



**Huitièmes Journées
Informatique et Pédagogie
des Sciences Physiques**



**DE NOUVEAUX OUTILS
SUPPORTS DE MODÉLISATION
ET DE SIMULATION :**

**INTERACTIVE-PHYSIQUE
ET
STELLA**

Coordination : Marie-Christine Milot

**Daniel Beaufils
Roland Bouroulet
Alain Durey
Roger Journeaux
Bernard Richoux**

**12 - 13 - 14 Mars 1998
IUFM de Montpellier**

**Union des Physiciens
Institut National de Recherche Pédagogique**

Ont contribué à cette brochure :

Daniel Beaufils,

INRP, Montrouge.

Roland Bouroulet,

Lycée, Luxembourg

Alain Durey,

ENS, Cachan.

Roger Journeaux,

Université Paris VII, Orsay.

Marie-Christine Milot,

MENRT, Paris.

Bernard Richoux,

Lycée Corot, Savigny sur Orge.

Sommaire

1 - De l'acquisition de données à la simulation numérique.....	3
2 - La simulation avec Interactive Physique	5
• 2.1. Pendule simple	6
• 2.2. Le cas du pendule élastique	7
• 2.3. Expérimenter les modèles : la chute libre.	8
• 2.4. Conclusion.	12
3 - La modélisation avec STELLA	13
• 3.1. Les fonctionnalités de base pour la construction des modèles	13
• 3.2. Modélisation en cinétique chimique	17
• 3.3. Modélisation de la charge du condensateur	19
• 3.4. Modélisation des oscillations électriques.....	20
• 3.5. Modélisation en mécanique : exemple de l'oscillateur à une dimension.....	21
• 3.6. Action d'un champ électrique et d'un champ magnétique sur une particule chargée	24
• 3.7. Application à la résolution d'un exercice type bac	26
• 3.8. Pour aller plus loin : trajectoire d'un rayon lumineux dans un milieu d'indice variable.....	29
4 – Conclusion	30
5 – Bibliographie.....	31

DE NOUVEAUX OUTILS SUPPORTS DE MODÉLISATION ET DE SIMULATION : INTERACTIVE-PHYSIQUE ET STELLA

1. De l'acquisition de données à la simulation numérique

Bien qu'ancienne, l'idée d'utiliser la simulation sur ordinateur dans l'enseignement des sciences¹ n'a été que faiblement développée en regard des utilisations de l'ordinateur "outil de laboratoire" ou l'ATIDEX². Cette dernière activité constitue toujours l'axe prioritaire des usages en lycée. Le succès de l'ATIDEX vient de la convergence entre une évolution des pratiques expérimentales dans les laboratoires de recherche et la modernisation, souhaitée par les enseignants, des activités expérimentales en physique et en chimie dont l'ATIDEX est un élément. Dans ce cadre, la simulation numérique a fait toutefois progressivement sa place en tant qu'outil de vérification ou d'ajustement de modèle : l'équation différentielle de tel phénomène, par exemple, est résolue numériquement et le modèle, ainsi mis en fonctionnement, peut être ajusté pour rendre compte d'un ensemble de mesures³. Ce lien entre les mesures expérimentales et la simulation numérique a pour but d'aider les élèves à assimiler le modèle étudié.

1.1 Quelques exemples

1.1.1 En chimie :

Lors de l'utilisation d'un logiciel de pHmètrie (LogipH⁴, Simultit ou Réaction acide-base⁵, Titrab⁶..), le tracé des courbes fait appel à un modèle permettant de déterminer le pH d'un mélange en fonction du volume d'une des solutions versé. Deux utilisations courantes :

- Comparaison des mesures expérimentales (obtenues "à la main" ou par acquisition de données) et de résultats obtenus par simulation,
- Étude de l'influence des paramètres de la réaction : concentration d'une solution, valeur du pH à la demi-équivalence ...

Dans ce cas l'élève, n'a pas accès au modèle. Il en utilise les résultats. Une utilisation raisonnée suppose néanmoins que le principe des calculs mis en jeu soit connu de lui. Dans ce domaine, il est aussi possible de faire établir l'équation mathématique décrivant le phénomène étudié (dans un domaine restreint, avec les approximations adaptées) et de comparer les résultats théoriques et les mesures expérimentales : ceci suppose une maîtrise plus grande du modèle par les élèves et donc des notions en grande partie déjà assimilées.

1.1.2 En électricité :

Les logiciels de simulation (Electronics Workbench⁷, Crocodile Clips⁸) sont le plus souvent

¹ Voir [JEROME P., 1979]. Voir aussi [GIORDAN A., MARTINAND J.L., 1987] et [INRP, 1983].

² Acquisition et Traitement Informatique De mesures Expérimentales ou ATIDEX.

³ Voir par exemple [BEAUFILS D., 1992].

⁴ Jeulin

⁵ L&I

⁶ Microlec

⁷ L&I

⁸ Pierron

utilisés en liaison avec un phénomène électrique étudié au travers d'un montage :

- Aide à la mise au point du montage électrique (détermination des caractéristiques des composants adaptés par exemple),
- Étude de l'influence des paramètres du circuit sur le phénomène observé.

Là encore l'élève fait fonctionner un modèle en liaison avec le phénomène expérimental. L'avantage d'un tel fonctionnement est que l'élève peut séparer les difficultés : conception et fonctionnement du montage d'une part, réalisation de ce montage avec des objets réels d'autre part, retour sur le fonctionnement enfin.

Dans les deux cas cités, la deuxième utilisation revient à "faire fonctionner" un modèle basé sur des lois. Ces activités ont pour but de faciliter les allers et retours entre l'expérience et les lois mises en jeu. L'enjeu est alors que l'élève associe le phénomène expérimental et les lois théoriques indépendamment du contexte "scolaire". De nombreuses études didactiques montrent que cet enjeu est rarement dépassé⁹. Des articles du BUP rendent compte de recherches en mécanique et cinématique du point¹⁰, en électricité¹¹

Aujourd'hui, une nouvelle étape est, semble-t-il, en cours de franchissement. De cette simulation attachée à l'interprétation de mesures, nous passons à l'utilisation de la simulation dans des activités de construction de modèles et de manipulation/expérimentation sur modèle. Cette évolution n'est pas une rupture mais bien une évolution légitime. En premier lieu, les pratiques scientifiques qui peuvent être prises en référence pour la construction d'activités didactiques sont de plus en plus nombreuses à s'appuyer sur la simulation numérique, qu'il s'agisse de l'électronique, et plus généralement de la CAO, ou de la physique fondamentale depuis l'infiniment petit des modèles de la physique nucléaire à l'infiniment grand de la cosmologie. En second lieu, les travaux et études sur les activités favorisant l'acquisition et la structuration des concepts tendent à montrer que les activités fondées sur la manipulation concrètes ne sont ni toujours propices à la conceptualisation, ni surtout les seules.

Ainsi, la mise en relation de modèles particuliers simulés sur ordinateur et d'expériences macroscopiques a été expérimentée¹² et semble être prometteuse au niveau de l'apprentissage dès le programme du cycle central des collèges.

Cette évolution se traduit par l'apparition de nombreux logiciels dont plusieurs sont utilisés en classe préparatoire scientifique ou dans l'enseignement des disciplines techniques. Cette évolution est également visible à travers les propositions de communications pour ces journées qui sont de plus en plus nombreuses à mettre en avant les potentialités de ces outils¹³. Dans le cadre du Plan National de Formation, la Direction des lycées et Collèges a organisé, en mars 1997, un stage destiné aux formateurs académiques : "l'apport de la simulation dans les apprentissages expérimentaux en physique-chimie"¹⁴.

Cette évolution a conduit à des travaux de recherche sur des activités liées à la manipulation de modèles. Les enseignants qui présentent les travaux suivants ont expérimenté avec des

⁹ Voir [SALTIEL E., 1978]. Voir aussi [VIENNOT L., 1979]

¹⁰ Voir [BAHIER D. & al 91]. Voir aussi [MENIGAUX J. 91]

¹¹ Voir [LASCOURS J. 98]

¹² Voir [MEHEUT 94], [CHOMAT & al 92].

¹³ Simulation de travaux pratiques en électricité, électronique et électrotechnique pour l'EAD (Marc Bouchet) ; Intégration du réel et du virtuel en sciences expérimentales (Pierre Nonnon) ; Simulation de cinétiques par la technique des automates moléculaires (Jérôme Randon).

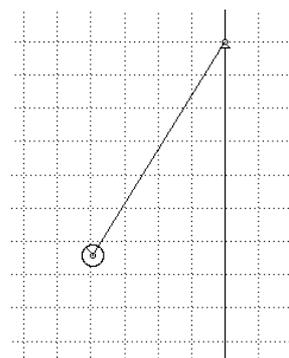
¹⁴ Ce stage du PNF a eu lieu les 25-26 mars 1997 au lycée Jean Perrin (Rézé - Nantes) ; le compte rendu est accessible sur le serveur du ministère à l'adresse suivante <http://www.education.gouv.fr/sec/phy/nantweb.htm>.

élèves des usages qui ne rentrent pas dans les activités que l'on pourrait qualifier de classiques. L'objectif de cet exposé est de présenter ces activités nouvelles en s'appuyant sur deux exemples de logiciels de simulation particuliers (Interactive Physique et Stella) qui, d'une part, ne font pas l'objet de communication durant ces journées, et d'autre part, permettent de positionner clairement des questions fondamentales sur la simulation numérique, notamment le rôle de la représentation. Les questions posées sont soumises à la réflexion des enseignants de physique et de chimie dans le but d'améliorer l'efficacité de notre enseignement.

2. La simulation avec Interactive Physique

Interactive Physique est un logiciel de simulation icônique. Il utilise des objets qui sont des représentations figuratives ou schématiques d'objets réels (tels que ressorts, fils, objets étendus...). Dans le cas ci-contre du pendule simple, un objet sphérique est suspendu à un fil.

Bien que fondé sur la résolution numérique des différentes équations traduisant les effets des forces et des liaisons, aucune d'entre elles n'est à écrire. La seule donnée des paramètres du système (masses des objets, les longueurs des fils, l'intensité de la pesanteur, ...) et des conditions initiales suffit à lancer la simulation.



L'intérêt majeur du logiciel réside dans le fait que l'utilisation d'icônes permet de créer un niveau intermédiaire d'abstraction entre l'objet réel et son modèle.

Ces objets hybrides utilisés dans le logiciel sont des modèle-objet-icônes (M.O.I) :

- Icône car les objets ont un aspect qui rappelle la forme d'un objet réel.
- Modèle car tous les objets du logiciel ne sont, en fait, qu'un ensemble de paramètres liés par des lois (qui dépendent du type de l'objet).
- Objet car on appelle un cercle, une bille, une ligne brisée un ressort, et que l'on simule un système réel.

L'utilisation de ces M.O.I permet en fait, d'expérimenter les modèles physiques, en modifiant les paramètres et en multipliant les situations physiques. Elle permet donc de faire fonctionner les modèles et surtout de les voir fonctionner (la plupart des lois de la mécanique étant intégrées au logiciel).

Or, une des difficultés de l'apprentissage de la physique réside justement dans la possibilité d'abstraction des élèves à partir d'une "situation réelle". L'utilisation d'un logiciel tel qu'Interactive Physique offre ainsi une activité nouvelle aux élèves qui n'avaient jusqu'à présent que peu de possibilités de voir un modèle en fonctionnement et aucune éventualité de l'expérimenter.

On peut donc raisonnablement penser que cette activité nouvelle, puisse développer l'autonomie de l'élève, augmenter sa "culture mécanique" et surtout qu'elle lui permette de construire une meilleure représentation des situations grâce au lien modèle-objet qu'induit la simulation icônique¹⁵.

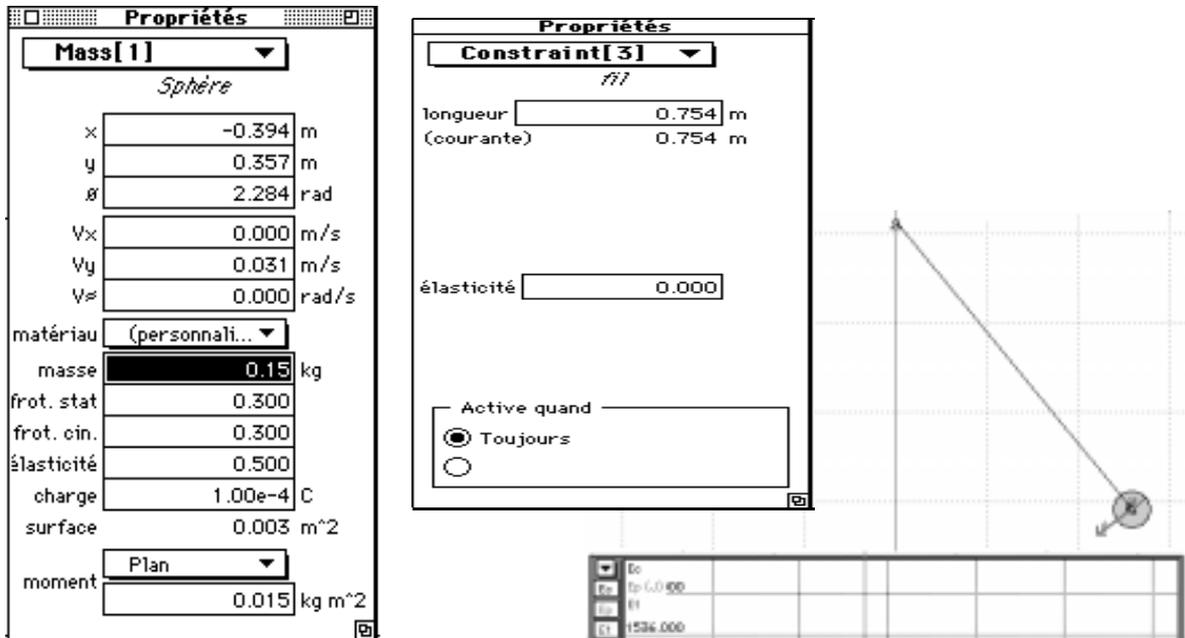
Les quelques exemples qui suivent permettent d'illustrer quelques aspects du logiciel.

¹⁵ Roland Bouroulet : Thèse de didactique en cours sous la direction d'Alain Durey ENS-Cachan

2.1 Pendule simple

Une fois que l'on a créé la sphère au bout du fil, on peut vouloir modifier sa masse. On utilise alors la fenêtre de description des propriétés de la sphère.

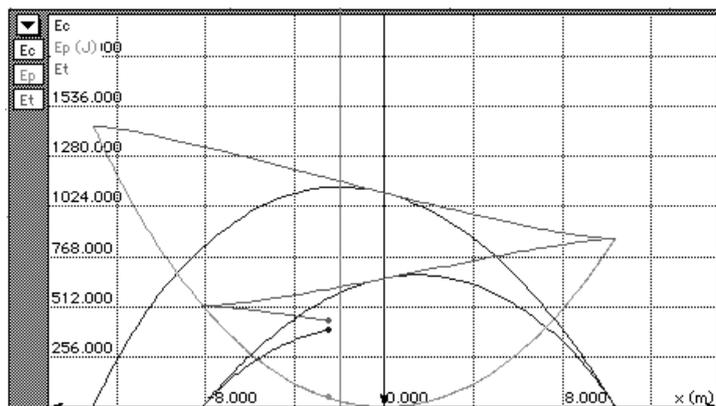
Les propriétés des objets varient en fonction de la nature de l'objet. Ci-dessous figurent les fenêtres des propriétés du fil et de la bille.



Ce qui est particulièrement intéressant, est que l'on peut à la fois, voir les mouvements, conserver les traces des positions successives des objets, et visualiser sous forme de graphiques les

variations de différentes grandeurs prédéfinies (énergie cinétique, potentielle...) ou que l'on définit (énergie mécanique par exemple).

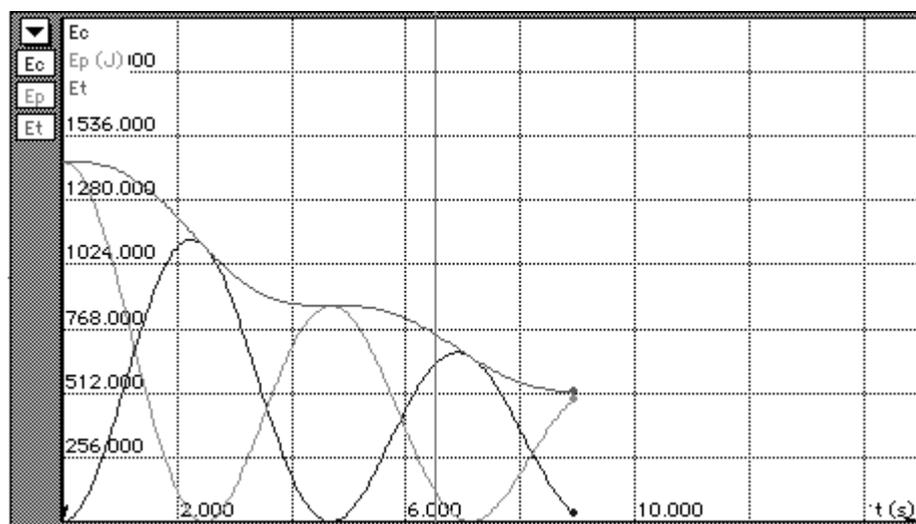
Dans le cas du pendule, on peut représenter, en fonction du temps, l'énergie cinétique, l'énergie potentielle et l'énergie mécanique.



d'inertie la bille. On obtient alors une représentation graphique toute différente (ci-dessus).

De plus à chaque pas, le logiciel enregistre tous les paramètres du système, ce qui permet ensuite de revenir, sur des points particuliers du mouvement ou d'observer pas à pas. Cela donne une grande latitude d'étude des systèmes (élève ou professeur). Le temps n'est cependant pas la seule variable que l'on peut utiliser. Dans le cas précédent, il peut être judicieux d'utiliser la position du centre

Il suffit d'une opération pour introduire une force de frottement de type fluide (prédéfinie comme la résistance de l'air par exemple) qui permet d'apprécier les différences de comportement du pendule amorti par rapport au pendule non amorti.



On peut ainsi analyser la variation de l'énergie mécanique, en fonction des phases de l'oscillation.

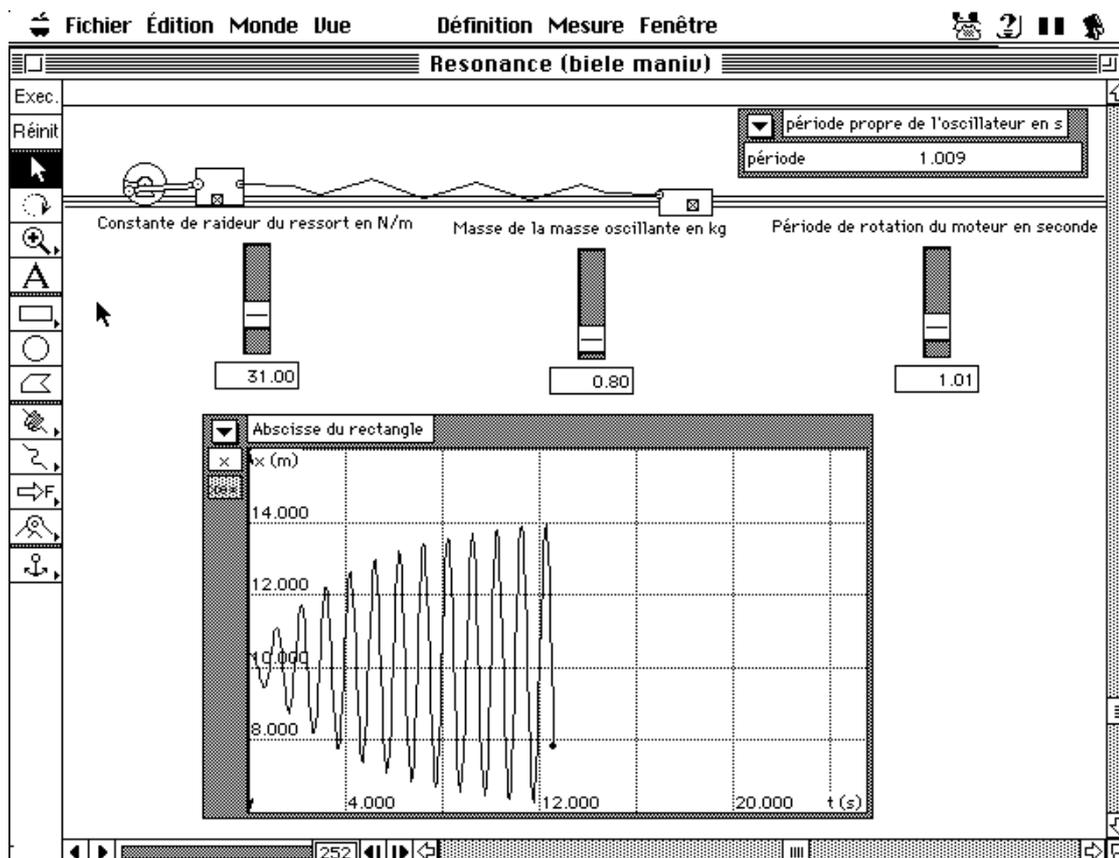
2.2 Le cas du pendule élastique

On illustre ici les possibilités d'étude d'un système un peu moins simple.

Le système mécanique est formé d'un solide immobile qui est le support, d'un objet matériel accroché à un ressort dont on peut modifier directement la raideur à l'aide d'un curseur. Les valeurs des compteurs qui servent à mesurer les grandeurs physiques peuvent être conservées ce qui permet de superposer les graphes pour comparer, comme ici, les différents régimes, au comportement de l'oscillateur libre sans frottement. On peut aussi étudier l'influence des frottements entre les deux solides

L'étude de la résonance ne nécessite que d'ajouter au système précédent, un excitateur de fréquence variable, on a choisi ici un système moteur et bielle. Grâce aux curseurs, on peut choisir la raideur du ressort, la masse de l'objet oscillant et la période du moteur, et visualiser graphiquement les variations de la position du centre d'inertie de l'objet en fonction du temps.

Voir copie d'écran page suivante.



Il y a bien d'autres simulations possibles, comme la chute libre dans l'air, l'influence du référentiel, les chocs, les lancers (où l'on peut voir que la présence de l'air permet à une balle de golf d'aller bien plus loin que dans le vide), le Botafumeiro etc. Voyons sur l'exemple de la chute libre dans l'air les possibilités d'expérimentations sur le modèle.

2.3 Expérimenter les modèles : la chute libre.

Les exemples indiqués ci-dessus montrent des situations mettant en jeu des M.O.I dans lesquelles leurs évolutions respectent les principes de la mécanique newtonienne, inclus dans le logiciel.

Pour montrer quels peuvent être les enjeux d'une telle expérimentation des modèles, examinons la situation très classique de la chute libre et de la mesure de l'intensité de la pesanteur.

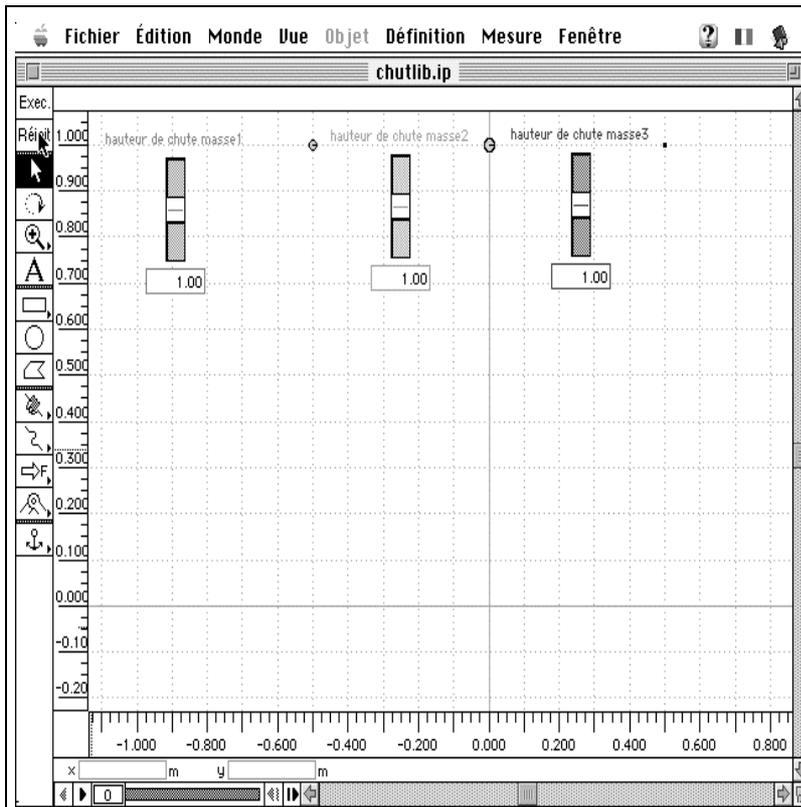
De façon générale, la résistance de l'air est supposée négligeable et l'application de la deuxième loi de Newton donne l'accélération du mobile. La mise en œuvre de la mesure est alors effectuée et le résultat comparé à la valeur attendue.

Ce que permet l'utilisation du logiciel, c'est d'inverser le processus. C'est à dire de ne plus considérer que la résistance de l'air est négligeable, mais d'étudier grâce à la simulation, les effets des différents paramètres du modèle (présence de la résistance de l'air, masse de l'objet, taille de l'objet, la hauteur de chute) sur les résultats de la mesure. Puis de choisir pour la mesure, les conditions optimales d'expérimentation, c'est à dire celles qui rapprochent le plus la chute dans l'air, de la chute libre.

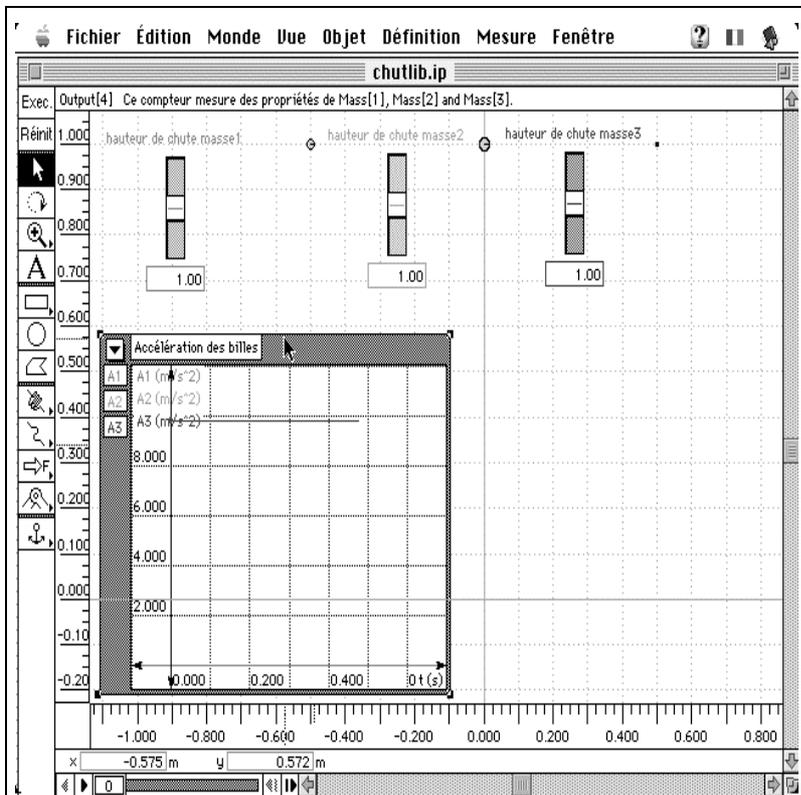
Examinons comment procéder avec le logiciel pour mener cette étude.

2.3.1 Le dispositif

Il apparaît ci-dessous :



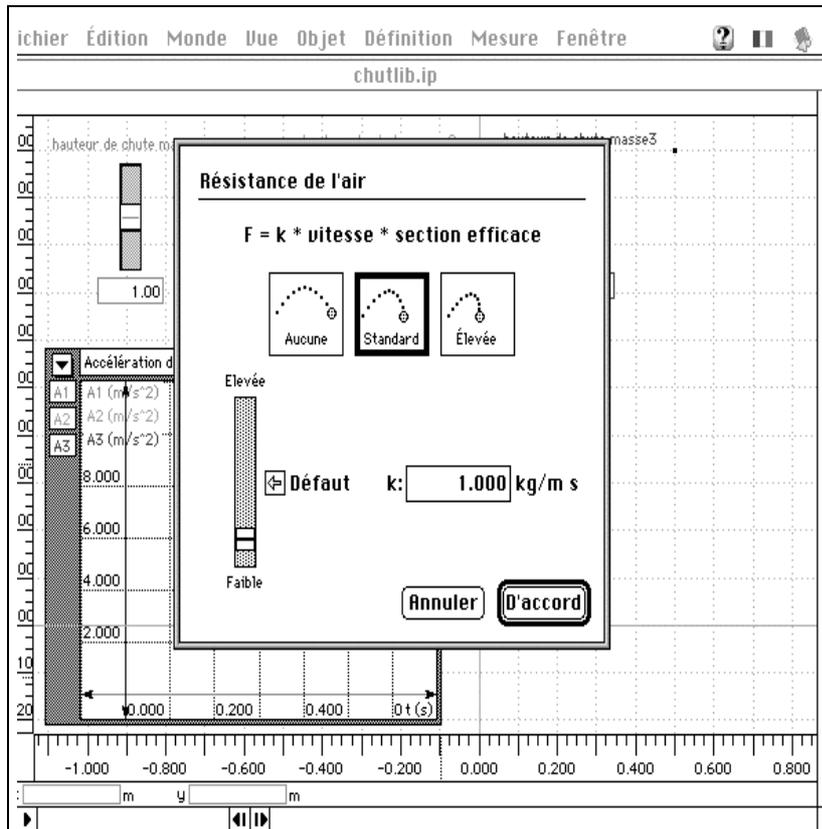
On étudie la chute de trois billes dont on peut modifier les caractéristiques sur une hauteur de 1m dans un monde dont on peut aussi modifier les propriétés.



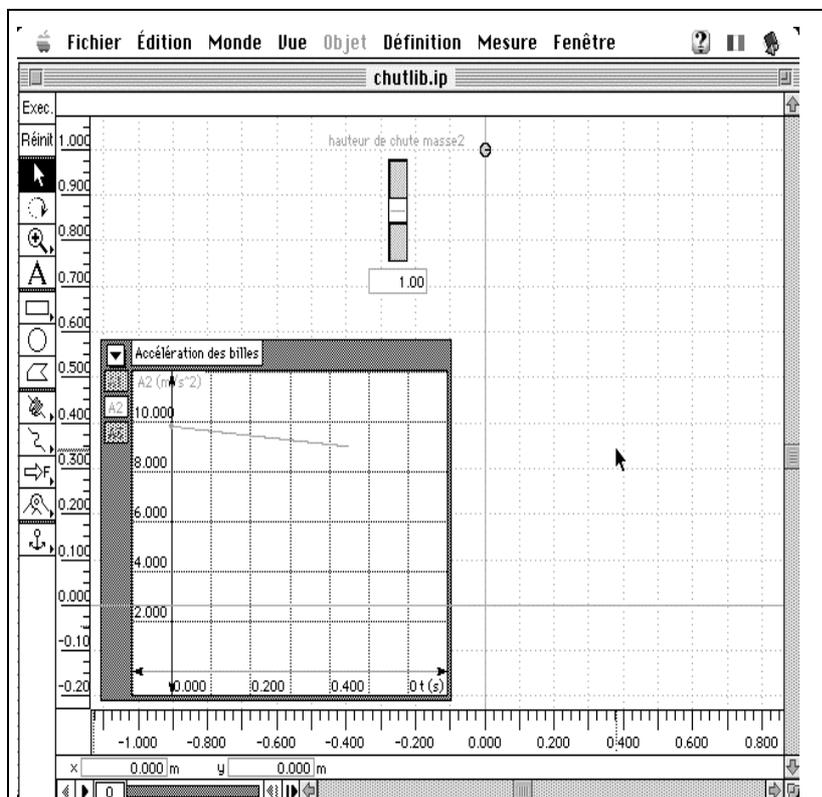
On peut dans un premier temps éliminer la résistance de l'air. L'accélération a , conformément à la théorie, est une valeur constante.

2.3.2 Introduction de la résistance de l'air.

On peut ensuite introduire la résistance de l'air.



On utilise alors le modèle, d'une force dont la valeur est proportionnelle à la vitesse.

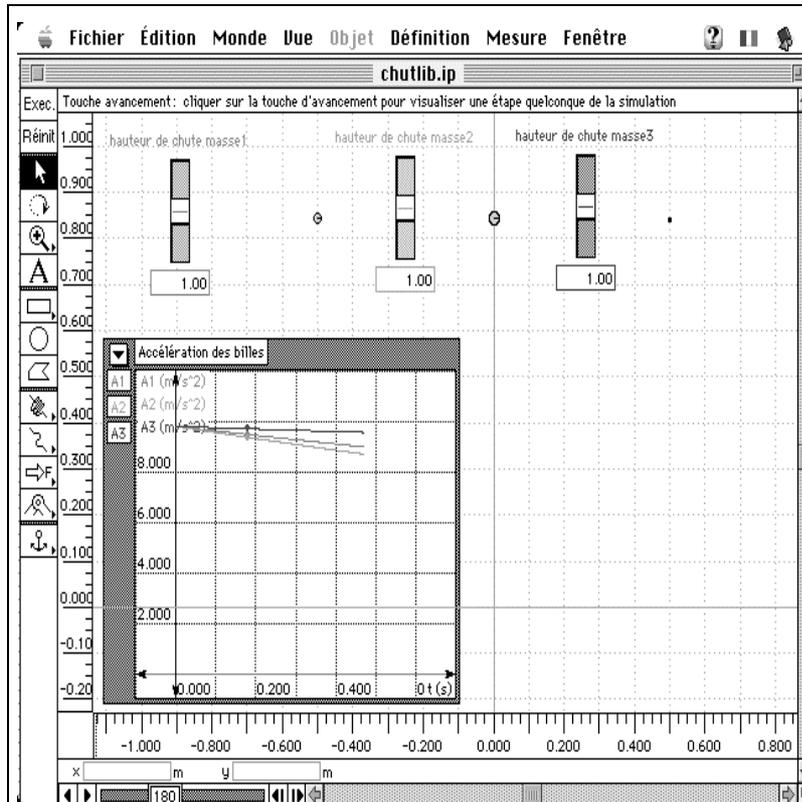


Il est possible d'accentuer l'importance de cette résistance afin de faciliter les observations.

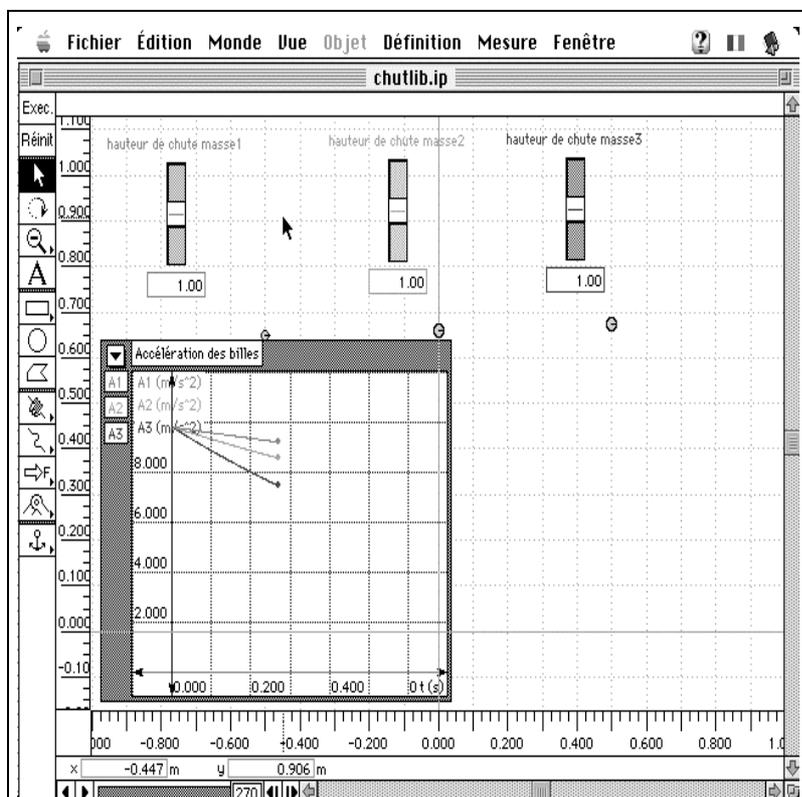
On voit que l'accélération n'est alors plus constante. Elle décroît au cours du temps.

2.3.3 Influence de divers paramètres.

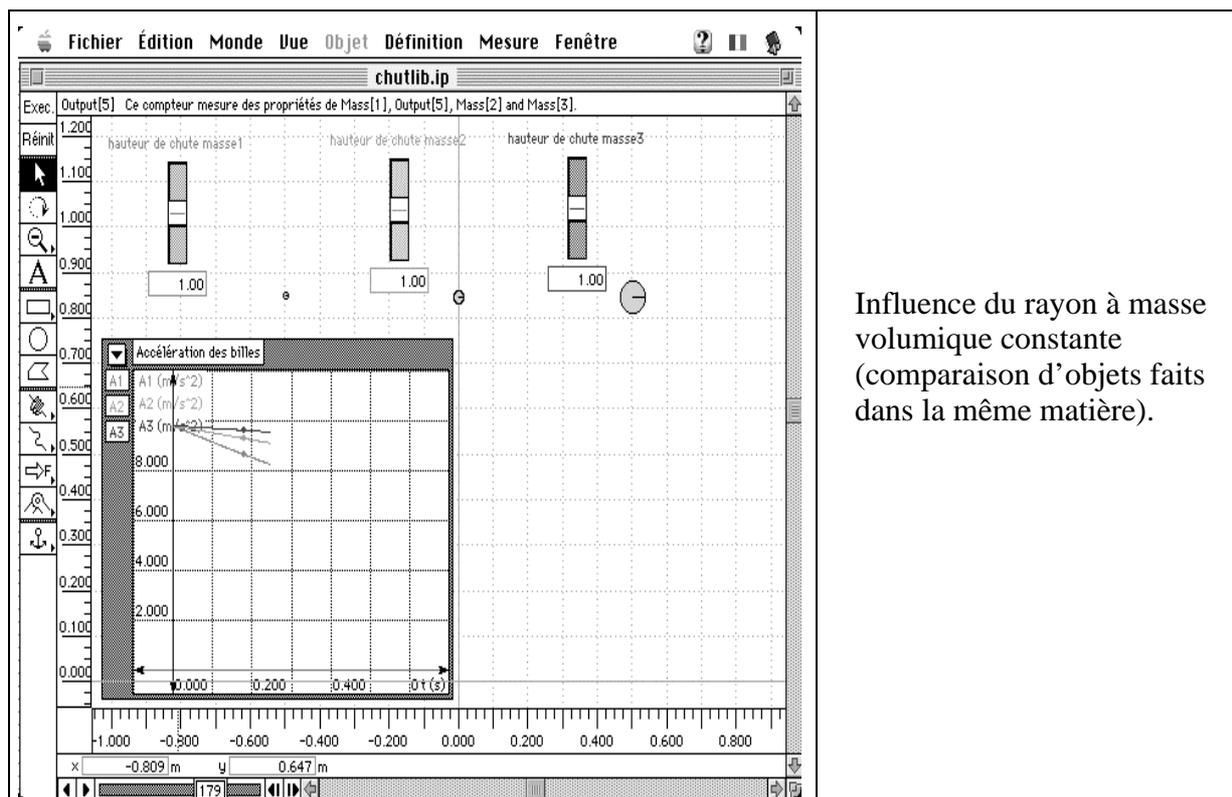
On peut ensuite étudier l'influence des autres paramètres : ceux qui sont liés aux caractéristiques de la bille sur la variation de l'accélération.



Influence du rayon, la masse étant constante. Les élèves peuvent faire des hypothèses sur l'influence de ce paramètre. Le plus frappant consiste à comparer les chutes simultanées de trois objets de rayons différents et de même masse.



Influence de la masse à rayon constant.



Influence du rayon à masse volumique constante (comparaison d'objets faits dans la même matière).

2.4 Conclusion.

Le problème initial n'est finalement pas si simple à résoudre.

On peut néanmoins tirer quelques enseignements.

- Si on a le choix entre plusieurs billes en acier il vaut mieux utiliser celle qui a le plus grand rayon.
- Si on utilise la relation entre la distance parcourue et le carré de la durée du parcours, il faut effectuer des mesures en plusieurs points correspondants à des hauteurs de chute différentes. En effet si les conditions se rapprochent de celles de la chute libre le graphe doit alors être linéaire.

De cette utilisation du logiciel, on peut déduire les conditions expérimentales optimales (indépendamment du dispositif expérimental). On peut montrer ainsi l'écart qui existe entre le modèle de la chute libre et la chute dans l'air.

Au lieu de se substituer à l'expérience, l'utilisation du logiciel permet au contraire de mettre en lumière le rôle du modèle, en favorisant, on peut l'espérer, une meilleure représentation des enjeux de la physique.

3. La modélisation avec STELLA©

Bien que fondé sur les mêmes principes de simulation numérique et sur la même idée de création d'un modèle (modélisation) que l'on peut mettre en fonctionnement (simulation), le logiciel Stella présente trois caractéristiques essentielles :

- Il est fondé sur l'intégration numérique d'une équation différentielle du 1er ordre modélisant une relation "débit/réservoir" (équation sur des grandeurs dépendant donc du temps) ;
- La construction de modèles repose sur l'utilisation de trois "objets" ("réservoir", "pompe", "convertisseur", représentés par trois symboles graphiques qui sont le rectangle, la flèche et le rond) : affectation de grandeurs physiques aux objets ; création de liens directionnels traduisant les relations entre grandeurs mises en œuvre dans le modèle ;
- Fonctionnant à un niveau abstrait, il permet de traiter de façon équivalente des systèmes mécaniques, électriques, etc., illustrant ainsi l'un des aspects de la modélisation : un même formalisme pour différents domaines¹⁶.

Les premières versions de ce logiciel datent d'une vingtaine d'années. Il est actuellement utilisé dans différents pays (Suisse et Allemagne, par exemple) et à différents niveaux (secondaire et supérieur). Une expérimentation de la version Stella II sous Windows¹⁷ avec des élèves de Terminale et de Première scientifique¹⁸ sert de base à la présentation des activités possibles : résolution de problèmes reposant sur la construction et la manipulation de modèle en mécanique, électrocinétique, cinétique chimique, etc...

3.1 Les fonctionnalités de base pour la construction des modèles

L'originalité de ce logiciel apparaît d'abord au plan ergonomique : la construction des modèles se fait fondamentalement par manipulation de représentations symboliques génériques. La seconde originalité se situe au niveau du fonctionnement du logiciel. Le "moteur" de base de tout modèle Stella est constitué d'une association "pompe-réservoir" que l'on peut imaginer par l'association robinet / baignoire : la quantité stockée évolue en fonction du débit.

¹⁶ Voir le programme de la classe de Terminale pour le cas des oscillateurs : chapitre 4, intitulé "modèles".

¹⁷ Actuellement uniquement en version anglo-saxonne. Pour Windows 3.1 (et sup.), PC 486 (ou sup.) et 4 Mo de RAM (min).

¹⁸ Bernard Richoux, Roger Journeaux, dans le cadre d'une recherche menée à l'INRP (TECNE) sous la responsabilité de D. Beaufils.

Au début une session Stella, l'écran se présente comme ci-dessous :

-1- pour changer de "niveau" .
Le logiciel permet le travail sur le produit fini ("niveau supérieur"), ou sur le produit en cours de construction sous forme d'icône ("niveau intermédiaire"), ou le produit en cours de construction sous forme de formule de calcul ("niveau inférieur").

-2- pour passer du mode "vision seule" au mode "modification possible" (celui que l'on va utiliser).

-3- et -4- pour créer les variables décrites plus loin.

The screenshot shows the Stella 3.0.7 interface. At the top is a menu bar with options: File, Edit, Diagram, Data, Help. Below it is a toolbar with icons for file operations and editing. The main workspace contains a diagram with two nodes, 'Reservoir 1' and 'Reservoir 2', connected by a pipe. Annotations with arrows point to various parts of the interface:

- '-1- Changer de niveau' points to the 'Edit' menu option.
- '-2-' points to the 'Diagram' menu option.
- '-3- Création de la variable type RESERVOIR' points to the 'Reservoir 1' node.
- '-4- Création d'une variable type POMPE' points to the pipe connecting the two reservoirs.
- 'Pour sélectionner' points to the 'Diagram' menu option.
- 'Pour détruire' points to the 'Data' menu option.

Les boutons en haut et à droite ont la signification de l'environnement Windows95 (respectivement réduction en icône, agrandissement ou réduction de la fenêtre et fermeture du fichier).

C'est sur l'exemple de la décroissance radioactive que nous présenterons, dans la suite, les différentes fonctionnalités du logiciel.

3.1.1 L'association pompe-réservoir

The diagram shows a circular pump icon labeled 'pompe' connected by a horizontal pipe to a rectangular box labeled 'réservoir'.

Cet association pompe/réservoir est, du point de vue du calcul, un intégrateur par rapport au temps. On voit donc d'emblée les possibilités d'utilisations en physique et chimie : tous les phénomènes régis par une ou plusieurs équations différentielles par rapport au temps pourront en effet être ainsi modélisés.

Une telle association réalisée, il suffit de spécifier les valeurs initiales pour obtenir l'exécution des calculs : on retrouve naturellement la nécessité de spécifier une condition initiale pour une équation différentielle du premier ordre. À aucun moment, l'utilisateur n'a donc à écrire l'équation différentielle : il ne fait qu'associer une grandeur et son taux de variation. C'est le logiciel qui génère à un niveau "inférieur" les relations permettant les calculs.

Ci-contre, les équations numériques générées par Stella pour l'intégrateur précédent, pour lequel on a choisi une valeur initiale égale à 5 pour le réservoir et un débit égal à 10.

```

reservoir(t) = reservoir(t - dt) + (pompe) * dt
INIT reservoir = 5
INFLOWS:
pompe = 10
    
```

14

8èmes Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques - Montpellier 1998

La première équation est la traduction mathématique du rôle intégrateur de l'ensemble pompe-réservoir : on reconnaît le principe de la méthode d'Euler¹⁹ pour la résolution numérique d'une équation différentielle du premier ordre. En fait, ces équations peuvent être entièrement ignorées, mais du point de vue pédagogique, il peut être intéressant de les montrer pour faire comprendre le principe, en faisant remarquer que la méthode correspond à la définition de la vitesse moyenne entre $t - dt$ et t .

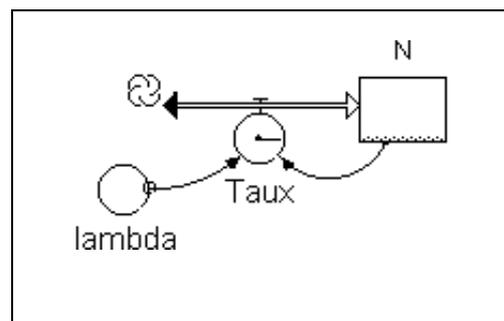
Pour étudier la loi de décomposition radioactive, on crée le réservoir de noyaux radioactifs (nommé "N") et la pompe (nommée "Taux") qui représente son taux de variation : par défaut la pompe ne peut que remplir le réservoir et ce dernier ne peut avoir qu'un contenu positif. Ici cette restriction est levée en choisissant la pompe en position "biflow".

3.1.2 Les liens

Pour modéliser l'hypothèse que le débit (négatif dans ce cas) dépend de la valeur du réservoir et, pour traduire l'hypothèse de base, on crée un lien partant de "N" arrivant sur "Taux" en utilisant l'outil prenant la forme d'une flèche. L'utilisateur a ainsi l'obligation d'analyser le problème avec finesse pour la recherche des dépendances entre grandeurs (liste et sens des relations).

3.1.3 Les convertisseurs

Si on fait l'hypothèse supplémentaire d'une relation de simple proportionnalité, on peut utiliser un troisième outil (appelé "convertisseur" et prenant la forme d'un rond simple) pour faire apparaître le paramètre de proportionnalité et on crée le lien (orienté) correspondant. On doit alors entrer dans "Taux" l'expression " $-\lambda \cdot N$ " qui explicite mathématiquement l'hypothèse.



3.1.4 Lancement du calcul et choix du niveau de présentation du résultat

Avant de lancer le programme, il faut introduire les valeurs numériques nécessaires au calcul : ici dans notre exemple, la valeur initiale de N a été prise égale à $1.50E12$ et celle de lambda donne une période de 30 années (Césium). Le logiciel ne gère pas les unités ; c'est donc l'utilisateur qui doit vérifier que les valeurs numériques sont cohérentes ; ici on a choisi l'année comme unité de temps.

L'absence de données est signalée dans le modèle Stella par un point d'interrogation dans la "grandeur" correspondante : cette présentation met donc avec raison l'accent sur cette nécessité rencontrée dans de nombreux problèmes de physique et de chimie.

L'icône de lancement est symbolisé par un coureur (*run*) mais le résultat du calcul doit être présenté sous forme de graphe ou de tableau.

¹⁹ Dans la pratique on peut choisir deux méthodes plus efficaces : les méthodes Runge-Kutta 2 ou 4.

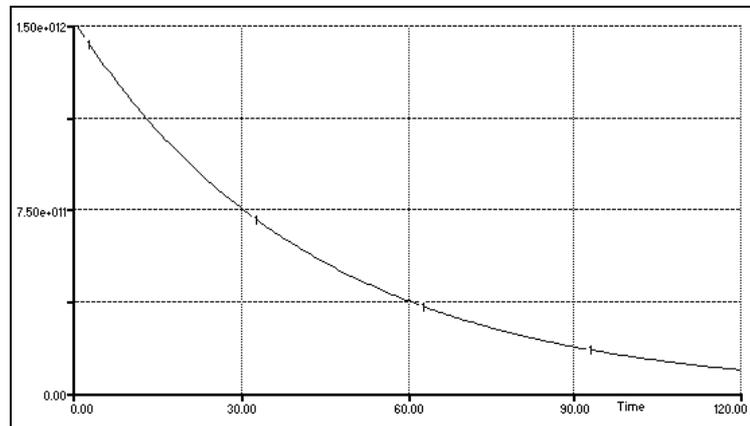
3.1.5 Présentation du résultat : graphe et tableau

Les icônes demandant un graphe ou un tableau sont d'une manipulation assez intuitive et permettent d'afficher les grandeurs en fonction du temps, une grandeur en fonction d'une autre grandeur, des séries d'une grandeur pour plusieurs valeurs d'un paramètre.

Les échelles peuvent être automatiques ou manuelles. Les graphes ou tableaux peuvent être placés dans le niveau intermédiaire (où se trouve le modèle Stella) ou dans le niveau supérieur (l'intérêt de ce niveau supérieur est l'étude du fonctionnement du programme et non plus son élaboration). Dans ce niveau, des "potentiomètres" permettent de modifier rapidement certains paramètres pour en observer l'influence sur le phénomène.

L'utilisateur doit encore réfléchir aux valeurs numériques à donner à deux paramètres qui ont beaucoup d'influence sur le résultat : la durée totale du calcul et le pas du calcul dans la méthode d'Euler ou de Runge-Kutta. Le premier est fixé par défaut à la valeur 12 et il faut l'adapter au phénomène étudié : on a choisi ici la valeur 120 (années). Le deuxième correspond à un choix "classique", et son choix n'est délicat que dans les phénomènes variant très rapidement en fonction du temps.²⁰

Ainsi, sans résoudre l'équation différentielle, sans même parler d'équation différentielle, mais en traduisant l'hypothèse que le taux de désintégration dépend, par une loi simple, de la quantité de noyaux, on obtient l'évolution temporelle "classique".



²⁰ Une limite inférieure de 1.10^{-6} apparaît pour dt dans la version PC alors qu'elle n'existe pas dans la version Mac.

3.2 Modélisation en cinétique chimique

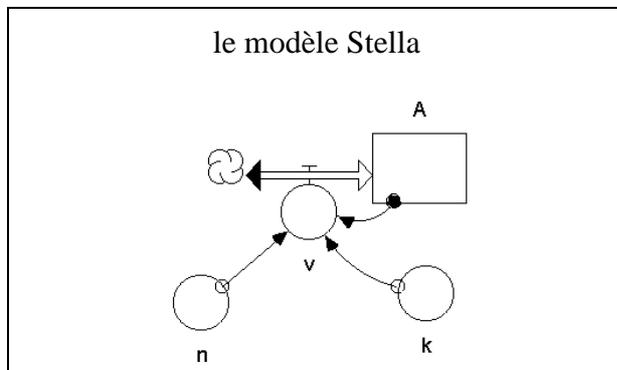
Les problèmes de cinétique chimique régis par une équation différentielle d'ordre connu sont traités sans difficulté supplémentaire par Stella.

Dans le cas général où $\alpha A + \beta B \longrightarrow \gamma C + \delta D$, la vitesse de la réaction et l'ordre de la réaction sont définis par $v = -\frac{1}{\alpha} \frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{\beta} \frac{d[B]}{dt} = \frac{1}{\gamma} \frac{d[C]}{dt} = \frac{1}{\delta} \frac{d[D]}{dt} = k[A]^n[B]^m$.

Dans le cas où $\alpha = 1$ le modèle Stella est très simple : v constitue la "pompe" et la concentration de A (notée dans la suite A) constitue le réservoir.

Les "convertisseurs" k et n sont ensuite liés à la vitesse, ainsi que la concentration. Après le choix des valeurs initiales, on peut lancer le calcul.

Les modèles correspondants aux ordres 0, 1 et 2 sont regroupés ci-dessous. Les valeurs des constantes sont ici arbitraires.



Le calcul fait par Stella (niveau inférieur) :

$$A(t) = A(t - dt) + (v) * dt$$

$$\text{INIT } A = 0.1$$

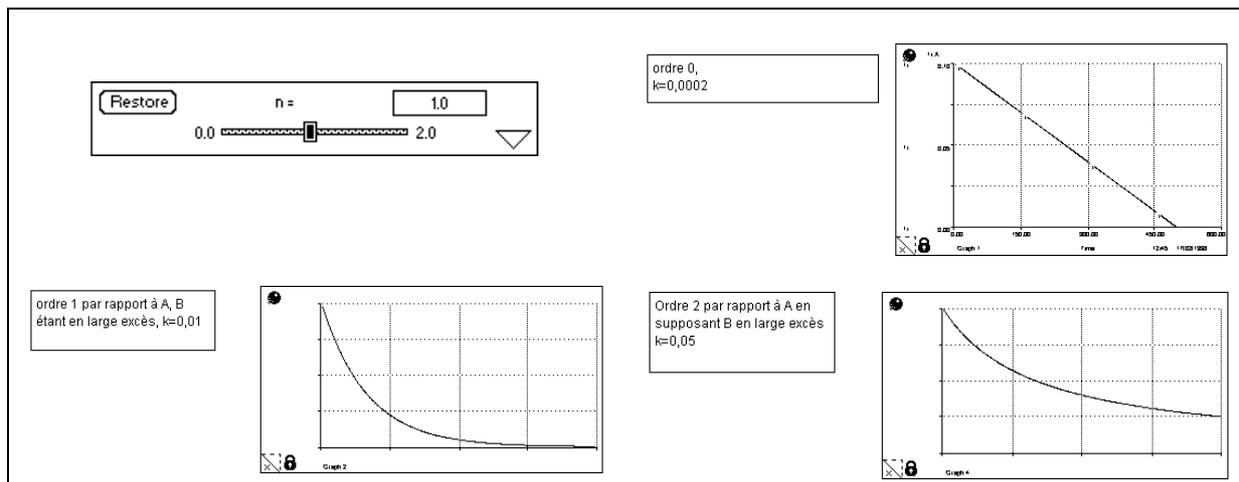
INFLOWS:

$$v = -k * A^n$$

$$k = 0.05$$

$$n = 0$$

Les résultats sont présentés ici dans le niveau supérieur, avec un potentiomètre pour choisir la valeur de n .



Stella est ainsi un moyen efficace et rapide de valider une hypothèse ou d'en écarter une autre. Par exemple, dans la réaction de l'ion permanganate sur l'acide oxalique, on constate une accélération de la réaction après un début très lent qui s'explique par une auto-catalyse de la part d'un produit de la réaction, l'ion Mn^{2+} .

En supposant une vitesse de la forme $v = k * [MnO_4^-] * [Mn^{2+}]$ on retrouve une allure de courbe correspondant à l'expérience.

Dans cet exemple, on voit une "pompe" remplir et vider simultanément deux "réservoirs" ; le niveau de calcul montre le détail et en particulier le fait que la quantité de Mn^{2+} apparue doit être égale, au signe près, à la quantité de MnO_4^- qui disparaît dans le même temps.

Le cas, assez fréquent en chimie, où les coefficients stoechiométriques ne sont pas identiques pour les corps étudiés doit être traité de façon particulière (on utilise des "pompes" particulières, avec un facteur de conversion).

$$Mn2(t) = Mn2(t - dt) + (OP1) * dt$$

$$INIT Mn2 = 0.01$$

INFLOWS:

$$OP1 = K1 * MnO4 * Mn2$$

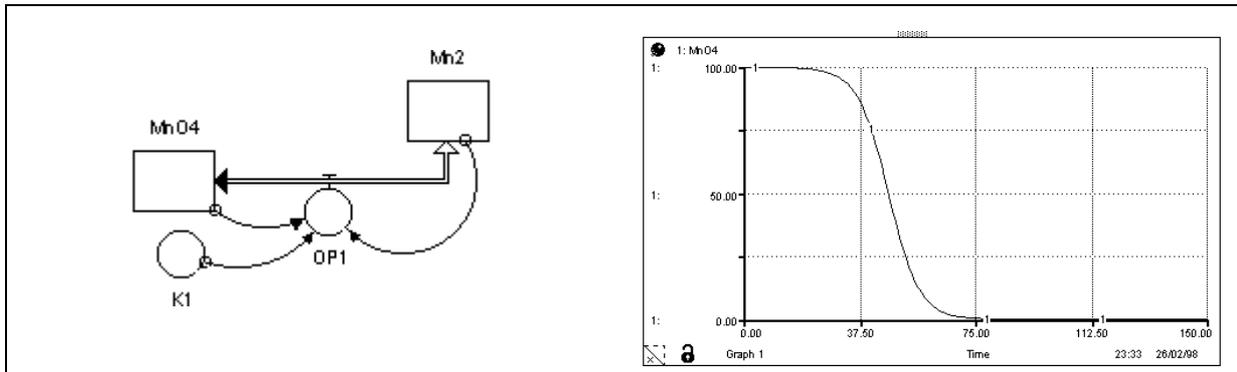
$$MnO4(t) = MnO4(t - dt) + (- OP1) * dt$$

$$INIT MnO4 = 100$$

OUTFLOWS:

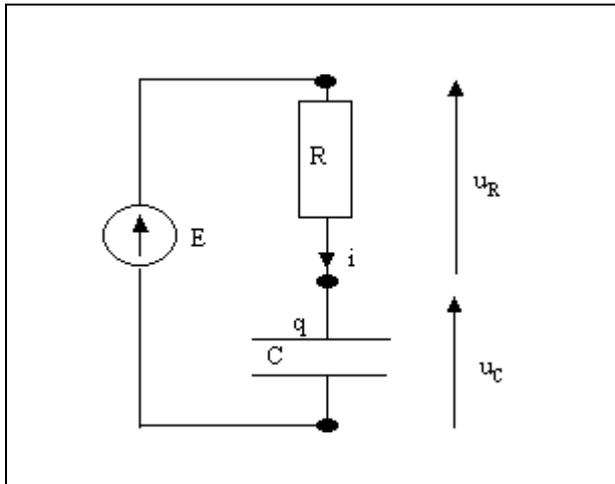
$$OP1 = K1 * MnO4 * Mn2$$

$$K1 = 0.002$$



3.3 Modélisation de la charge du condensateur

Stella est parfaitement adapté à la modélisation de la charge d'un condensateur. L'intensité étant la dérivée de la charge d'une armature par rapport au temps, celle-ci (q) peut en effet être considérée comme le "réservoir" alimenté par la "pompe" intensité (i). La connaissance de l'intensité, point de départ nécessaire pour le calcul, est établie par l'application des lois de l'électricité, et suppose donc que l'on modélise les dipôles utilisés (loi d'Ohm, capacité du condensateur).



$$u_R = R i$$

$$u_C = q / C$$

$$\text{et } i = dq / dt$$

La source est supposée idéale donc :

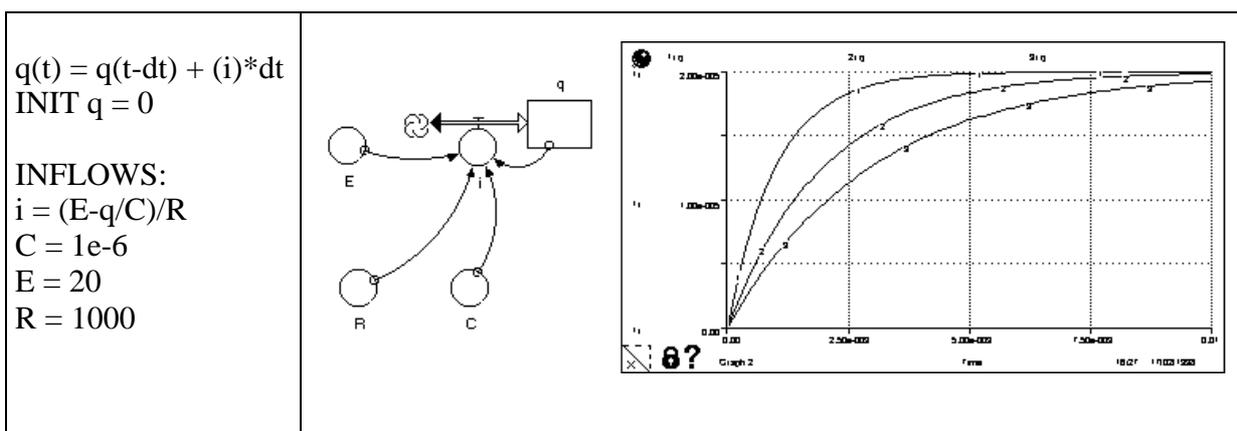
$$E = u_R + u_C$$

$$E = R i + q / C$$

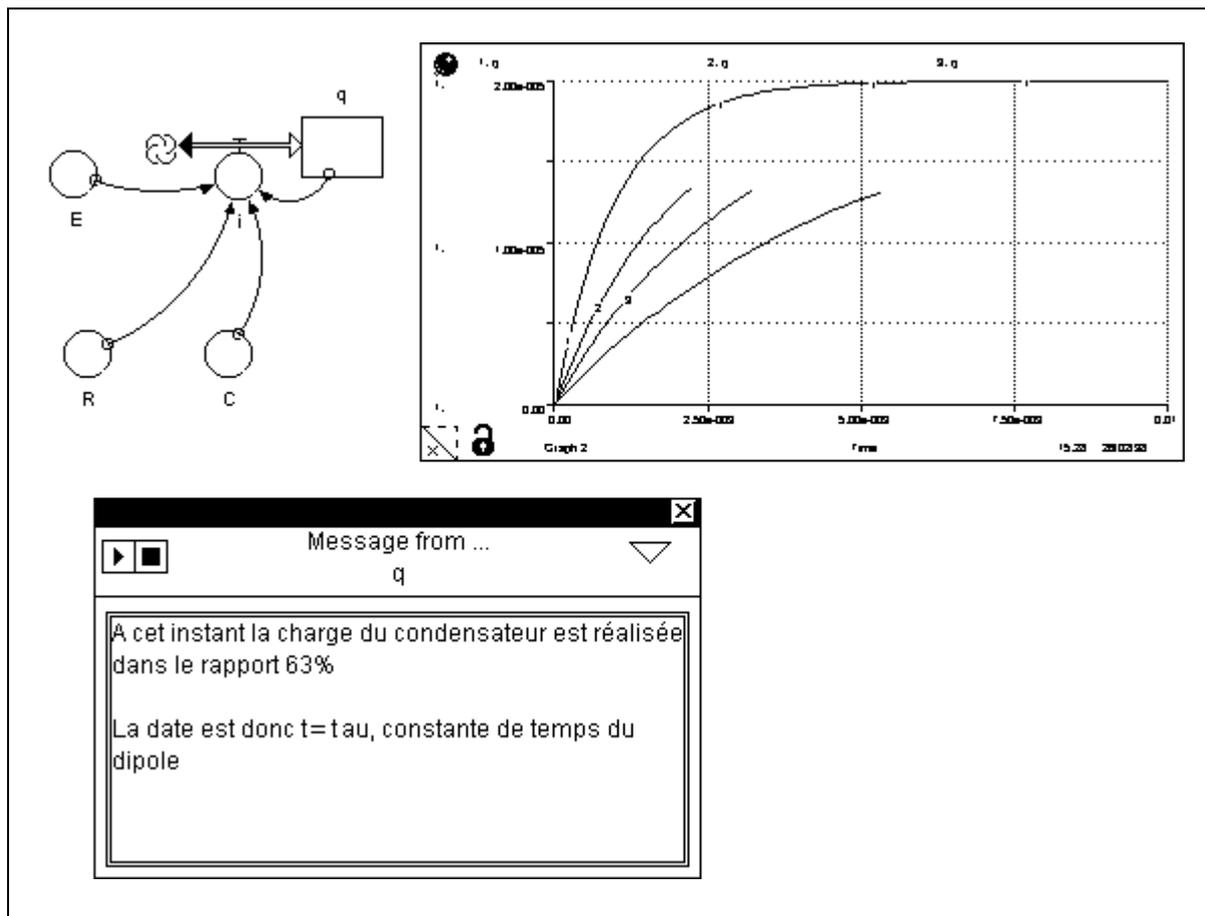
$$i = E/R - q / RC$$

La création du couple intensité/charge étant faite, on crée les "convertisseurs" qui représentent les grandeurs E , R et C . Les liens qui permettent de calculer l'intensité à partir de la charge, de E , de R et de C sont aussi créés ; on écrit alors l'expression de i et on complète le modèle par les valeurs numériques des différents paramètres et par les valeurs initiales des variables i et q .

On obtient le modèle Stella ci-dessous, avec les résultats pour trois valeurs différentes de la constante de temps.



Il est possible aussi de placer un message ou un arrêt du déroulement du programme selon une valeur de la date (égale à RC par exemple) ou de la charge ($0,63 q_{max}$!) pour mettre en évidence un paramètre important (ici la constante de temps).



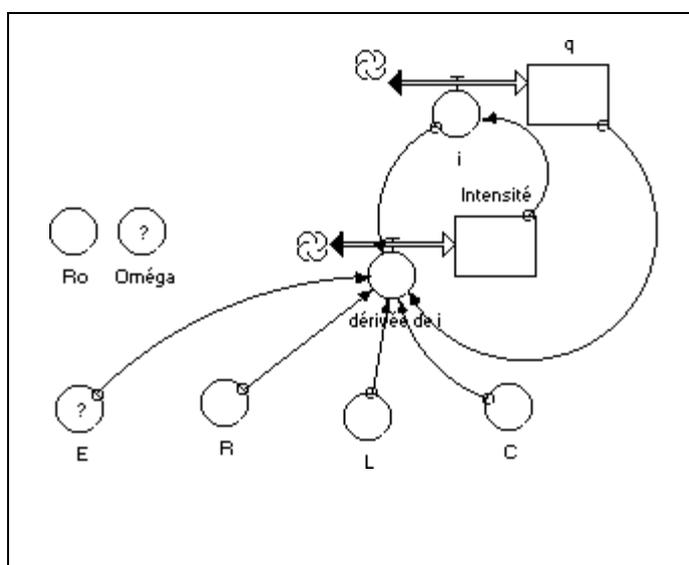
3.4 Modélisation des oscillations électriques

Un circuit électrique dans lequel sont branchés en série un générateur de tension, un conducteur ohmique, une bobine et un condensateur est décrit par une équation différentielle du deuxième ordre. Une structure à deux "intégrateurs" sera donc nécessaire pour obtenir la charge du condensateur : $di/dt \Rightarrow$ intensité, et intensité \Rightarrow charge.

Entre les deux "étages" intégrateur, on remarque la liaison entre le "réservoir" intensité (alimenté par la "pompe" di/dt) et la "pompe" intensité (notée i et alimentant le "réservoir" charge).

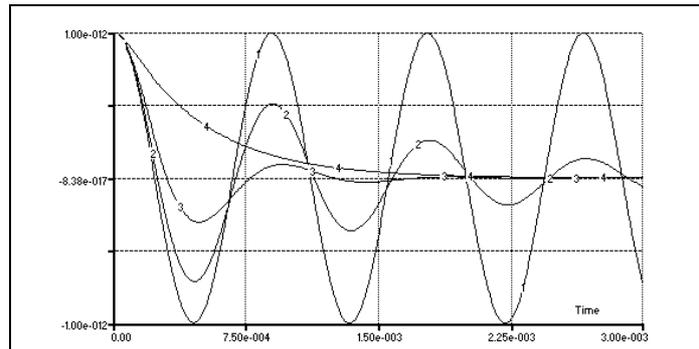
La grandeur "dérivée de i " est bien évidemment reliée aux différents paramètres E , L , R et C , mais aussi à la charge q et à l'intensité i :

$$\frac{di}{dt} = \frac{E - Ri - \frac{q}{C}}{L}$$



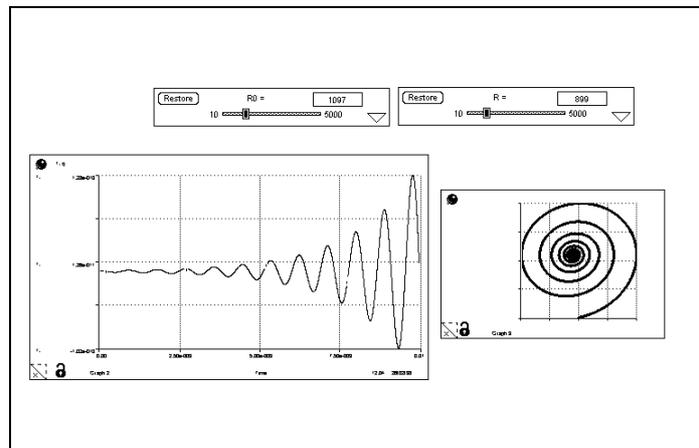
Un tel modèle permet d'étudier aussi bien les oscillations libres amorties, auto-entretenues ou forcées : il suffit de spécifier le modèle choisi pour E.

Si $E = 0$ et à condition d'avoir choisi une charge initiale, on obtient les oscillations libres (amorties ou non suivant R) comme le montre les graphes ci-contre.

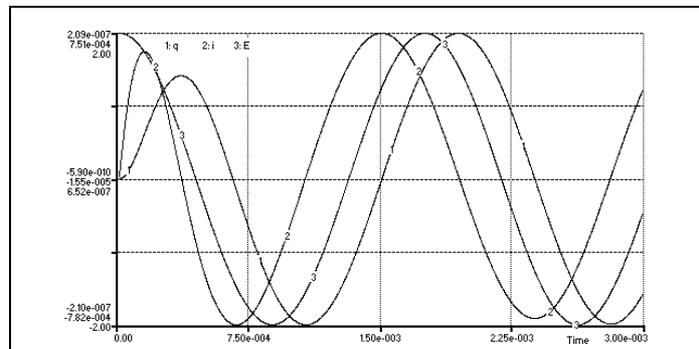


Si $E = R_0 * i$ on obtient le début de la phase d'établissement des oscillations auto-entretenues.

L'obtention du diagramme de phase ne suppose que l'ouverture d'un nouveau graphique et on a choisi ci-contre de présenter le résultat dans le niveau "supérieur" dans lequel des potentiomètres permettent des modifications aisées des paramètres (ici les deux résistances).



Si E est une fonction sinusoïdale on obtient les oscillations forcées. On peut ainsi mettre en évidence les déphasages entre les différentes variables ainsi que les différents régimes obtenus selon la fréquence de la source (notamment la fréquence de résonance).



3.5 Modélisation en mécanique : exemple de l'oscillateur à une dimension

Stella est particulièrement adapté à la modélisation en mécanique. La vitesse étant la dérivée de la position par rapport au temps, celle-ci peut en effet être considérée comme le "réservoir" alimenté par la "pompe" vitesse (v). De même, l'accélération étant la dérivée de la vitesse par rapport au temps, celle-ci sera alors le "réservoir alimenté par la pompe" accélération (a). La résolution de l'équation différentielle du mouvement sera donc obtenue avec Stella en créant un double intégrateur numérique. La connaissance de l'accélération, point de départ nécessaire pour le calcul, est bien sûr établie par l'application du théorème du centre d'inertie, et suppose donc que l'on modélise les forces appliquées.

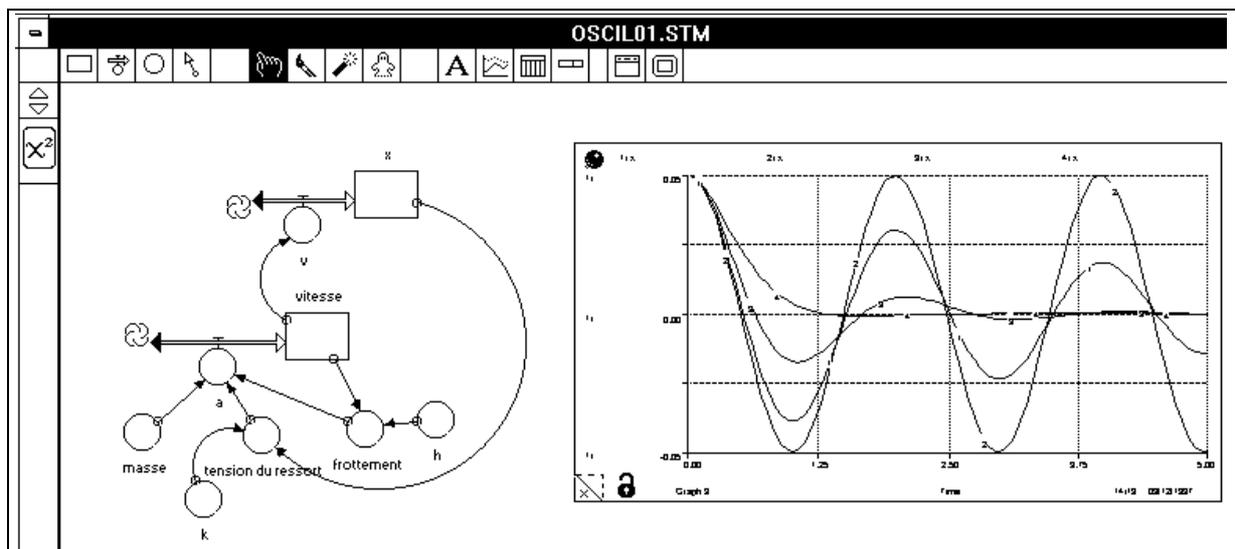
Pour un oscillateur mécanique à une dimension, par exemple, les forces appliquées peuvent être la tension du ressort et une force de frottement : $\vec{T} + \vec{f} = m\vec{a}$.

La création des deux couples accélération/vitesse et vitesse/position (reliés par la vitesse) étant faite, on peut créer les "convertisseurs" qui représentent les grandeurs masse, tension, frottement, etc. On crée enfin les liaisons qui traduisent les relations entre ces grandeurs :

- La liaison traduisant le fait que la tension est déterminée à partir de x ; On a supposé ici une force de rappel en $-k.x$;
- La liaison traduisant le fait que la force de frottement dépend de la vitesse ; on a supposé un frottement fluide en $-h.v$;
- Les liaisons qui permettent de calculer l'accélération à partir de la masse, de la tension et de la force de frottement ; on écrit alors son expression par une relation traduisant en quelque sorte sa dépendance fonctionnelle :

$$a = (\text{tension du ressort} + \text{frottement})/\text{masse}$$

On complète le modèle par les valeurs numériques des différents paramètres et par les valeurs initiales des variables x et v . L'affichage du résultat $x = f(t)$ ci-dessous correspond à des valeurs croissantes de h : passage des oscillations libres ($h = 0$) aux oscillations faiblement, puis plus fortement amorties.



Si l'on veut se mettre dans les conditions de fonctionnement du modèle sans mettre l'accent sur son élaboration, on peut aussi choisir de résoudre l'équation différentielle du deuxième ordre dans le cas le plus général et modifier les valeurs des différents paramètres pour observer le résultat : cela revient à résoudre une équation de la forme

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \varepsilon \left[-1 + b \left(\frac{y}{a} \right)^2 \right] \frac{dy}{dt} + cy = 0.$$

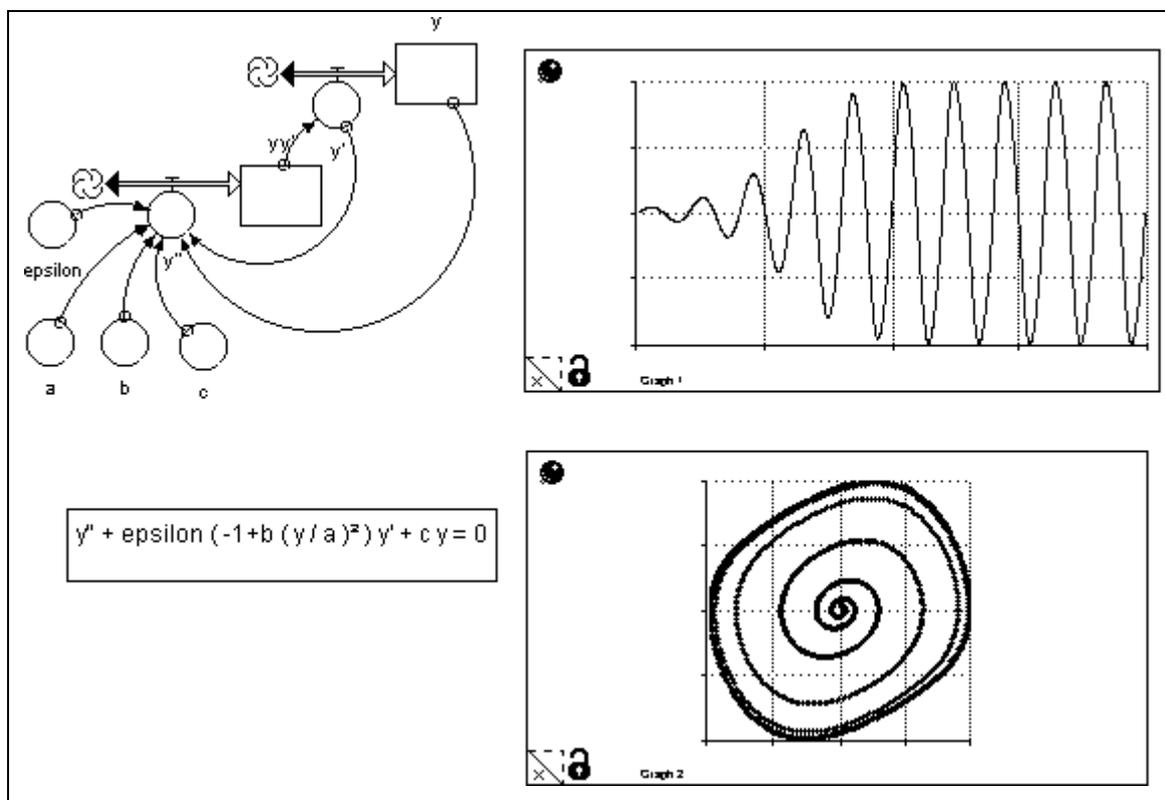
On réalise les deux intégrateurs successifs pour les couples accélération/vitesse et vitesse/position, reliés entre eux par la vitesse, puis on crée tous les convertisseurs pour toutes les grandeurs qui interviennent dans l'équation.

Il faut ensuite créer trois liaisons aboutissant au point de départ du calcul, l'accélération a :

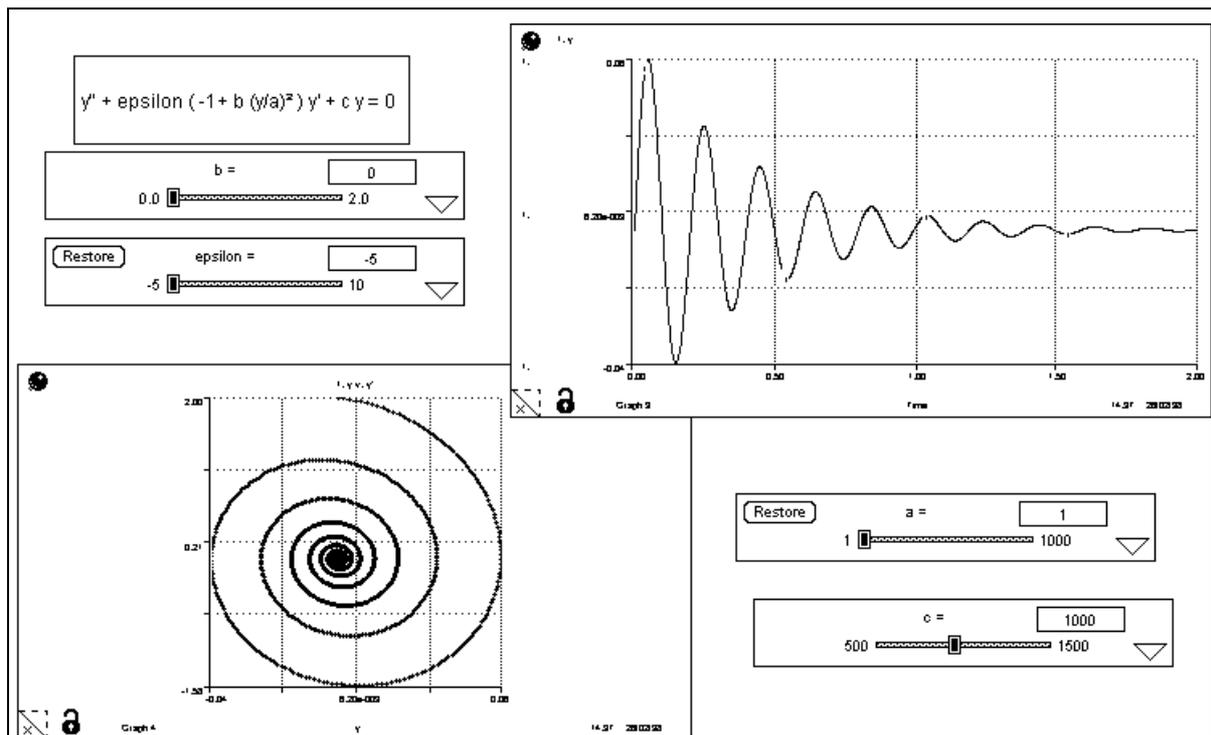
- une liaison venant des paramètres ϵ et b
- une liaison venant du paramètre a
- une liaison venant du paramètre c
- et on complète le modèle par les valeurs numériques des paramètres d'une part et par les valeurs initiales des variables d'autre part.

L'affichage du résultat $y = f(t)$ et $y' = g(y)$ est placé à côté du modèle (voir ci-dessus) ou dans le niveau supérieur si l'on veut se concentrer sur l'analyse de l'influence des paramètres.

Dans la pratique, les oscillations paramétriques seront obtenues avec, par exemple, $\epsilon = 10$, $b = 1$ et $a = 1$ (cas de la figure ci-dessus avec $c = 1000$).



Pour obtenir des oscillations libres il faut prendre $\epsilon = 0$. Pour les oscillations amorties (cas de la figure ci-dessus avec $c = 1000$) il faut prendre $b = 0$ et par exemple $\epsilon = -5$.



3.6 Action d'un champ électrique et d'un champ magnétique sur une particule chargée

Les champs \vec{E} et \vec{B} sont supposés orthogonaux. Une charge q est accélérée puis déviée par les champs $\vec{E} = E\vec{i}$ et $\vec{B} = B\vec{k}$. On choisit l'origine des dates au passage d'un électron à l'origine O des coordonnées. La valeur de B est de 0.005 Tesla.

- La relation de la dynamique permet d'écrire

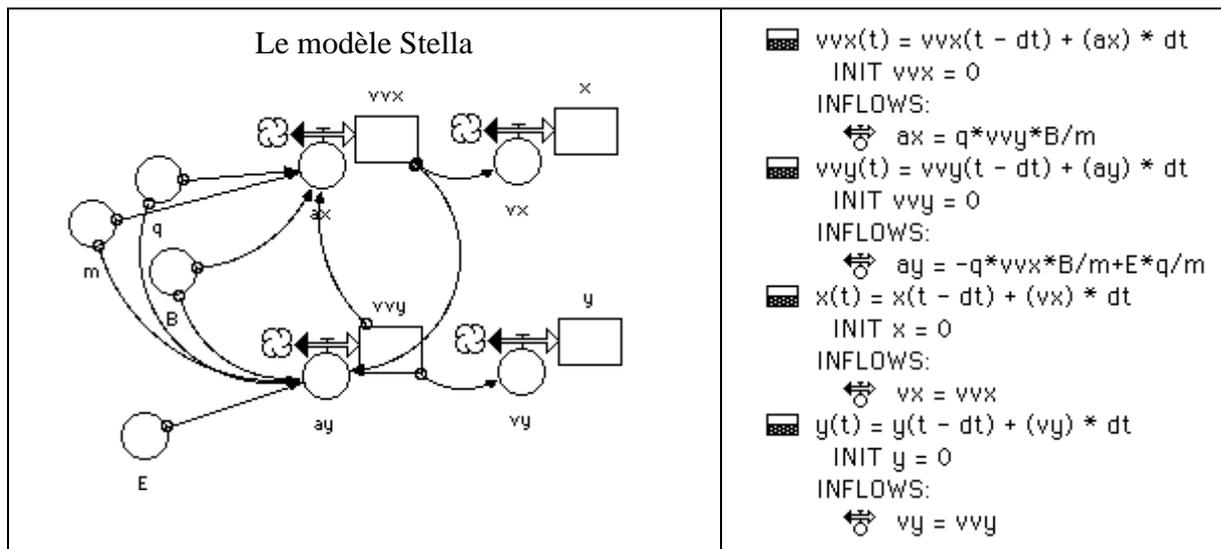
$$m\vec{a} = q\vec{E} + q(\vec{v} \wedge \vec{B})$$

- En posant $k_1 = q * B / m$ et $k_2 = q * E / m$, on a :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{qB}{m} x = k_1 x$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{qE}{m} - \frac{qB}{m} y = k_2 - k_1 y$$

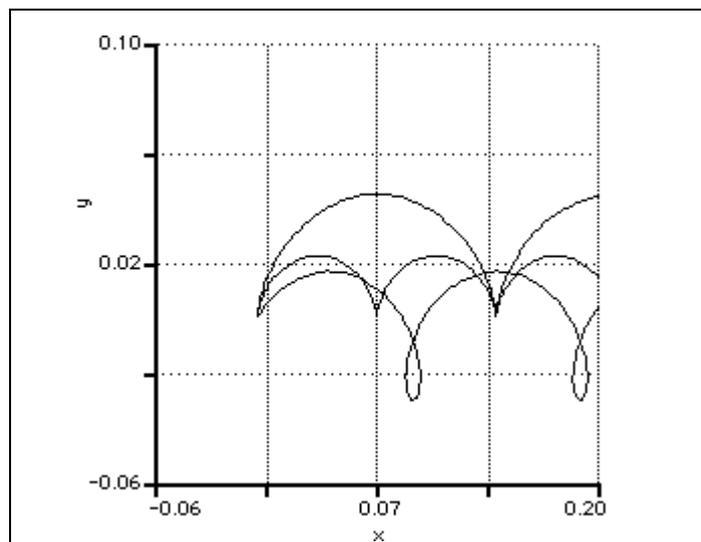
$$\frac{dz}{dt} = 0$$



On choisit une durée d'étude comprise entre 0 et $2 \cdot 10^{-8}$ s et un $dt = 1 \cdot 10^{-10}$ s. La méthode la plus appropriée est celle de Runge-Kutta 4.

Les deux cycloïdes obtenues correspondent, bien sûr, à $v_x(0) = v_y(0) = 0$, pour des valeurs du champ électrique de $50\,000 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, et $100\,000 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$.

La troisième courbe est obtenue pour une valeur du champ électrique de $70\,000 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, et $v_x(0) = v_y(0) = 20 \cdot 10^6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Remarque : cet exemple ne fonctionne que sur Mac Intosh ($dt > 10^{-6}$).

3.7 Application à la résolution d'un exercice type bac

Après un rapide apprentissage de STELLA (2 heures en deux séances), nous avons proposé à trois élèves de terminale scientifique de résoudre deux exercices de type "bac" : l'un est extrait de leur manuel (TermS Physique, Hachette) et l'autre est un exercice donné au bac en 1996 (Asie).

Le texte :

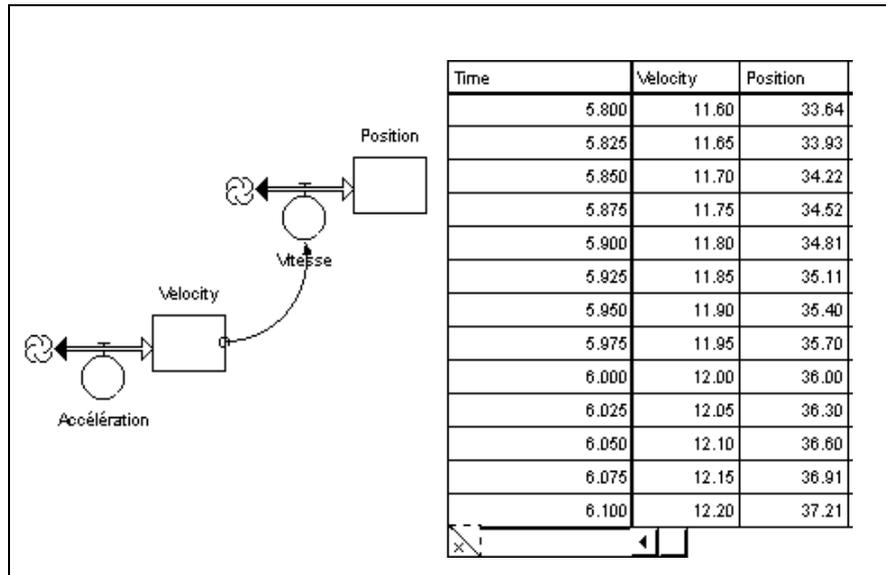
Une cabine d'ascenseur de masse $M = 300 \text{ kg}$, transporte trois personnes de masse totale $m = 200 \text{ kg}$. Lorsque la cabine est en mouvement, le câble exerce sur celle-ci une force constante F verticale, dirigée vers le haut et de valeur $5\,900 \text{ N}$.

1 a) Écrire l'expression littérale de l'accélération de la cabine.

b) Calculer l'accélération de la cabine et préciser le sens du vecteur accélération.

2) a) La cabine démarre sans vitesse initiale. Donner les expressions littérales de la vitesse et de l'altitude à un instant t , sachant que l'altitude initiale est nulle.

b) Calculer les valeurs de la vitesse et de l'altitude à l'instant $t = 6 \text{ s}$.

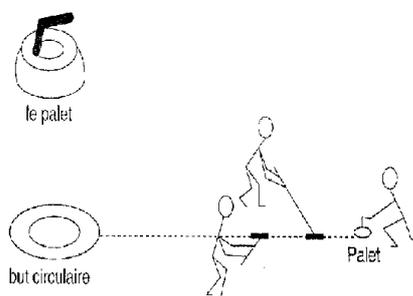


Ce premier exercice n'a pas posé trop de problèmes, puisque l'accélération était calculée de façon classique et servait ensuite de donnée pour résoudre l'exercice par simple lecture dans un tableau. L'intérêt de cet exercice tient dans la discussion à propos de la valeur de dt et du choix de la méthode de calcul : la valeur de dt par défaut ($dt = 0.25$ pour une durée de 12) ne donne pas la réponse calculée classiquement (34,50 au lieu de 36,00) et avec un $dt = 0,025$, il faut encore modifier le choix de la méthode (passer de Euler à Runge-Kutta2) pour obtenir exactement le "bon" résultat.

Le curling (texte)

On peut lire dans une revue sportive la définition suivante :

« Curling : jeu écossais qui remonte au XVI^e siècle. On y joue sur une patinoire horizontale ; il s'agit d'atteindre un but circulaire avec un palet de pierre, muni d'une poignée, que l'on fait glisser sur la glace. Le palet pèse 20 kg. Le curling se joue entre équipes de quatre. Quand un joueur tire, deux de ses partenaires peuvent balayer la glace devant le palet pour en faciliter le glissement. Chaque joueur lance deux palets. »



Le mouvement du palet sera étudié dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

1) Dans cette question les forces de frottement sont négligées.

Un joueur pousse le palet pendant 3,0 s avec une force f constante, suivant une trajectoire rectiligne, le faisant ainsi passer de l'immobilité à la vitesse de lancement v_L ($v_L = 2,1 \text{ m s}^{-1}$). Ensuite le palet poursuit seul sa trajectoire sur la glace.

- Montrer que, pendant la phase de lancement, le mouvement du centre d'inertie est uniformément accéléré.
- Définir puis calculer son accélération pendant la phase de lancement.
- Calculer la valeur de la force que le joueur a exercée sur le palet.
- Quel est le mouvement du centre d'inertie pour $t > 3,0 \text{ s}$?

2. En réalité il y a des frottements et le palet lancé avec la vitesse v_L précédente parcourt 40 m et atteint le but avec une vitesse que l'on considère comme nulle,

- Calculer l'intensité de la force de frottement, supposée constante, qui s'exerce sur le palet tout au long du parcours.
- En déduire la valeur de la force F' réellement exercée par le joueur.

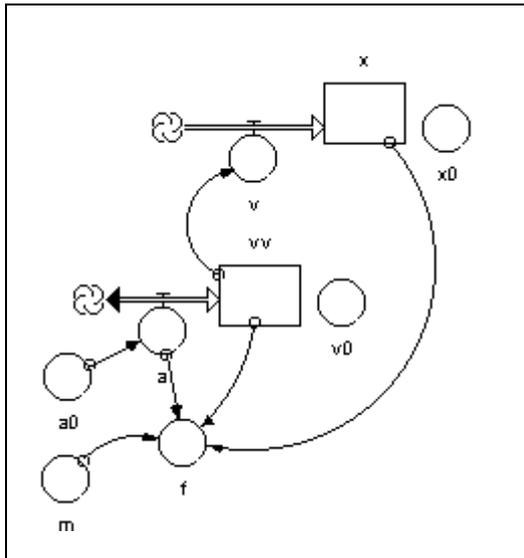
Ce deuxième exercice nécessite une approche "par approximations successives" pour trouver l'accélération; les essais par "tâtonnement" furent vite remplacés par une ligne de programme disponible simplement dans Stella comme l'indique la solution présentée ci-dessous pour la deuxième question.

L'expression de f , force de frottement supposée constante, doit être égale pendant le mouvement à $-m \cdot a$.

Les conditions fixant la validité de la relation précédente sont :

- soit la distance parcourue est trop forte (supérieure à 40 m) ;
- soit la vitesse devient nulle en avant de la cible.

On stoppe le calcul avec une de ces deux conditions dans l'expression de f (écrite ci-dessous).



f

Required Inputs

- vv
- x
- a
- m

f = ...

if (x<40) and (vv>0) then -m*a else (pause)

Restore $a_0 =$

Restore $v_0 =$

Graph 1

Graph 2

$x_0 =$

10:40 11/11/96 Table 1

Time	v	x	F
31.0	0.39	39.05	-1.
31.5	0.36	39.25	-1.
32.0	0.34	39.43	-1.
32.5	0.31	39.60	-1.
33.0	0.28	39.75	-1.
33.5	0.25	39.89	-1.
Final		40.02	

Graph 3

L'analyse des graphes permet de modifier la valeur de a_0 dans le "bon sens" : dans le cas ci-dessus, la distance $x = 40$ est atteinte avant que $v = 0$, il faut donc "augmenter" la décélération.

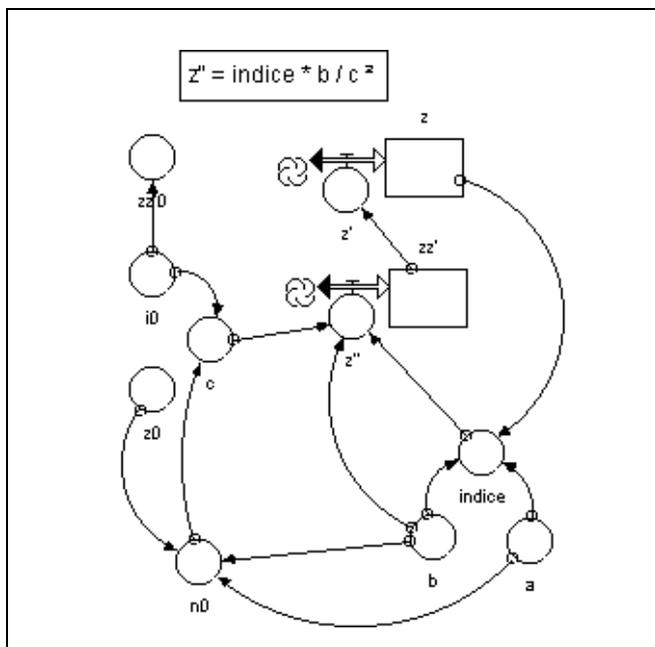
Cette méthode a surpris les élèves, habitués aux réponses déduites d'une relation, et met en évidence encore une fois le caractère "intégrateur" de Stella.

3.8 Pour aller plus loin : trajectoire d'un rayon lumineux dans un milieu d'indice variable

Dans les exemples précédents, l'intégration s'est faite sur la variable temps. Mais il est possible d'utiliser l'intégration sur une autre variable. On peut ainsi étudier la trajectoire d'un rayon lumineux dans un milieu stratifié (repère Oxz) dont l'indice ne dépend que de z. En effet, l'équation de propagation $\frac{d}{ds}(\mathbf{n}\mathbf{u}) = \mathbf{grad}(n)$ conduit alors (cas d'un rayon initial dans le

plan xOz) à l'équation différentielle²¹ donnant la trajectoire : $\frac{d^2z}{dx^2} = \frac{n}{C^2} \frac{\partial n}{\partial z}$

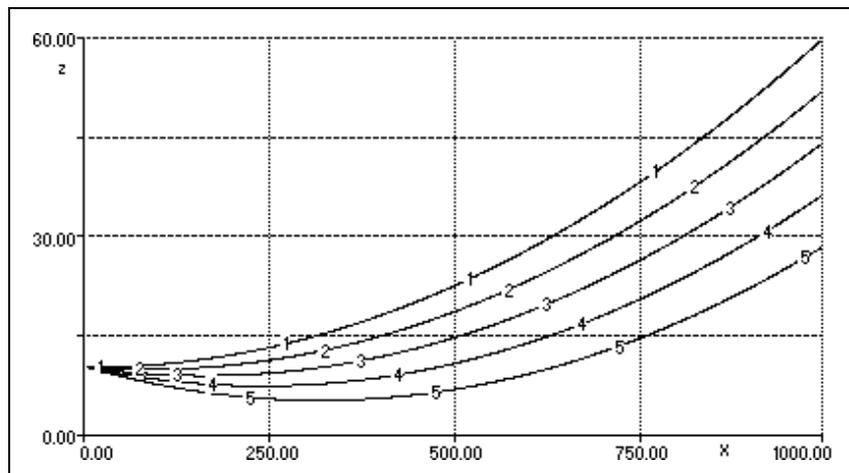
Le logiciel permet donc de simuler la propagation en connaissant la fonction $n(z)$ ainsi que sa dérivée, avec $C = n_0 \sin i_0$ comme condition initiale. Pour le mirage, n est pris de la forme $n = a + b \cdot z$, a et b étant deux constantes. Nous donnons ci-dessous le graphe du modèle (ainsi que les équations générées par Stella où l'on retrouve les relations constitutives).



$z(t) = z(t - dt) + (z') * dt$
 INIT $z = z0$
 INFLOWS:
 $z' = zz'$
 $zz'(t) = zz'(t - dt) + (z'') * dt$
 INIT $zz' = zz'0$
 INFLOWS:
 $z'' = indice * b / c^2$
 $a = 1.01$
 $b = 1e-4$
 $c = n0 * \sin(i0)$
 $i0 = 3.1416/2$
 $indice = a + b * z$
 $n0 = a + b * z0$
 $z0 = 10$
 $zz'0 = \tan(\pi/2 - i0)$

On obtient les résultats suivants pour i_0 entre :

- $\pi/2$ (1) et
- $\pi/2 + \pi/100$ (5),
- par pas constant.



²¹ Voir PEREZ, Optique géométrique et ondulatoire, Masson.

4. Conclusion

Les exemples d'utilisation pédagogique et didactique de ces logiciels sont tirés de travaux de recherche à visée didactique. Il est donc clair que le propos n'était pas d'affirmer la nécessaire mise en place de telle ou telle activité à tel ou tel niveau, ni même de dire que ces deux logiciels sont "incontournables". Un tel objectif d'application pédagogique en classe de lycée serait en effet prématuré²².

Par contre, il nous semble important de réfléchir dès maintenant aux questions que nous posent ces nouveaux outils dont il faut bien faire l'hypothèse qu'ils figureront dans la collection des outils logiciels à la disposition des élèves, étudiants et enseignants : questions sur l'utilisation de tels outils dans la résolution de problèmes et sur la diversification des pratiques pédagogiques ; questions relatives à la mobilisation des concepts par de telles activités ; et question en retour sur les hypothèses correspondantes au niveau des activités expérimentales et manipulatoires.

²² Il n'en est pas de même au niveau d'une autoformation d'étudiants ; mais ceci dépasse notre présent propos.

5. Bibliographie

- BAHIER D., COUCHOURON M., GAL P.-Y., GORZA M.-P., TEXIER A., BARDIN C., Une exploration des difficultés des étudiants en cinématique et mécanique du point matériel, BUP n°738, 1991, 1399-1417.
- BEAUFILS D., La simulation numérique comme élément d'une démarche expérimentale, *L'intégration de l'informatique dans l'enseignement et la formation des enseignants*, Paris : INRP-EPI, 1992, 100-103.
- CHOMAT A., LARCHER C., MEHEUT M., Modèles particuliers et démarches de modélisation, *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*, INRP, 1992, 119-170.
- DUREY A., L'informatique dans l'enseignement des sciences physiques, *Didactique appliquée de la physique-chimie*, NATHAN 1996, 195-222.
- EMINYAN M., RUBIN K., *Introduction à la simulation des systèmes physique (un manuel interactif pour comprendre la physique par l'informatique)*, InterEditions, 1994, 258p.
- GIORDAN A., MARTINAND J.L., (Eds), Modèles et simulation, actes des 9^e journées sur l'éducation scientifique, Chamonix, 1987.
- INRP, *Impact de l'introduction de l'informatique sur les disciplines scientifiques dans l'enseignement secondaire en France*, INRP, Informatique et enseignement, 1983, 143p.
- JEROME P., L'informatique support logique de la démarche expérimentale en sciences naturelles, *Dossier APBG*, 1979.
- LARCHER C., La physique et la chimie, sciences de modèles, *Didactique appliquée de la physique-chimie*, NATHAN 1996, 160-178.
- LASCOURS J., CALMETTES B., Difficultés d'étudiants à propos des circuits en courant alternatif, BUP n°800, 1998, 41-61
- MEHEUT M., Enseignement de modèles particuliers et modélisation de systèmes gazeux, *sixièmes journées informatique et pédagogie des sciences physiques*, 1994, 129-134
- MENIGAUX J., Raisonnements des lycéens et des étudiants en mécanique du solide, BUP n°738, 1991, 1419-1429.
- SALTIEL E., Concepts cinématiques et raisonnements naturels, thèse de doctorat d'état diffusée par l'IREM de Paris Sud, 1978.
- VIENNOT L., Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire, éd Hermann, 1979.

Interactive Physique distribué par PHYLAB rue Bobillot 75013 Paris

Les exemples présentés ici sont issus du travail de mise au point de la version française du logiciel américain Interactiv Physics²³. La version anglaise ayant été présentée dans le cadre de la politique des "licences mixtes", la version française, "Interactive Physique", a bénéficié d'un soutien du ministère de l'éducation nationale, et à ce titre deux exemplaires ont été envoyés dans chaque académie au conseiller pour les technologies de l'information et de la communication auprès du recteur afin de la faire connaître.

Stella II, pour Windows : commercialisé par K.B.S, 287 rue Saint-Jacques, 75005 Paris.

²³ Traduction R. Bouroulet ; (sous la responsabilité d'A. Durey).

logiciel en version anglaise uniquement, pour Windows 3.1 et sup. pour PC 486 (ou sup.) et 4 Mo de RAM (min) ; Des études, exemples, exercices, etc., peuvent être trouvées sous forme des "lettres" publiées sur le site Internet du CIP de Genève : <http://www.ge-dip.etat-ge.ch/cip>. Sinon, les publications sont essentiellement en langue anglaise, par exemple :
Schecker H., Learning physics by making models, *Physics Education*, 1993, 102-106.(revue équivalente du Bulletin de l'Union des Physiciens) ;
Niedderer H. et al., The role of computer-aided modelling in learning physics, *Journal of Computer assisted learning*, 1991, n°7, 84-95.