une part, une vitesse de tracé raisonnable, et d'autre part, une forme de trajectoire correcte.

Concrètement, vous pouvez considérer que l'intervalle de temps que vous avez choisi est suffisamment court, si la trajectoire obtenue avec cet intervalle est sensiblement la même que celle que vous obtenez avec un intervalle de temps deux fois plus faible.

En règle générale, vous avez intérêt à choisir un intervalle de temps assez grand si le satellite reste assez éloigné de l'astre central. Si la distance entre eux diminue, il faut aussi diminuer l'intervalle de temps.

Si l'intervalle de temps choisi est trop grand, il peut arriver que la trajectoire devienne tout à fait aberrante, quand le satellite se rapproche fortement de l'astre. En effet :

L'objet se rapproche de l'astre --> l'accélération calculée est forte.

Sur cette base, et si l'intervalle de temps est grand, le calcul effectué pour la position suivante du satellite le situe à une distance infime de l'astre (il peut parfois entrer à l'intérieur !). Il s'ensuit alors que le calcul des valeurs suivantes pour l'accélération et la vitesse deviennent excessives. Le résultat habituel est que l'objet s'éloigne à toute allure, et quitte la fenêtre d'observation.

### 9. L'option VECTEURS V & A

Sélectionner cette option entraîne l'affichage des vecteurs vitesse et accélération s'appliquant au satellite. Ces vecteurs apparaissent comme de petits traits de longueur constante, qui indiquent seulement l'orientation des vecteurs correspondants (tracer des vecteurs de taille variable entraîne de nombreux problèmes d'affichage).

### 10. L'option TRAJECTOIRE

Si cette option est sélectionnée, l'ordinateur trace la trajectoire du satellite autour de l'astre.

#### **\*\* Pour mesurer une période de révolution :**

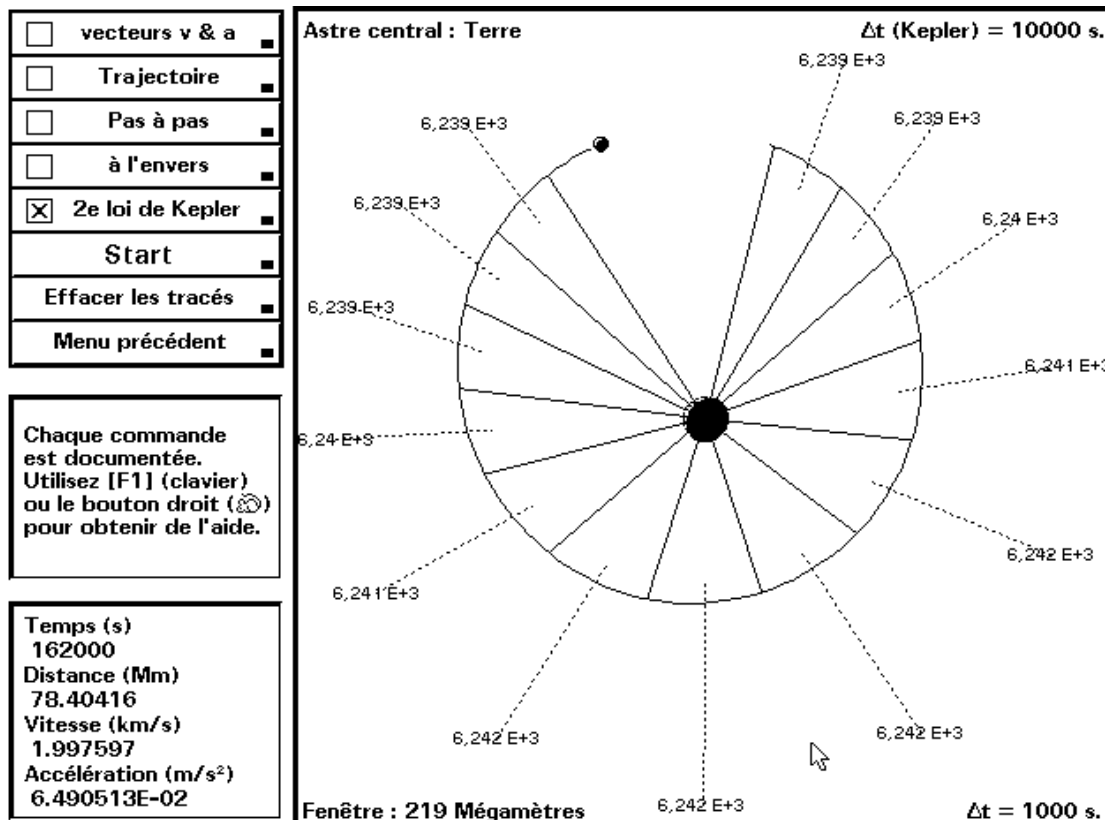
Chaque fois que l'on met l'animation en route avec **<Start>**, le chronométrage automatique est remis à zéro. Pour mesurer la durée d'une révolution complète du satellite autour de l'astre, on peut donc procéder comme suit :

- Enclencher l'option **<trajectoire>**.
- Lancer l'animation proprement dite avec **<Start>**.
- Stopper au moment précis où l'objet a bouclé sa trajectoire.
- Noter le temps écoulé.

Une autre possibilité consiste à utiliser l'option **<2de loi de Kepler>** décrite ci-après.

## 11. L'option 2e LOI DE KEPLER

La seconde loi de Kepler, ou loi des aires égales, affirme que le mouvement d'une planète quelconque autour du soleil ne se fait pas à vitesse constante, mais bien de telle manière qu'une ligne droite (imaginaire) reliant le soleil à la planète balaie des aires égales pendant des temps égaux.



Cette loi peut être illustrée très facilement et très clairement à l'aide de l'option présente. Lorsqu'elle est enclenchée, il suffit de choisir la valeur des intervalles de temps pour lesquels **Gravilab** devra calculer les aires balayées par la droite [Astre central - Satellite], puis de lancer l'animation avec <Start>.

L'animation s'arrête automatiquement après une révolution complète autour de l'astre.

### Notes :

- Vous pouvez vérifier ainsi la validité de la loi, non seulement dans le cas classique d'une trajectoire fermée, mais aussi pour toute autre forme de trajectoire (ellipse, parabole, hyperbole).
- Utilisez aussi cette option pour mesurer facilement les périodes de révolution (arrêt automatique après un tour complet).

## **12. La commande START**

L'animation proprement dite démarre avec cette commande.

Si l'option **<pas à pas>** a été sélectionnée, il faudra frapper [**Enter**] après chaque calcul pour continuer la simulation.

Pour terminer l'animation, frapper [**Esc**].

## **13. L'option PAS A PAS**

Il vous faut enclencher cette option si vous souhaitez examiner en détail l'évolution d'un phénomène.

Dans ce mode de fonctionnement, en effet, le programme s'interrompt après chaque nouveau calcul de position. Vous devez alors frapper [**Enter**] à chaque fois pour continuer.

Vous pouvez ainsi suivre pas à pas l'évolution des valeurs de distance, vitesse et accélération, en fonction du temps de simulation écoulé, et prendre des notes.

## **14. L'option A L'ENVERS**

Cette option révèle son utilité quand on constate que le mouvement étudié s'est déroulé trop vite, et que l'on souhaite revenir en arrière pour retrouver une même situation de départ, ou revoir en détail ce qui vient de se produire. Il est souvent préférable dans ce cas d'enclencher aussi l'option **<Pas à pas>**.



## B. Interactions réciproques de N corps célestes.

### 1. Principe

Dans tout ce qui précède, on a considéré que l'une des deux masses en interaction gravitationnelle était immobile (l'astre central).

Or ce n'est jamais vrai qu'approximativement. En fait, deux astres quelconques s'attirent **l'un l'autre**, ce qui veut dire que chacun des deux accélère constamment vers l'autre sous l'effet de la force de gravitation, **et vice-versa**. Ils sont donc en mouvement tous les deux. Toutefois, si les masses des deux astres considérés sont très différentes, les intensités de leurs mouvements respectifs sont également très différentes, au point que l'on puisse pratiquement admettre que l'un des deux est fixe. Dans le cas du système solaire, par exemple, les lois de Kepler ne sont à peu près correctes que parce que la masse du soleil est beaucoup plus importante que celle de n'importe quelle planète : le soleil bouge donc très peu, et les orbites des planètes tournant autour de lui sont des ellipses presque parfaites autour d'un foyer pratiquement immobile.

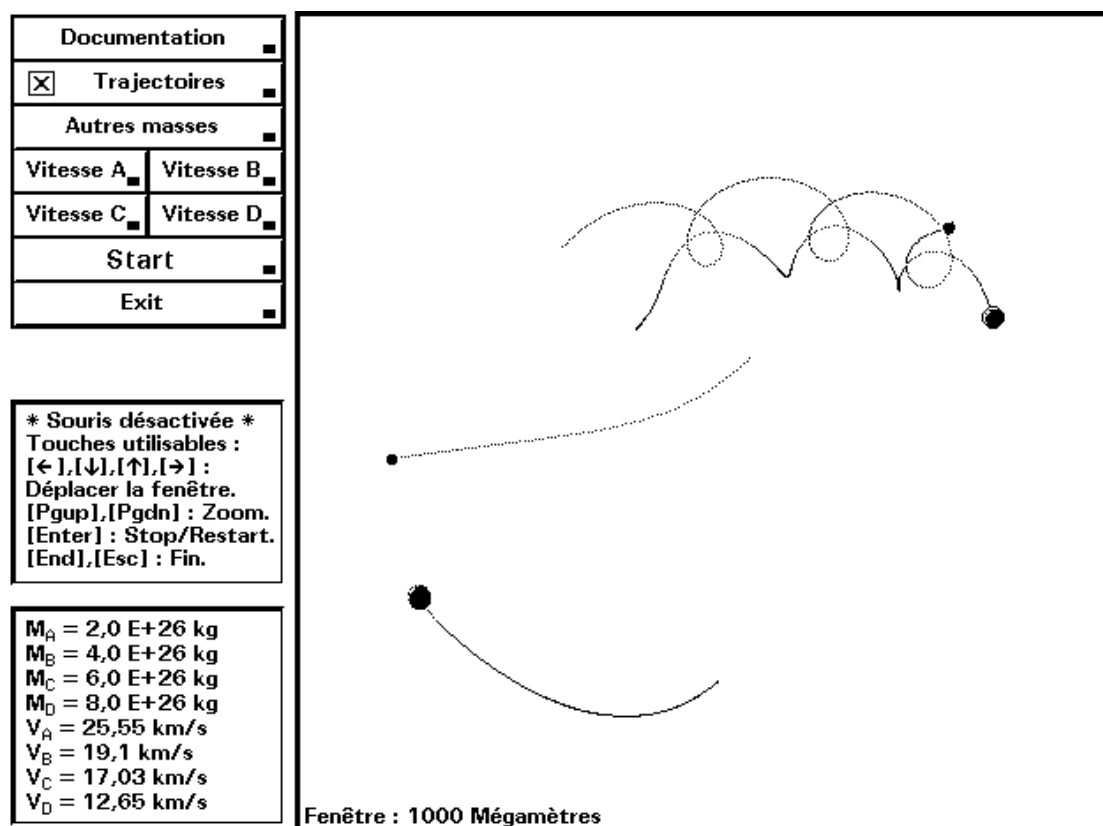
Dans cette partie du logiciel, par contre, vous pourrez observer que les mouvements célestes se révèlent beaucoup plus complexes si on les examine de manière tout à fait générale. Les masses des astres en interaction seront ici du même ordre, ce qui n'autorisera plus de négliger l'une d'entre elles par rapport à une autre.

D'après la loi de la gravitation de Newton, tous les astres exercent les uns sur les autres des forces qui changent constamment, parce que les positions respectives de ces mêmes astres changent constamment.

Les mouvements qui en résultent ne restent simples que dans le cas où seulement deux astres interagissent. Tous les deux ont alors des trajectoires appartenant au groupe des "coniques" (ellipse, parabole, hyperbole), organisées autour d'un centre de gravité commun qui peut être lui-même immobile, ou bien en mouvement rectiligne uniforme.

Si le nombre d'astres en interaction est supérieur à deux, les trajectoires deviennent extraordinairement complexes. Les calculer constitue ce que les physiciens appellent "problème à N corps". Chaque astre subit en permanence les attractions combinées de tous les autres, et agit en retour sur les évolutions de chacun d'eux. Du fait de ces mouvements eux-mêmes, la configuration des champs de gravitation change continuellement et modifie en retour ces mêmes mouvements. Le résultat est un extraordinaire ballet aux arabesques tourmentées.

Il n'est plus possible de prédire la forme des trajectoires résultantes à l'aide d'une théorie simple, comme dans le cas de deux astres.



En revanche, un algorithme d'ordinateur relativement simple peut simuler de telles évolutions en recalculant sans cesse quelles forces résultent de la disposition actuelle des astres en présence.

## 2. Mise en oeuvre

**Gravilab** vous permet de simuler les interactions de deux, trois ou quatre astres de masses comparables. Pour simplifier la compréhension des phénomènes, la plupart des mouvements simulés ont lieu dans un seul plan, et vous ne pouvez modifier à votre gré qu'un petit nombre de paramètres.

Les corps célestes proposés apparaissent toujours au départ dans la même disposition, c.à.d. groupés au centre de l'écran. Ces positions initiales, ainsi d'ailleurs que les valeurs des masses elles-mêmes, ne peuvent pas être modifiées. Vous pouvez seulement choisir quelques combinaisons de départ typiques, à l'aide du bouton **<Autres masses>**.

Sauf dans le cas particulier de l'option <**Trois astres, 3D**>, les vitesses des astres en présence sont toujours dans le même plan (celui de la fenêtre d'observation). Vous pouvez en choisir librement les valeurs initiales (intensité et orientation).

Au cours de la simulation, le gestionnaire de souris est désactivé. Par contre, vous pouvez sans interrompre l'expérience :

- Agrandir ou rétrécir la fenêtre d'observation (effet de zoom) à l'aide des touches [**PgUp**] et [**PgDn**].
- Déplacer la fenêtre d'observation, à l'aide des 4 touches fléchées.
- Suspendre temporairement l'animation (figer le mouvement des astres), à l'aide de [**Enter**]. Un second appui sur [**Enter**] permet de continuer.

Il vous est donc facile de suivre l'évolution des objets dans l'espace, même si leur vitesse finit par les entraîner en dehors de l'écran.

Pour quitter l'animation, utilisez la touche [**End**] ou la touche [**Esc**].

### **3. Suggestions (cas de deux astres)**

Les pages qui suivent vous indiquent quelques conseils pour le choix des vitesses initiales, dans chaque situation.

**a.** Les deux corps en présence ont des masses égales ( $8,0 \cdot 10^{26}$  kg).

Essayez d'abord de les lancer avec des vitesses initiales égales, parallèles, et en sens opposés (essayez par exemple 12 km/s vers la gauche pour l'un et 12 km/s vers la droite pour l'autre).

Ensuite, essayez deux vitesses encore parallèles et opposées, mais de valeurs légèrement différentes, comme par exemple :

$$v_A = 12 \text{ km/s} \ \& \ v_B = -11 \text{ km/s}.$$

Vous pourrez ainsi vérifier un important principe de Physique, lequel affirme qu'il y a toujours conservation de la quantité de mouvement globale d'un système quelconque :

- Dans le premier essai préconisé, la configuration initiale est parfaitement "symétrique": la quantité de mouvement totale de l'ensemble du système physique considéré est nulle.

Cette quantité de mouvement initialement nulle continue à rester nulle par la suite. Le centre de gravité du système ne se déplace donc pas, et les planètes tournent indéfiniment autour du centre de l'écran.

- Dans le second essai, la situation de départ est "dissymétrique" : la somme vectorielle de toutes les quantités de mouvement du système n'est pas nulle. L'ensemble se déplace alors dans la direction et le sens de la quantité de mouvement résultante, laquelle est définie dès le départ par le choix des vitesses initiales et reste ensuite constante.

Les planètes tournent toujours autour d'un centre de gravité commun, mais celui-ci se déplace d'un mouvement rectiligne uniforme.

**b.** Les deux corps ont des masses de  $1,2 \cdot 10^{27}$  kg &  $4,0 \cdot 10^{26}$  kg.

Ces deux masses étant différentes, vous ne pouvez créer une situation de départ symétrique, à quantité de mouvement globale nulle, que si vous choisissez des vitesses initiales parallèles, opposées, dans un rapport égal à l'inverse de celui des masses. Celles-ci étant dans le rapport de 3 à 1, vous pouvez donc choisir des valeurs de vitesses telles que :

$$v_A = 5 \text{ km/s et } v_B = -15 \text{ km/s.}$$

Dans ces conditions, les masses décrivent des trajectoires stables, tournant toutes deux autour de leur centre de gravité commun, lui-même immobile au milieu de l'écran. A titre de comparaison, essayez aussi une configuration de départ légèrement dissymétrique, en choisissant par exemple :  $v_A = 6 \text{ km/s}$  &  $v_B = -15 \text{ km/s}$ .

**c.** Les deux corps ont des masses de  $1,6 \cdot 10^{27}$  kg &  $2,0 \cdot 10^{26}$  kg.

Ces masses sont dans le rapport de 8 à 1, et donc nettement différentes. Pour que l'ensemble ne quitte pas la fenêtre d'observation, vous pouvez choisir par exemple des vitesses initiales telles que :

$$v_A = 3 \text{ km/s et } v_B = -24 \text{ km/s.}$$

Vous pouvez ainsi constater que la masse la plus forte se déplace (relativement) huit fois moins que l'autre. A la limite, si l'on considérait deux masses très différentes, la plus grande des deux resterait pratiquement immobile.

C'est le cas du système Soleil-Terre, par exemple. La masse du soleil valant 333000 fois celle de la terre, le centre de gravité de l'ensemble se confond presque avec le centre du soleil : dans de nombreux raisonnements, on peut donc considérer celui-ci comme immobile.

#### 4. Suggestions (cas de trois et quatre astres)

Les évolutions que vous allez pouvoir observer à partir d'ici sont fascinantes. A partir du moment où le nombre de corps en interaction dépasse deux unités, Il devient pratiquement impossible de prédire, à partir de la configuration initiale du système, les trajectoires compliquées qui vont être obtenues.

##### a. Trois astres en présence :

Les trois masses sont disposées au départ de manière tout à fait symétrique (aux sommets d'un triangle équilatéral).

Il faut essayer de les lancer également de manière "symétrique", c.à.d. de telle façon que le centre de gravité de l'ensemble ne bouge presque pas. En procédant ainsi, on évite d'avoir à "poursuivre" les astres en déplaçant sans cesse la fenêtre d'observation.

Chaque fois que vous actionnez le bouton **<Autres masses>**, un choix particulier de vitesses initiales est automatiquement sélectionné par défaut. Il vous suffit alors d'enfoncer le bouton **<Start>** pour obtenir des trajectoires typiques.

Inspirez-vous de ces valeurs de vitesses initiales pour en choisir vous-même d'autres.

##### b. Quatre astres en présence :

La simulation fonctionne de la même manière que dans le cas de trois astres. Ici encore, une situation initiale typique vous est proposée "par défaut", chaque fois que vous enfoncez le bouton **<Autres masses>**.

##### c. Trois astres - Observation en 3 D :

Dans cette partie de la simulation, les mouvements des trois astres en présence ne sont plus limités à un seul plan. Ils peuvent en effet s'éloigner ou se rapprocher de la fenêtre d'observation, ce qui les fait alors apparaître plus petits ou plus gros en fonction de la distance.

La probabilité de collision devient nettement plus faible, comme on peut s'y attendre, puisque l'on ajoute une dimension supplémentaire à l'espace accessible.

**Remarque** : Les astres apparaissent ici comme des "bulles" transparentes. La raison d'être de ce phénomène est purement technique :

Les algorithmes nécessaires pour redessiner continuellement des astres de taille variable (si on les traite comme des sphères pleines) se révèlent trop lents à l'expérience.

Afin de faciliter la compréhension des images obtenues, il est convenu également que :

- Les trois masses en présence sont égales (  $4 \cdot 10^{26}$  kg ).
- Vous pouvez choisir librement la vitesse initiale de chaque astre, mais seulement dans le plan de la fenêtre d'observation. La composante de vitesse perpendiculaire à la fenêtre d'observation est prédéfinie et vous ne pouvez pas la changer : au départ de l'animation, l'astre **A** se dirige vers vous avec une vitesse de 6 km/s, l'astre **C** s'éloigne de vous avec une vitesse de 6 km/s, tandis que la composante de vitesse de l'astre **B** est nulle dans cette direction.

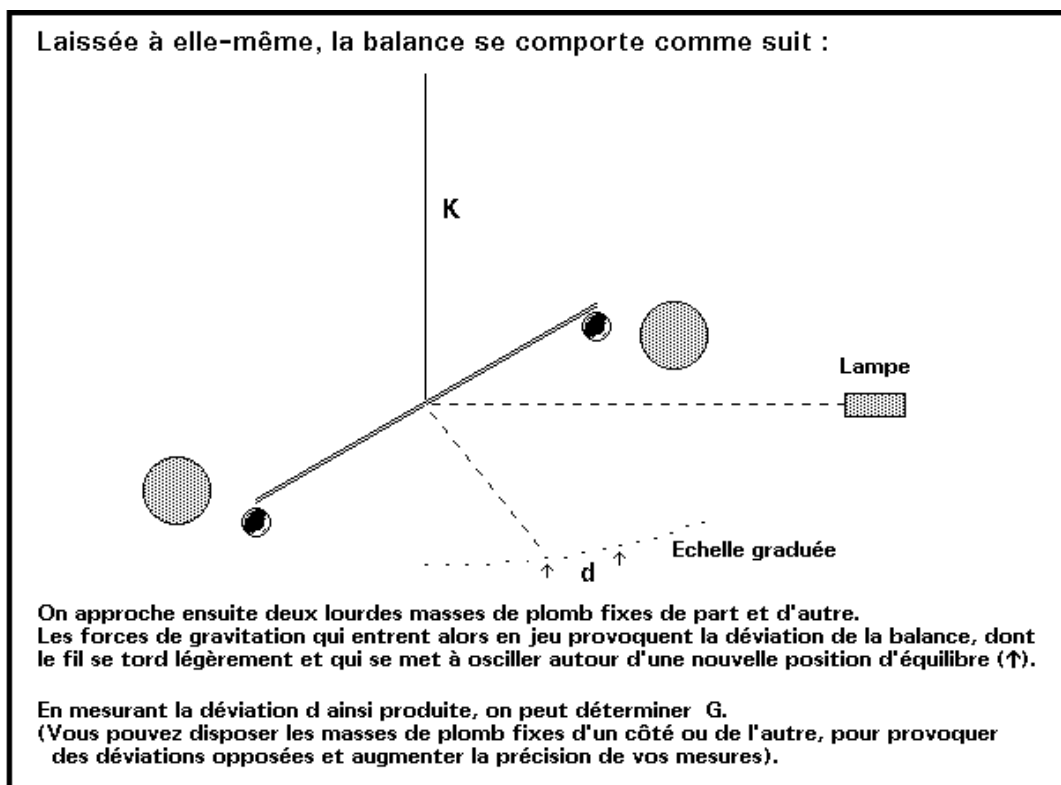
Une autre situation initiale typique vous est proposée "par défaut", chaque fois que vous enfoncez le bouton <**Autres vitesses**>.

## C. Expérience de Cavendish.

### 1. Principe.

En 1798, Lord Cavendish réussit à mesurer en laboratoire la très faible force de gravitation qui s'exerce entre des masses usuelles, ce qui permet d'établir la valeur de la constante de gravitation universelle  $G$ .

Il se sert pour cela d'une "balance de torsion", constituée d'une tige légère portant des masses denses à chacune de ses extrémités, et suspendue par son milieu à un fil fin. Lorsque l'on approche symétriquement d'autres masses importantes de part et d'autre de ce dispositif, les petites sphères portées par la tige sont attirées, le fil de suspension se tord légèrement, et la mesure de cette torsion permet de calculer la valeur des forces en présence.



### 2. Rappels théoriques.

L'expérience de Cavendish consiste donc à mesurer les très faibles forces de gravitation s'exerçant entre des masses connues : les masses mobiles portées par la tige, et les masses fixes que l'on en approche.

Ces forces produisent la torsion du fil de suspension, dont on peut connaître la constante d'élasticité de manière précise grâce au fait que la balance constitue aussi un **pendule de torsion** :

La période d'oscillation d'un tel pendule de torsion dépend seulement de deux paramètres : la constante d'élasticité (de torsion) **k** et le moment d'inertie **i** :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{i}{k}}$$

### **Constante de torsion (ou d'élasticité) k :**

Elle exprime en quelque sorte la plus ou moins grande rigidité du fil de suspension (plus elle est grande, plus il est malaisé de tordre ce fil). En toute rigueur, elle exprime le fait qu'il existe un rapport constant **k** entre la valeur du torque (ou du couple de forces) **c** appliqué aux extrémités du fil et l'angle de torsion  $\alpha$  qui en résulte :

$$k = \frac{c}{\alpha}$$

***Remarque** : Il faut impérativement exprimer  $\alpha$  en **radians**.*

### **Moment d'inertie i :**

Toute masse **m** tournant autour d'un axe sur une trajectoire de rayon **r** possède un **moment d'inertie i** par rapport à cet axe.

$$\text{Ce moment d'inertie vaut } \mathbf{i = m r^2}$$

Dans la balance de torsion utilisée, on peut considérer que les seules masses à prendre en considération sont celles des sphères mobiles. On peut en effet négliger la masse de la tige qui les porte, car celle-ci est faite d'un matériau très léger.

Le moment d'inertie global de la balance vaut donc **i = 2 m r<sup>2</sup>**, expression dans laquelle **m** désigne la masse d'une des sphères mobiles et **r** la moitié de la longueur de la tige qui les porte.



De tout ce qui précède, il résulte que l'on peut calculer la valeur de la constante de torsion  $k$  du fil de suspension de la balance de Cavendish, si l'on connaît le moment d'inertie  $i$  de celle-ci et si l'on mesure sa période d'oscillation  $T$  :

$$k = \frac{4 \pi^2 i}{T^2} = \frac{8 \pi^2 m r^2}{T^2}$$

### Torque (ou couple) des forces gravitationnelles :

Les forces de gravitation agissant sur les masses mobiles de la balance sont chacune égales à :

$$F = G \frac{M \cdot m}{d^2}$$

Dans cette expression,  $d$  représente la distance qui sépare les centres d'une des masses mobiles  $m$  et de la masse fixe  $M$  qu'on en approche.

Il y a ainsi deux forces  $F$ , égales et opposées, qui exercent sur la balance un torque (un couple) égal à :

$$c = 2 F \cdot r$$

Ce torque tend à faire tourner la balance. Mais l'élasticité du fil de suspension s'y oppose, en exerçant un torque en sens contraire, lequel augmente proportionnellement à l'angle de déviation  $\alpha$  :

$$c' = -k \cdot \alpha$$

La nouvelle position d'équilibre de la balance est atteinte, quand ces deux torques s'annulent l'un l'autre :  $c = -c'$ . On a dès lors :

$$2 F \cdot r = k \cdot \alpha \quad \rightarrow \quad F = \frac{k \cdot \alpha}{2 \cdot r}$$

La mesure de l'angle de déviation  $\alpha$  permet donc de déterminer la valeur des forces gravitationnelles  $F$ .

**Remarque importante :** Il faut impérativement exprimer  $\alpha$  en **radians**.

## Gravilab

---

Dans la simulation telle qu'elle est proposée, on observe en fait les déplacements d'un "spot" lumineux le long d'une échelle millimétrique située bien loin de l'axe de rotation. Ce "spot" résulte de la réflexion d'un rayon lumineux par un petit miroir solidaire de la barre de la balance.

Si la balance tourne d'un angle  $\alpha$ , le rayon lumineux produisant le spot tourne d'un angle  $2\alpha$  (Cfr. lois de la réflexion), et celui-ci se déplace d'une distance  $x$  le long de l'échelle graduée.

L'échelle graduée est située à une distance  $L$  de l'axe de rotation. Etant donné que l'angle à mesurer est très petit, sa valeur, exprimée en radians, s'obtiendra par la relation :

$$2\alpha \approx \operatorname{tg}(2\alpha) \approx \sin(2\alpha) = \frac{x}{L}$$

La simulation proposée permet donc de déterminer la valeur de la constante  $\mathbf{G}$  dans de bonnes conditions. Il est conseillé de tracer un graphique de  $\mathbf{F}$  en fonction de  $1/d^2$ , pour vérifier si l'on obtient bien une droite, et de déterminer ensuite la pente de cette droite pour en tirer  $\mathbf{G}$ .

### 3. Mise en oeuvre.

Lorsque vous choisissez l'option <Expérience de Cavendish>, vous faites apparaître un tableau de contrôle du dispositif expérimental :

Simulation de l'expérience de Cavendish

Distance M. fixes / M.mobiles

Vous avez le choix de différents matériaux pour les sphères, qui ont chacune un diamètre de 100 mm. Les masses volumiques de chaque matériau ainsi que la masse correspondante pour une sphère de 100 mm de diamètre, sont indiquées ci-dessous :

argent	10,49 g/cm <sup>3</sup>	5,492 kg.
or	19,3 g/cm <sup>3</sup>	10,105 kg.
platine	21,45 g/cm <sup>3</sup>	11,231 kg.
plomb	11,34 g/cm <sup>3</sup>	5,938 kg.

A l'aide du bouton marqué [P], vous pouvez :

- écarter complètement les sphères de plomb fixes
- les approcher des sphères mobiles, d'un côté
- les approcher de l'autre côté (pour inverser la déviation). (Explications dans "Principe").

GRAVILAB 3.03 (C) G. Swinnen 1979-1995 License # 3670

L'expérience se déroule en effet dans une enceinte close et thermostatée, à l'abri des courants d'air, et elle est commandée à distance par divers mécanismes.

Les boutons « **Principe** » et « **Théorie** » vous donnent accès à deux niveaux d'explications différents.

Le bouton « **Paramètres** » vous permet de choisir le matériau dont sont faites les sphères mobiles fixées aux deux extrémités de la tige. Choisissez de préférence un matériau dense, tel le plomb ou même l'or.

La fenêtre graduée vous montre les déplacements du spot lumineux réfléchi par un petit miroir situé au centre de la tige portant les sphères mobiles. Cette fenêtre est également munie de deux témoins lumineux rouges vous indiquant de quel côté les sphères fixes se trouvent. (Aucun témoin n'est allumé si les sphères fixes sont écartées)

Vous pouvez actionner les sphères fixes à l'aide des trois boutons situés en haut à droite. Le bouton marqué [ **P** ] provoque la sélection d'une des trois situations suivantes :

**a.** Les sphères de plomb fixes sont écartées. Aucun témoin n'est allumé dans la fenêtre d'observation. La petite fenêtre d'affichage de la distance entre sphères indique seulement "--/--".

**b.** Les sphères de plomb fixes sont approchées d'un côté. Un témoin rouge est allumé dans la fenêtre d'observation, indiquant dans quel sens la déviation devrait se produire. La distance **d** séparant les centres des sphères fixes et mobiles est affichée dans la petite fenêtre en haut à droite. Cette distance est exprimée en mm et peut être ajustée à l'aide des boutons marqués [ →← ] (pour rapprocher) et [ ←→ ] (pour écarter).

**c.** Les sphères de plomb sont approchées de l'autre côté. Tout se passe comme en **b.** ci-dessus, mais la déviation a lieu dans l'autre sens, comme l'indique le témoin allumé dans la fenêtre d'observation.

Vous disposez également d'un chronomètre, pour déterminer la période d'oscillation de la balance. Pour obtenir une plus grande précision, mesurez de préférence le temps nécessaire pour effectuer deux ou trois oscillations complètes (puis divisez-le par 2 ou 3 !).

### 4. Exemple de Calcul.

L'utilisateur a choisi de fixer des sphères d'or (masse = 10,105 kg) aux extrémités de la barre de la balance.

Le moment d'inertie **i** de cette balance vaut donc :

$$i = \sum m.r^2 = 2.10,105.1^2 = 20,21 \text{ kg.m}^2$$

Il commence par mesurer la période d'oscillation, en chronométrant la durée de deux oscillations complètes pour obtenir une précision plus grande :

$$T = \frac{543}{2} = 271,5 \text{ s}$$

Il peut alors calculer la valeur de la constante de torsion du fil :

$$k = \frac{4\pi^2 i}{T^2} = \frac{797,86}{73712} = 0,01082 \frac{\text{kg.m}^2}{\text{s}^2}$$

L'étape suivante consiste à déterminer la position d'équilibre du spot lumineux, en l'absence de forces gravitationnelles. Pour ce faire, l'utilisateur doit d'abord vérifier que les sphères de plomb fixes sont bien écartées (Actionner le bouton marqué "P" jusqu'à éteindre les deux témoins rouges présents dans la fenêtre graduée. L'indication de distance entre sphères est remplacée par "--/--").

Valeurs extrêmes obtenues pour l'élongation du spot :

8,29 mm & 5,96 mm.

La position d'équilibre est la moyenne de ces 2 valeurs : **7,13 mm**.

L'utilisateur décide alors d'approcher les sphères de plomb fixes.

Elles ont chacune une masse de **158 kg**, et il les rapproche à une distance de **200 mm** des sphères mobiles (la distance affichée est mesurée entre centres de gravité). Le spot lumineux oscille maintenant entre les positions extrêmes 8,58 mm & 10,53 mm.

La nouvelle position d'équilibre du spot est donc **9,56 mm**.

Les forces gravitationnelles ont ainsi produit une déviation de la position d'équilibre du spot, dont la valeur est égale à :  $9,56 - 7,13 = \mathbf{2,43 \text{ mm}}$ .

Il faut alors se rappeler que le spot observé est le point d'impact d'un rayon lumineux réfléchi par un petit miroir fixé au bras de la balance, sur une échelle graduée située à **2500 mm** de ce miroir. Si la balance tourne d'un angle  $\alpha$ , le rayon réfléchi tourne d'un angle  $2\alpha$  que nous pouvons à présent calculer par trigonométrie :

$$\text{tg}(2\alpha) = \frac{2,43}{2500} \quad \rightarrow \quad \alpha = \text{très petit} \quad \rightarrow \quad \text{tg}(2\alpha) \approx 2\alpha$$

$$\alpha = \frac{2,43}{5000} = 4,86 \cdot 10^{-4} \text{ radian}$$

Quand la balance tourne, le fil de suspension se tord et produit un torque  $\mathbf{c}$  (ou couple de forces) de rappel, qui est proportionnel à l'angle de rotation :  $\mathbf{c} = \mathbf{k} \cdot \alpha$ . A l'équilibre, ce torque est égal et opposé à celui que produisent les forces gravitationnelles.

Celles-ci étant symétriques, le torque qu'elles produisent vaut  $c' = 2 F \cdot r = 2 F$  (puisque  $r = 1$  mètre). On a donc :

$$k \cdot \alpha = 2F \quad \rightarrow \quad F = \frac{k \cdot \alpha}{2} = 2,63 \cdot 10^{-6} \text{ N}$$

La valeur de  $F$  que nous avons ainsi trouvée représente la force qui s'exerce entre deux masses respectivement égales à 10,105 kg et 158 kg, séparées par une distance de 200 mm. La connaissance de cette force nous permet à présent de calculer  $G$  :

$$F = G \frac{M \cdot m}{d^2} \quad \rightarrow \quad G = \frac{F \cdot d^2}{M \cdot m} = \frac{2,63 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2^2}{158 \cdot 10,105} = 6,59 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$$

Il va de soi que la valeur trouvée est entachée d'une certaine erreur expérimentale.

On peut améliorer la précision du résultat en procédant à plusieurs mesures de  $F$  pour différentes valeurs de  $d$ , de manière à pouvoir tracer un graphique de  $F$  en fonction de  $1/d^2$ , lequel doit être une droite, de pente égale à  $G \cdot M \cdot m$ .

## D. Test d'évaluation par QCM (Système ACQC).

1. Ce test comporte une bonne vingtaine de questions à choix multiple. Il est accessible à tout moment en cours de simulation. On peut passer des questions, quitter le test et y revenir à volonté, le recommencer aussi souvent qu'on le souhaite, la seule exigence étant d'arriver finalement à fournir des réponses correctes pour **toutes** les questions.

### Evaluation

ACQC System, Version 3.0

Passe : 12  
Score : 13/28

Temps écoulé : 1467 s.

Quelle est la vitesse orbitale de la lune gravitant autour de la terre ?

- 1) environ 1 km/s
- 2) environ 2 km/s
- 3) environ 5 km/s
- 4) environ 10 km/s
- 5) environ 30 km/s

**4 : Réponse fausse. La réponse correcte était : 1.**

Vous pouvez chercher la réponse à cette question en utilisant la théorie, ou par tâtonnements successifs à l'aide de la simulation :  
 Choisissez la terre comme astre central, et lancez un satellite à partir d'une position initiale située à 380 mégamètres de la terre (c'est la valeur de la distance terre-lune : 380000 km environ).  
 Expérimentez des vitesses initiales diverses, jusqu'à ce que vous obteniez une trajectoire à peu près circulaire.  
 Notez la vitesse correspondante.

1

2

3

4

5

Rejet

Tout

Terminer

Continuer

2. Le professeur a la possibilité de modifier les questions, de supprimer certaines d'entre elles, ou d'en ajouter d'autres. (Voir chap. suivant)

3. Les questions sont présentées au départ dans un ordre aléatoire, de manière à limiter la tentation que peuvent avoir les élèves de se communiquer les réponses entre groupes de travail voisins.

Cependant, la question présente à l'écran pouvant toujours être "passée", l'élève a toute liberté de faire défiler les questions et de choisir celles qu'il souhaite traiter en priorité.

4. Pour chaque question posée, il se peut que la solution correcte soit l'une des cinq solutions proposées, ou bien **aucune**, ou bien **toutes**.

L'emploi de "solutions générales implicites" de ce type est tout à fait habituel dans la méthodologie QCM : on évite ainsi que l'élève ne choisisse sa réponse en procédant "par éliminations successives".

Pour l'évaluation certificative (celle que l'on pratique dans les interrogations, les examens), il existe encore d'autres formules de solutions générales implicites (Voyez la bibliographie à ce sujet en dernière page). Pour l'évaluation formative pratiquée ici, nous avons un peu simplifié la méthodologie, en n'en proposant que deux seulement.

**5.** La solution est immédiatement présentée à l'élève, dès que celui-ci a fourni sa réponse. Cette correction immédiate permet d'éviter qu'il ne mémorise des réponses erronées.

**6.** La solution est assortie d'un commentaire. L'affichage de ce commentaire joue un rôle important dans la méthodologie pratiquée ici:

- Dans le cas où l'élève a fourni une bonne réponse, le commentaire lui permet de vérifier que ses raisons de choisir ladite réponse sont bien justifiées, surtout s'il a opéré ce choix plutôt par intuition qu'en suivant un raisonnement rigoureux.
- Dans le cas où la réponse fournie est mauvaise, le commentaire aide l'élève à rectifier un raisonnement mal assuré et complète son information si celle-ci est déficiente.

**7.** Quand toutes les questions ont été traitées une première fois, elles sont re-mélangées et le test recommence. Il recommencera encore et encore, de manière cyclique, aussi longtemps qu'il y restera des questions non résolues. Une même question peut donc apparaître un certain nombre de fois. (Les questions réussies deux fois successivement sont toutefois progressivement écartées).

**8.** L'auto-test peut être interrompu à tout moment, puis repris plus tard. Il ne se termine définitivement que lorsque toutes les questions ont été résolues au moins un fois.

A chaque interruption, l'utilisateur obtient un compte-rendu.



## V. Pour le professeur.

1. Il est possible d'imprimer un rapport concernant le travail effectué à l'aide du test d'auto-évaluation, pour chaque élève (ou groupe d'élèves), en utilisant le programme annexe **GRAVIRAP**.

Ce rapport reprend toutes les questions, leur solution et leur commentaire d'accompagnement. Il peut être utile de le fournir aux élèves qui souhaitent conserver une trace de leur travail.

Il faudra veiller à effacer de temps en temps les fichiers de mémorisation périmés. Tous ces fichiers comportent l'extension **.GLB**.

**GRAVIRAP** dispose d'une fonction pour effectuer cet effacement.

A l'écran, **GRAVIRAP** indiquera en outre les valeurs particulières des paramètres intervenant dans la simulation de l'expérience de Cavendish. En effet :

Afin de garantir que les élèves fassent tous un raisonnement complet, les valeurs de  $k$  (constante d'élasticité du fil de la balance) et de  $M$  (masse des sphères de plomb fixes) sont tirées au hasard chaque fois qu'un nouvel utilisateur du programme se présente (alors que l'élève qui continue un travail commencé reçoit le même jeu de paramètres à chaque fois).

A l'écran, **GRAVIRAP** indiquera donc ces paramètres, ainsi qu'une partie des résultats numériques que l'élève devrait en principe obtenir dans les étapes intermédiaires de son raisonnement en vue de la détermination de la constante **G**.

Ces résultats seront évidemment bien utiles pour la correction des rapports de laboratoire, puisqu'ils seront différents à chaque fois.

### Exemple d'affichage :

Utilisateur N° 3    Nom : Charles-Honoré Crouchon    Classe 5e C    12 Janvier 1990

Valeurs typiques pour correction du rapport de labo :

$k = 1.021E-02$  Nm/rad    Rayon sphères fixes = 148.8 mm    Masse = 156.5 kg

Matériau	masse	T	dév. (25 cm)	$\alpha$ (25 cm)	F (25 cm)	F (50 cm)
argent	5.49 kg	206 s	0.90 mm	1.80E-04 rad	9.17E-07 N	2.29E-07 N
or	10.11 kg	280 s	1.65 mm	3.31E-04 rad	1.69E-06 N	4.22E-07 N
platine	11.23 kg	295 s	1.84 mm	3.67E-04 rad	1.88E-06 N	4.69E-07 N
plomb	5.94 kg	214 s	0.97 mm	1.94E-04 rad	9.92E-07 N	2.48E-07 N

Utilisation des différentes options du menu :

Satellite : 2            Deux astres : 1            Trois astres : 1  
Trois astres (3D) : 2            Quatre astres : 2  
Exp. de Cavendish : 1            Test d'autoévaluation : 5

On voit que pour chaque matériau susceptible d'avoir été choisi par l'élève lors de la constitution de sa balance, sont indiqués :

- la masse des sphères mobiles
- la période d'oscillation
- la déviation du spot lumineux le long de l'échelle graduée, quand on approche les sphères fixes à 25 cm des sphères mobiles
- l'angle de déviation correspondant
- la force de gravitation ainsi mesurée
- la même chose, pour une distance d'approche de 50 cm.

**2.** Les questions à choix multiple apparaissant dans le test d'évaluation par QCM peuvent être modifiées au gré du professeur.

Toutes ces questions se trouvent dans un fichier texte (ASCII) nommé **GRAVQCMF.TXT**. Vous pouvez facilement retravailler ce fichier à l'aide d'un programme éditeur, tel par exemple le programme **EDIT** fourni avec de nombreuses versions de **MS-DOS**.

Vous pouvez ainsi à volonté :

- Changer le texte, les distracteurs, le commentaire, l'encodage de n'importe quelle question.
- Ajouter une ou plusieurs questions (jusqu'à un maximum de 30).
- Supprimer des questions.

**Remarque :** *l'ordre des questions n'a aucune importance.*

**3.** Pour effectuer ces modifications, veuillez tenir compte des indications suivantes :

- Faites d'abord une copie de secours du fichier, avant de le modifier.

- Ne modifiez pas les premières lignes du fichier (Lignes d'identification et commentaire sur les codes utilisés).
- Les questions successives doivent être séparées les unes des autres par une ligne ne contenant que le seul caractère "\".
- Chaque question comporte 3 parties :
  - a. Une ligne de codes, dont la signification est indiquée ci-après.
  - b. Le texte de la question, avec les propositions de réponses.

Le nombre de lignes de texte est quelconque, mais il doit être indiqué dans le troisième code de la première ligne.  
N'oubliez pas de compter les lignes "blanches".
  - c. Un commentaire (éventuel) pour expliciter la solution, en une ou plusieurs lignes.
- Le nombre total de lignes (codes + question + commentaire) ne peut dépasser 20.
- Les codes (nombres) situés dans la première ligne de chaque question doivent être séparés par des virgules.

Ils représentent, dans l'ordre :

  - La valeur de la question (en points). Ce premier code n'est pas utilisé par la présente version de **Gravilab**.
  - La solution. Le Rejet doit être encodé **6**. L'option : "toutes les solutions proposées sont correctes" doit être encodée **7**.
  - Le nombre de lignes de texte de la question proprement dite : ceci permet au logiciel de distinguer la question de son commentaire.
  - Le quatrième code n'est pas utilisé dans cette version de Gravilab.
  - Le cinquième code indique le numéro d'une figure éventuellement associée à la question (en pixels). S'il n'y a pas de figure, ce code peut être omis, ou il doit être égal à zéro. La présente version d'ACQC intégrée à **Gravilab** ne permet pas l'intégration de figures sous la forme de fichiers PCX. Consulter la société distributrice du logiciel concernant les prochaines versions d'ACQC qui présenteront cette possibilité.

## Bibliographie.

**Gravitation** - Cours de Physique, par A. Meessen.  
De Boeck-Wesmael s.a., 1989, Bruxelles.

**Optique géométrique et Mécanique** par G. Swinnen.  
Guide de travail à l'usage des élèves de 4e année de l'Enseignement secondaire  
rénové.

*(il s'agit d'un outil de travail à base de QCM)*

INFOREF A.S.B.L., Liège, 1993, 215 p.

**La conception des questions à choix multiple** par D. Leclercq.  
LABOR, Collection Education 2000, Bruxelles, 1986.

**Principes communs pour évaluer les résultats  
cognitifs de la formation.**

par E. Boxus, D. Leclercq, S. Osterrieth & H. Widar.

CCE, Collection Euro-Tecnet (J.Horgan), Bruxelles, 1991.

## Distribution du logiciel

### *En France :*

#### **Génération 5**

82, Rue du Bon Pasteur, 73000 Chambéry  
Tél. : +33 479969959 Fax : +33 479969653  
<http://www.generation5.fr>

### *En Belgique :*

#### **Inforef A.S.B.L.**

Rue E. Wacken, 1B, 4000 Liège  
Tél. : +32 42210465 Fax : +32 42370997  
<http://www.ulg.ac.be/cifen/inforef/swi>

### *Au Canada :*

#### **Diffusion Multimedia Inc.**

1200, avenue Papineau, bureau 321  
Montréal (Québec) H2K 4R5  
Tél. : (514) 527 0606 Fax : (514) 527 4646  
<http://www.diffm.com>

Autres logiciels **7P Soft** déjà disponibles :

- BACTOLAB :** Simulation d'un laboratoire de bactériologie.  
**COVALION :** Jeu didactique sur la théorie des liaisons chimiques fondamentales.  
**REFLEXARC :** Etude des fonctions nerveuses élémentaires.  
**DROSOLAB :** Génétique de la drosophile.  
**FROGMEW :** Approche de l'hormonologie par l'étude expérimentale de la métamorphose, chez la grenouille.  
**WAVELAB :** Etude des ondes se propageant dans un milieu à deux dimensions.  
**VOLTAKIT :** Etude des circuits à courant continu.  
**GRAVILAB :** Etude expérimentale de la gravitation.  
**COLORKIT :** Etude de la théorie trichromique des mélanges de couleurs.  
**AQUADATA :** Gestion d'une base de données concernant la qualité de l'eau.  
**DIDAKIT :** L'assistant didactique. Gestion des corvées du professeur : journal de classe, interrogations, carnet de notes, bulletins.