

SiCP2

Documentation et théorie

Auteur :
Stephan RUNIGO

27 septembre 2020

Résumé

Objet : Ce document accompagne le programme SiCP2.

Contenu : Il contient un manuel d'installation et d'utilisation ainsi qu'un certain nombre de développements théoriques.

Public concerné : Les enseignants, les étudiants et les passionnés de physique et d'informatique.

SiCP2 est un simulateur numérique d'équations physiques offrant une représentation graphique et une interaction dynamique avec les paramètres physiques. Destinés à un usage ludique et pédagogique, il permet de visualiser le comportement des systèmes physiques simulés. Cette documentation accompagne ce programme.

Les deux premiers chapitres présentent SiCP2, présente les procédures d'installation et précisent les commandes permettant l'interaction avec le programme.

Les deux chapitres suivants fournissent un certain nombre de développements théoriques liés aux phénomènes physiques et à la numérisation des équations.

Enfin, le dernier chapitre rassemble les informations liées à la structure du code source.

Table des matières

1	Présentation, installation	1
1.1	SiCP2, chaîne de pendules couplés	1
1.2	Installation de SiCP2	1
1.2.1	Exécutables pour Windows	1
1.2.1.1	Version portable	1
1.2.1.2	Installation automatique	2
1.2.2	Compilation du code source	2
2	Utilisation des simulateurs	4
2.1	Commandes communes avec SiCF	4
2.1.1	Options de la ligne de commande	4
2.1.1.1	Résumé des options	4
2.1.2	Commades du clavier	4
2.1.2.1	Variations des paramètres	4
2.1.2.2	Enregistrement et réinitialisation des situations	4
2.2	SiCP2	5
2.2.1	Panneau de droite	5
2.2.2	Panneau du bas	5
2.2.3	Panneau central	6
3	Modèle physique	7
3.1	La chaîne de pendule	7
3.1.1	Le pendule pesant	7
3.1.2	Les pendules couplés	7
3.1.3	La chaîne de pendule	7
3.1.4	L'équation de la chaîne de pendule	8
3.1.5	Expressions des forces et des énergies associées	8
3.1.6	Résumé des forces et des énergies	9
3.2	L'équation de Sine-Gordon	9
3.2.1	L'équation de Sine-Gordon	9
3.2.2	Les solitons, solutions de l'équation de Sine-Gordon	10
3.2.3	Phénomènes physiques associés aux solitons	10
4	Mathématique et numérique	11
4.1	Discrétisation des équations différentielles	11
4.1.1	Discrétisation des dérivées	11
4.1.1.1	Dérivé symétrisée	11
4.1.2	Discrétisation de la relation fondamentale de la dynamique	11
4.1.3	Variables réduites	12
4.1.4	Résumé des forces et des énergies	13
4.2	Perspective et repère SiCP	13
4.2.1	Coordonnées polaires	13
4.2.2	Mathématique	13

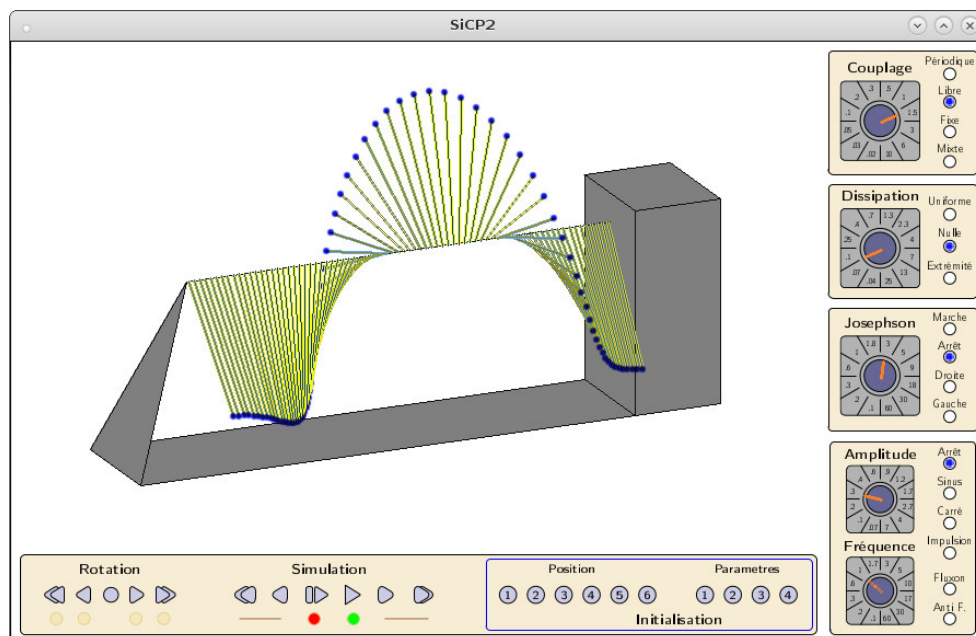
4.2.3	Classes	14
4.2.4	Projection	14
5	Développement	15
5.1	Langage et librairies	15
5.1.1	C et SDL2	15
5.2	Modèle Vue Controleur	15
5.2.1	Les répertoires du code source	15
5.2.2	Le modèle	15
5.2.3	La vue	15
5.2.4	Le controleur	15
5.3	Diagrammes	16
5.3.1	Inclusion des fichiers dans SiCP2	16
5.3.2	diagramme de classes de SiCP2	16
A	Première version des simulateurs	17
A.1	Historique	17
B	Commandes du clavier	18
B.1	Résumé du clavier SiCF et SiCP	18
B.2	Détails des contrôles	19
B.2.1	Équation simulée	19
B.2.2	Paramètres des pendules	19
B.2.3	Forme de la dissipation	19
B.2.4	Conditions aux limites	20
B.2.5	Moteur premier pendule	20
B.2.6	Moteur Josephson	20
B.2.7	Contrôle de la simulation	20
B.2.8	Information	20
B.2.9	Sauvegarde et ré-initialisation dans SiCF	20
B.2.9.1	Fonction élémentaire	21
B.2.9.2	Quanton	21
B.2.9.3	Fichiers de ré-initialisation	21
C	Commandes du clavier	22
C.1	SiCF et SiCP	22
C.1.1	Résumé des options	22

Chapitre 1

Présentation, installation

1.1 SiCP2, chaîne de pendules couplés

SiCP2 est un simulateur de chaîne de pendule. Un moteur sinusoïdale, carré, ou impulsionnel permet de créer une excitation de l'extrémité de la chaîne. Les conditions aux limites peuvent être périodiques, libres ou fixes. La dissipation peut être uniforme ou simuler une extrémité absorbante.



Le programme simule l'équation de sine-gordon. Le contrôle du courant josephson permet d'observer la dynamique des solitons.

1.2 Installation de SiCP2

1.2.1 Exécutables pour Windows

1.2.1.1 Version portable

Télécharger la version portable sur le site <https://cphysique.github.io/>

Vérifier le fichier

Ouvrir une invite de commande (cmd)

Se déplacer dans le dossier de téléchargement (`cd Downloads`)

Calculer la somme de contrôle (`certutil -hashfile SiCP2.4.4.zip SHA256`)

Vérifier la correspondance de la somme calculée avec la somme donnée sur le site.

Décompresser le fichier (par exemple avec 7-zip <https://www.7-zip.org/>)

Le répertoire obtenu contient le fichier exécutable et les fichiers nécessaires à l'exécution.

Il est alors possible de déplacer ce répertoire, de créer un lien vers l'exécutable et de changer l'icône du lien en utilisant l'image SiCP2.ico.

1.2.1.2 Installation automatique

Télécharger l'installateur sur le site <https://cphysique.github.io/>

Vérifier le fichier

Ouvrir une invite de commande (cmd)

Se déplacer dans le dossier de téléchargement (cd Downloads)

Calculer la somme de contrôle (certutil -hashfile setupSiCP2.4.3.exe SHA256)

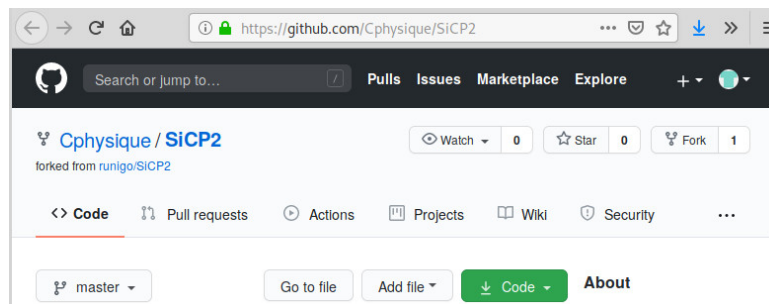
Vérifier la correspondance de la somme calculée avec la somme donnée sur le site.

Exécuter l'installateur, cocher la case **ajouter un lien sur le bureau**

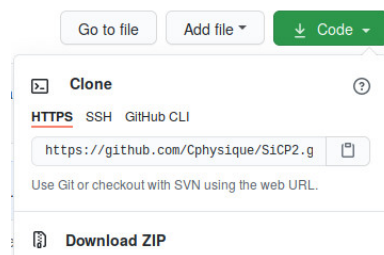
Il est possible de changer l'icône du lien en utilisant l'image SiCP2.ico contenu dans le répertoire d'installation (C/Program Files/SiCP2)

1.2.2 Compilation du code source

Le code source se trouve sur <https://github.com/Cphysique/SiCP2>



Le bouton vert de la page sur <https://github.com/Cphysique/SiCP2/> permet de télécharger le code source.



Cette section traite de l'installation des simulateurs SiTS2, SiCF2 et SiCP2 sur un système d'exploitation de type debian. Le téléchargement se fait avec un navigateur internet, la compilation et l'exécution se font dans un terminal. L'installation des outils de compilation nécessite les privilèges du super-utilisateur.

Installation des outils de compilation Avec les droits du super-utilisateur

```
apt-get install gcc make libSDL-dev
```

Pour les versions 2 des simulateurs, installer la librairie SDL2 :

```
apt-get install libsdl2-dev
```

Téléchargement des sources

Télécharger les fichiers `.zip` sur github

`https://github.com/runigo/SiCP2/archive/master.zip`

`https://github.com/runigo/SiCF2/archive/master.zip`

`https://github.com/runigo/SiTS2/archive/master.zip`

Décompresser les fichiers `.zip`

`unzip SiCP2-master.zip`

`unzip SiCF2-master.zip`

`unzip SiTS2-master.zip`

Compilation

La commande **make** dans le répertoire des sources produit un fichier exécutable :

SiCP2 pour SiCP

SiCF2 pour SiCF

SiTS2 pour SiTS

Exécution

En ligne de commande, avec d'éventuelles options

`./SiCP2 [OPTION]`

`./SiCF2 [OPTION]`

`./SiTS2 [OPTION]`

La fenêtre graphique donne une représentation de la simulation,

Le terminal affiche les informations.

Chapitre 2

Utilisation des simulateurs

Ce chapitre traite des interactions entre le programme et l'utilisateur.

2.1 Commandes communes avec SiCF

2.1.1 Options de la ligne de commande

Lorsque le programme est démarré en ligne de commande, il est possible de passer un certain nombre d'options. Ces options sont communiquées au programme à l'aide du nom de l'option suivie d'un nombre. Par exemple pour démarrer SiCP2 avec un nombre de pendules égale à 50 :

```
./SiCP2 nombre 50
```

Pour démarrer SiCP2 en exploitant plusieurs options :

```
./SiCP2 support 0 pause 7 duree 998 dt 0.0027 nombre 777
```

2.1.1.1 Résumé des options

option	valeur	clavier	commande
dt	(dt > 0.0 & dt < DT_MAX)		discrétisation du temps
duree	()	F9, F10, F11, F12	rythme de la simulation
mode	()	Entrée	Mode -1 : Wait, 1 : Poll
nombre	(nombre > 0 & nombre < 1099)		Nombre de pendules
aide	()		Affiche l'aide
help	()		Affiche l'aide

** Initialise le déphasage entre le dernier pendule et le premier pendule dans le cas des conditions aux limites périodique.*

2.1.2 Commandes du clavier

2.1.2.1 Variations des paramètres

2.1.2.2 Enregistrement et réinitialisation des situations

Lorsque la touche **Maj** est enfoncée, l'appui sur une touche alphabétique ré-initialise le système dans la configuration correspondant à la touche.

Lorsque les touches **Ctrl** et **Maj** sont enfoncées, l'appui sur une touche alphabétique enregistre la configuration présente du système à la place de la configuration correspondant à la touche. La nouvelle configuration enregistrée peut alors ré-initialiser le système grâce à la touche **Maj**

Lorsque la touche **Ctrl** est enfoncée, l'appui sur une touche alphabétique ré-initialise le système dans la configuration d'origine de SiCP2 correspondant à la touche.

2.2 SiCP2

SiCP2 possède une interface graphique permettant de modifier les paramètres à l'aide de la souris.

2.2.1 Panneau de droite

Ce panneau possède cinq boutons rotatifs et 17 boutons "radio". La rotation s'effectue en plaçant le pointeur de la souris sur l'un des boutons rotatif et en actionnant la molette. La sélection d'un bouton radio s'effectue en cliquant sur celui-ci.

Couplage : change le couplage élastique entre les pendules

Périodique : couple le premier pendule au dernier

Libre : libère le premier et le dernier pendule

Fixe : fixe le premier et le dernier pendule

Mixte : fixe le premier et libère le dernier pendule

Dissipation : change le frottement visqueux sur les pendules

Uniforme : installe un frottement visqueux uniforme

Nulle : annule le frottement visqueux

Extrémité : installe un frottement visqueux croissant sur les derniers pendules (1/6 de la chaîne)

Josephson : change l'amplitude du courant josephson

Marche : démarre le courant josephson

Arrêt : arrête le courant josephson

Droite / Gauche : change le sens du courant josephson

Amplitude : change l'amplitude du moteur périodique

Fréquence : change la fréquence du moteur périodique

Arrêt : arrête le moteur périodique

Sinus : démarre le moteur sinusoïdale

Carré : démarre le moteur carré

Impulsion : démarre le moteur sinusoïdale et l'arrête après une période

FLuxon : ajoute un déphasage de 2π au premier pendule. Le fluxon n'apparaît pas si les extrémités sont libres.

Anti. F : retranche un déphasage de 2π au premier pendule

2.2.2 Panneau du bas

La sélection d'un bouton radio s'effectue en cliquant sur celui-ci.

Rotation : démarre la rotation du point de vue

rotation vers la droite

arrête la rotation

rotation vers la gauche

Simulation : contrôle la rapidité de la simulation

ralentit la simulation

arrête / démarre la simulation

temps réel

accélère la simulation

Initialisation : Réinitialise le système

réinitialisation de la position des pendules

réinitialisation des paramètres et du nombre de pendules

2.2.3 Panneau central

Le panneau centrale montre la chaîne de pendule. Le point de vue se déplace en maintenant le clic de la souris et en déplaçant celle-ci. La molette permet de changer la distance du point de vue.

Chapitre 3

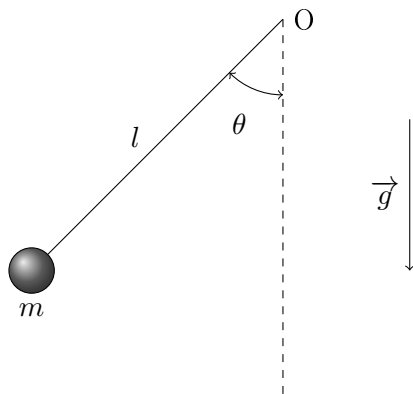
Modèle physique

Ce chapitre traite du modèle physique de la chaîne de pendules.

3.1 La chaîne de pendule

Sujet polytechnique [?] [?]

3.1.1 Le pendule pesant



Un pendule pesant est constitué par une masse m suspendue à un fil rigide de longueur l relié à un point O . Une liaison en ce point permet au pendule de tourner autour d'un axe fixe. L'angle entre le fil et la verticale est noté θ . La masse est soumise à son poids $\vec{P} = m\vec{g}$, à la réaction du fil \vec{R} et à une force de frottement visqueux $\vec{f} = -\frac{\beta}{l}\vec{v}$. La relation fondamentale de la dynamique donne :

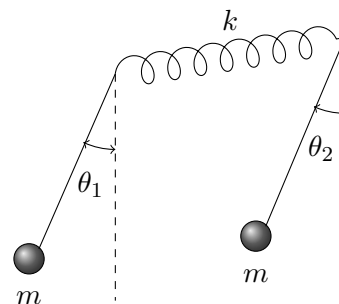
$$ml \frac{d^2\theta}{dt^2} = -mg \sin \theta - \beta \frac{d\theta}{dt}$$

3.1.2 Les pendules couplés

Deux pendules pesants sont reliés par un fil de torsion suivant leur axe fixe commun. La relation fondamentale de la dynamique donne alors :

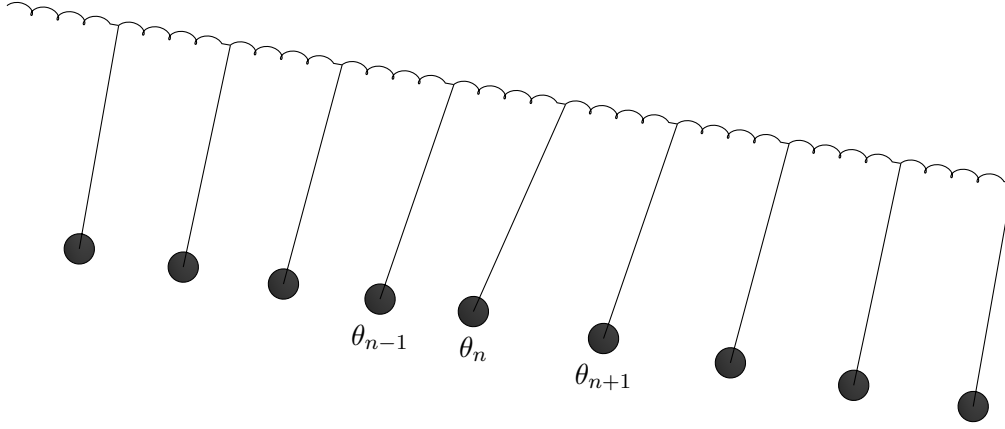
$$\begin{cases} ml \frac{d^2\theta_1}{dt^2} = -mg \sin \theta_1 - \beta \frac{d\theta_1}{dt} - kl(\theta_1 - \theta_2) \\ ml \frac{d^2\theta_2}{dt^2} = -mg \sin \theta_2 - \beta \frac{d\theta_2}{dt} - kl(\theta_2 - \theta_1) \end{cases}$$

dans le cas où les pendules sont identiques.



3.1.3 La chaîne de pendule

Une chaîne de pendule est constituée d'une série de pendules pesants. Chaque pendule étant couplé avec ses deux plus proches voisins à l'aide d'un fil de torsion.



3.1.4 L'équation de la chaîne de pendule

La chaîne de pendule est constituée d'une série de pendules pesants. Chaque pendule étant couplé avec ses deux plus proches voisins à l'aide d'un fil de torsion.[?]

$$\frac{d^2\theta_n}{dt^2} - c^2 \frac{\theta_{n+1} + \theta_{n-1} - 2\theta_n}{a^2} + \omega_0^2 \sin \theta_n = 0$$

$$\begin{array}{llll} \frac{k}{m} & \frac{\text{vitesse}^2}{\text{longueur}^2} & \text{T}^{-2} & \frac{k}{m} = \frac{c^2}{a^2} \\ \frac{g}{l} & \text{pulsation}^2 & \text{T}^{-2} & \frac{g}{l} = \omega_0^2 \end{array}$$

La relation fondamentale de la dynamique, donne, en prenant en compte les frottements visqueux :

$$ml \frac{d^2\theta_n}{dt^2} = -mg \sin \theta_n - kl\Delta\theta_n(t) - \beta \frac{d\theta_n}{dt}$$

soit

$$\frac{d^2\theta_n}{dt^2} = -\frac{g}{l} \sin \theta_n - \frac{k}{m} \Delta\theta_n(t) - \frac{\beta}{ml} \frac{d\theta_n}{dt}$$

avec

<i>abréviation</i>	<i>grandeur</i>	<i>dimension</i>
θ_n	angle	radian
m	masse	M
g	pesanteur	LT ⁻²
k	raideur	MT ⁻²
l	longueur	L
β	frottement	ML ² T ⁻¹

3.1.5 Expressions des forces et des énergies associées

La force de rappel, s'exerçant sur la masse m, dû au fil de torsion ($C = kl^2$) entre les pendules est :

$$f_{torsion} = -kl\Delta\theta_n = -kl (2\theta_n - \theta_{n-1} - \theta_{n+1})$$

L'énergie potentielle entre les pendules n et n-1 est :

$$E_{couplage} = \frac{1}{2} kl^2(\theta_n - \theta_{n-1})^2$$

La force de rappel dû à la gravitation est :

$$f_{gravitation} = -mg \sin \theta_n$$

L'énergie potentielle de pesanteur de la masse m est :

$$E_{pp} = mgl(1 - \cos \theta_n)$$

La linéarisation de cette dernière force donne lieu à une force de rappel harmonique :

$$f_{ressort} = -mg\theta_n$$

L'énergie potentielle correspondante est alors :

$$E_{pp} = \frac{1}{2} mgl\theta_n^2$$

Enfin, l'énergie cinétique découle du travail de

$$ml \frac{d^2\theta_n}{dt^2}$$

Et vaut

$$E_c = \frac{1}{2} ml \left(\frac{d\theta_n}{dt} \right)^2$$

La force de frottement visqueux est :

$$f_{frottement} = -\beta \frac{\theta_n(t) - \theta_n(t - dt)}{dt}$$

La présence de cette force implique une dissipation de l'énergie. En l'absence de cette force, on doit observer une conservation de l'énergie totale.

À ces forces il faut ajouter le courant josephson, correspondant à une constante additive dans la relation fondamentale de la dynamique ainsi que la force s'exerçant sur le premier pendule lors de l'excitation de la chaîne.

3.1.6 Résumé des forces et des énergies

	force	énergie
torsion	- k l $\Delta\theta_n$	$\frac{1}{2} k l^2 (\theta_n - \theta_{n-1})^2$
gravitation	- m g $\sin \theta_n$	m g l (1 - $\cos \theta_n$)
harmonique	- m g θ_n	$\frac{1}{2} m g l \theta_n^2$
inertie	m l $\frac{d^2\theta_n}{dt^2}$	$\frac{1}{2} m l^2 \left(\frac{d\theta_n}{dt} \right)^2$
courant	josephson	

3.2 L'équation de Sine-Gordon

Cette section traite de l'équation de sine-gordon et de ses solutions

3.2.1 L'équation de Sine-Gordon

C'est une équation différentielle du second ordre, non linéaire, à deux variables [?].

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \omega_0^2 \sin \theta = 0$$

3.2.2 Les solitons, solutions de l'équation de Sine-Gordon

Une solution de l'équation de Sine-Gordon, appelée soliton, est

$$\theta(x, t) = 4 \arctan \exp(\omega t - kx)$$

Elle correspond à une variation de 2π de la valeur de θ sur une distance de l'ordre de k^{-1} . Le soliton se déplace à la vitesse v .

3.2.3 Phénomènes physiques associés aux solitons

La **jonction josephson**. Constitué par une jonction isolante entre deux supraconducteur.

Chapitre 4

Mathématique et numérique

Ce chapitre traite des modèles mathématiques et numériques liés à SiCP2.

4.1 Discrétisation des équations différentielles

La discrétisation de l'équation du mouvement se fait à l'aide de l'algorithme de Verlet. Cet algorithme consiste à symétriser la dérivée par rapport au temps puis d'obtenir une expression de $x(t + dt)$ en fonction de $x(t)$ et $x(t - dt)$. Cette expression permet de simuler de proche en proche le comportement du système physique. La solution discrète se rapproche de la solution analytique si la valeur de dt est convenablement choisie. En dehors d'un certain encadrement de dt , la solution discrète s'éloigne de la solution analytique.

4.1.1 Discrétisation des dérivées

4.1.1.1 Dérivée symétrisée

Par définition, la dérivée symétrique est :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{x(t + dt) - x(t - dt)}{2 dt}$$

On en déduit l'expression suivante de la dérivée seconde :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{x(t + 2 dt) - x(t) - x(t) + x(t - 2 dt)}{4 dt^2}$$

Le changement de variable $dt' = 2 dt$ simplifie cette expression :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{x(t + dt) - 2x(t) + x(t - dt)}{dt^2}$$

Une expression disymétrique de la vitesse peut être utilisée pour l'évaluation des forces de viscosité ainsi que pour le calcul de l'énergie cinétique avant le calcul de la nouvelle valeur de $x(t + dt)$.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{x(t + dt) - x(t)}{dt}$$

Après l'incrément, $\frac{dx}{dt} = \frac{x(t) - x(t - dt)}{dt}$

4.1.2 Discrétisation de la relation fondamentale de la dynamique

L'équation de la chaîne de pendules couplés (3.1.4) donne ici :

$$\frac{x(t + dt) - 2x(t) + x(t - dt)}{dt^2} = -\frac{g}{l} \sin x(t) - \frac{k}{m} \Delta x(t) - \frac{\beta}{ml} \frac{x(t) - x(t - dt)}{dt}$$

soit

$$x(t + dt) - 2x(t) + x(t - dt) = -\frac{g dt^2}{l} \sin x(t) - \frac{k dt^2}{m} \Delta x(t) - \frac{\beta dt}{ml} (x(t) - x(t - dt))$$

ou

$$x(t + dt) = 2x(t) - x(t - dt) - dt^2 \frac{g}{l} \sin x(t) - dt^2 \frac{k}{m} \Delta x(t) - dt \frac{\beta}{ml} (x(t) - x(t - dt))$$

avec

$$\Delta x(t) = (2x[i] - x[i - 1] - x[i + 1])$$

La force de rappel dû au fil de torsion entre les pendules est :

$$f_{torsion} = -kl\Delta x(t) = -kl(2x[i] - x[i - 1] - x[i + 1])$$

L'énergie potentielle entre les pendules n et n-1 est :

$$E_{couplage} = \frac{1}{2} kl^2 (x[i] - x[i - 1])^2$$

La force de rappel dû à la gravitation est :

$$f_{gravitation} = -mg \sin x(t)$$

L'énergie potentielle de pesanteur de la masse m est :

$$E_{pp} = mgl(1 - \cos x(t))$$

La linéarisation de cette dernière force aboutit à une force de rappel harmonique :

$$f_{ressort} = -mgx(t)$$

L'énergie potentielle correspondante est alors :

$$E_{pp} = \frac{1}{2} mglx(t)^2$$

Enfin, l'énergie cinétique découle du travail de

$$ml \frac{d^2 x(t)}{dt^2}$$

Et vaut

$$E_c = \frac{1}{2} ml \left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2 = \frac{ml}{2 dt^2} (x(t) - (x(t - dt)))$$

4.1.3 Variables réduites

Les variables réduites sont sans dimensions. Elles prennent en compte la discrétisation du temps. Le signe prend en compte le caractère « de rappel » des forces.

$$\text{alpha} = -\frac{\beta}{ml} dt$$

$$\text{gamma} = -\frac{g}{l} dt^2$$

$$\text{kapa} = -\frac{k}{m} dt^2$$

On a alors

$$\text{force}[i] = \text{gamma}.\sin x + \text{kapa}.\Delta x + \text{alpha}.(x(t) - x(t - dt))$$

et

$$x(t + dt) = 2x(t) - x(t - dt) + \text{force}[i]$$

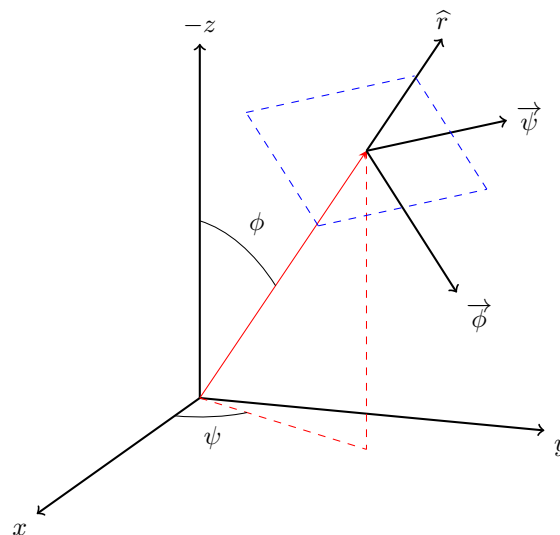
4.1.4 Résumé des forces et des énergies

	force	énergie	Variables réduites	
torsion	$-k \Delta x_n$	$\frac{1}{2} k l^2 (x_n - x_{n-1})^2$	$-k \Delta x_n$	$\frac{1}{2} k l^2 (x_n - x_{n-1})^2$
gravitation	$-m g \sin x_n$	$m g l (1 - \cos x_n)$	$-m g \sin x_n$	$m g l (1 - \cos x_n)$
harmonique	$-m g x_n$	$\frac{1}{2} m g l x_n^2$	$-m g x_n$	$\frac{1}{2} m g l x_n^2$
inertie	$m l \frac{d^2 x_n}{dt^2}$	$\frac{1}{2} m l^2 \left(\frac{dx_n}{dt}\right)^2$	$m l \frac{d^2 x_n}{dt^2}$	$\frac{1}{2} m l^2 \left(\frac{dx_n}{dt}\right)^2$
courant	josephson		josephson	

4.2 Perspective et repère SiCP

Cette section traite de la définition des coordonnées intervenant dans la projection en perspective de SiCP

4.2.1 Coordonnées polaires



$$\vec{r} = \begin{pmatrix} \cos \psi . \sin \phi \\ \sin \psi . \sin \phi \\ \cos \phi \end{pmatrix},$$

$$\vec{\psi} = \text{largeur.} \begin{pmatrix} -\sin \psi \\ \cos \psi \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\vec{\phi} = \text{hauteur.} \begin{pmatrix} -\cos \psi . \cos \phi \\ -\sin \psi . \cos \phi \\ \sin \phi \end{pmatrix}.$$

4.2.2 Mathématique

System : θ_i .

Chaîne : r_i .

Support : \mathbf{R}_i .

Point de vue : \mathbf{M} , \mathbf{i}_M , \mathbf{j}_M , \mathbf{k}_M .

4.2.3 Classes

System : nouveau[N].

Chaine : chaine[N], support[12], largeur, hauteur.

Point de vue : perspective, distance, psi, phi.

4.2.4 Projection

$$\textbf{System-Chaine} : \mathbf{r}_i = \begin{pmatrix} \text{largeur}/2N(i - N/2) \\ \text{hauteur} \cdot \sin \theta_i \\ \text{hauteur} \cdot \cos \theta_i \end{pmatrix}.$$

$$\textbf{Point de vue} : \vec{r} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cdot \sin \phi \\ \sin \psi \cdot \sin \phi \\ \cos \phi \end{pmatrix}, \vec{\psi} = \text{largeur} \cdot \begin{pmatrix} -\sin \psi \\ \cos \psi \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{\phi} = \text{hauteur} \cdot \begin{pmatrix} -\cos \psi \cdot \cos \phi \\ -\sin \psi \cdot \cos \phi \\ \sin \phi \end{pmatrix}.$$

$$\textbf{Chaine-Rendu} : \mathbf{g}_i = \begin{pmatrix} (\mathbf{r}_i - \mathbf{M}) \cdot \mathbf{k}_M + \text{hauteur}/2 \\ (\mathbf{r}_i - \mathbf{M}) \cdot \mathbf{j}_M + \text{largeur}/2 \end{pmatrix}.$$

Chapitre 5

Développement

Ce chapitre traite de la structure et du développement des programmes de simulation.

5.1 Langage et librairies

5.1.1 C et SDL2

SiCP2 écrit en C [?] [?] et utilise la librairie SDL2. L'utilisation de la librairie SDL permet la réalisation de l'interface graphique et dynamique avec l'utilisateur.

5.2 Modèle Vue Contrôleur

5.2.1 Les répertoires du code source

- `donnees` : Inclusion des librairies, constantes et valeurs initiales du système et du graphisme
- `fonctions` : Outils mathématique. Fonctions et projection du système
- `modele` : Système simulé.
- `graphisme` : Représentation graphique et affichage
- `controle` : Liaison entre le système et l'interface graphique
- `objet` : Répertoire pour la compilation

5.2.2 Le modèle

Le système est un ensemble de pendules couplés

5.2.3 La vue

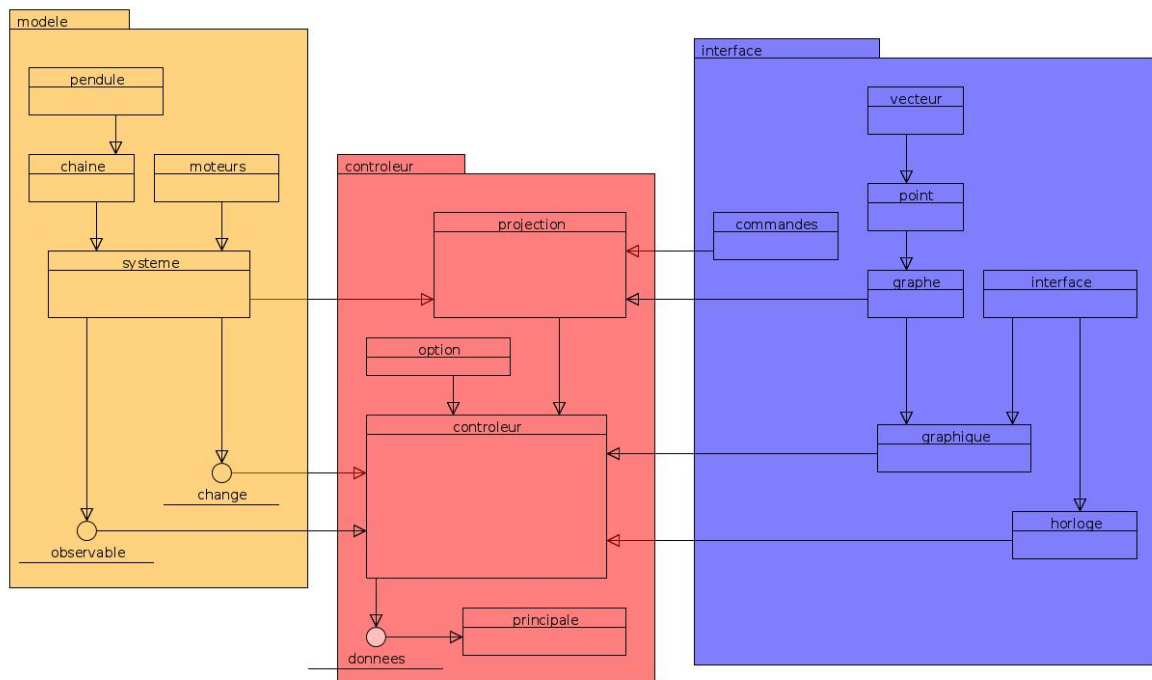
Construit une représentation graphique du système et affiche celle-ci.

5.2.4 Le contrôleur

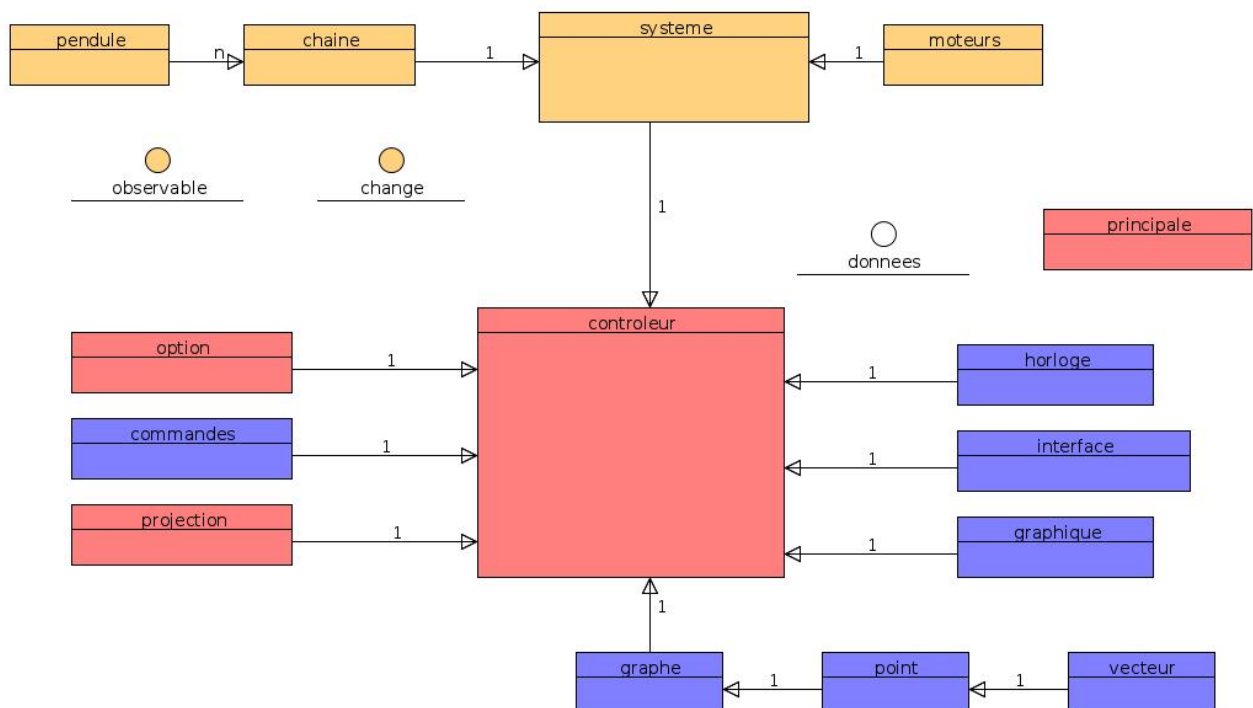
Exécute alternativement la vue et le modèle. Exécute les actions du clavier.

5.3 Diagrammes

5.3.1 Inclusion des fichiers dans SiCP2



5.3.2 diagramme de classes de SiCP2



Annexe A

Première version des simulateurs

A.1 Historique

La première version des simulateurs utilisait la librairie SDL 1.2. Cette librairie a évolué vers la version SDL2. Les programmes décrits dans cette documentation ont donc évolué vers une version 2 utilisant la nouvelle librairie. Les versions 1.x des simulateurs sont donc vouées à ne plus être maintenues. Aujourd'hui, les versions 2 des simulateurs disposent d'une interface graphique plus conviviale avec une interaction avec la souris. La commande des simulateurs à l'aide du clavier reste fonctionnelle et est décrite dans l'annexe suivante.

Annexe B

Commandes du clavier

B.1 Résumé du clavier SiCF et SiCP

Le clavier permet de modifier les paramètres physiques. La fenêtre graphique doit être active, le terminal affiche les informations.

A	Z	E	R	T	Y	U	I	O	P
Couplage	Masse	Dissip.	supprimD	Gravit.	Phi	Ampl.	impuls.	sinus	Fréquence
Q	S	D	F	G	H	J	K	L	M
moinsC	moinsM	plusD	formeD	moinsG	moins Φ	moinsA		carré	moinsF
W	X	C	V	B	N				
périodique	libres	fixe	ExtAbsD	libFix	fixLib				

Paramètres physiques

A	Z	E	R	T
Couplage	Masse	Dissip.	supprimD	Gravit.
Q	S	D	F	G
moinsC	moinsM	plusD	formeD	moinsG
			V	
			ExtAbsD	

Conditions aux limites

				Y	
				Phi	
				H	
				moins Φ	
W	X	C	V	B	N
périodique	libres	fixe		libFix	fixLib

Moteur premier pendule

U	I	O	P
Ampl.	impuls.	sinus	Fréquence
J	K	L	M
moinsA		carré	moinsF

Les touches de fonctions donnent un certain nombre de contrôles et d'information :

Contrôles				Information				Contrôles			
F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
Équation simulé (SiCF)				Énergie, graphe				Vitesse de la simulation			

Le choix de l'équation simulée est spécifique à SiCF. F5 dresse un bilan énergétique. F6 affiche les paramètres physiques du système

F1	F2	F3	F4	F5	F6
Pendules	Harmoniques	Corde	asymétrique	Énergie	Système

F8 permet de modifier le graphisme de SiCP. F9 et F12 modifient rapidement le rythme de la simulation, F10 et F11 la modifie modérément. La touche **Entrée** change le mode avec ou sans attente, en mode avec attente, l'appuie sur une touche permet l'évolution du système.

F8	F9	F10	F11	F12	Entrée
Support (SiCP)	-Sim	-Sim	+Sim	+Sim	mode

B.2 Détails des contrôles

B.2.1 Équation simulée

Il s'agit d'une spécificité de SiCF. Lorsque le mode asymétrique est activé, les touches **z** et **s** ne change la masse de la corde que pour la moitié droite.

- 1 : **gravitation** forceRappel = sinus de la position du pendule
- 2 : **linearisation** forceRappel = proportionnelle à la position du pendule
- 3 : **corde vibrante** forceRappel = 0
- 4 : **corde vibrante asymétrique** permet de changer la masse sur une demi-corde.

B.2.2 Paramètres des pendules

- Couplage** : a, q : Augmente, diminue le couplage entre les pendules.
- Masse** : z, s : Augmente, diminue la masse des pendules.
- Dissipation** : e, d : Augmente, diminue les frottements visqueux.
- Gravitation** : t, g : Augmente, diminue l'accélération de la gravitation.

B.2.3 Forme de la dissipation

La touche **V** supprime les frottements sauf pour les derniers pour lesquels les frottements s'accroissent. Ceci permet d'obtenir une extrémité "absorbante", permettant la simulation d'une corde infinie.

- Supprimer** : e : Supprime les frottements visqueux.
- Former** : f : Active les frottements visqueux sur toute la chaîne.
- Absorber** : v : Active les frottements visqueux sur la fin de la chaîne, crée une extrémité absorbante.

B.2.4 Conditions aux limites

Périodique : w : Le dernier pendule est couplé au premier.

Libres : x : Les deux extrémités sont libres.

Fixes : c : Les deux extrémités sont fixes.

libre-fixe : b : Le premier pendule est libre et le dernier pendule est fixe.

fixe-libre : n : Le premier pendule est fixe et le dernier pendule est libre.

B.2.5 Moteur premier pendule

Impulsion : i : Crée une impulsion.

Sinus : o : Active, désactive le moteur sinusoïdale.

Sinus : l : Active le moteur carré.

Amplitude : u, j : Augmente, diminue l'amplitude du moteur.

Fréquence : p, m : Augmente, diminue la fréquence du moteur.

B.2.6 Moteur Josephson

Activation : → : Crée, supprime un courant josephson.

Amplitude : ↑, ↓ : Augmente, diminue le courant.

Sens : ← : Inverse le sens du courant josephson.

B.2.7 Contrôle de la simulation

F9 et F12 modifient rapidement la vitesse de la simulation, F10 et F11 la modifient modérément. La touche Entrée change le mode avec ou sans attente, en mode avec attente, l'appuie sur une touche permet l'évolution du système.

Mode : Entrée : Change le mode de la simulation : évolution automatique ou pas à pas.

Accélérer : 11 et F12 : Accélère la simulation.

Ralentir : F9 et F10 : Ralentit la simulation.

B.2.8 Information

Énergie : F5 : Information énergétique de la chaîne.

Système : F6 : Affiche les paramètres physiques du système.

B.2.9 Sauvegarde et ré-initialisation dans SiCF

Cette fonctionnalité nécessite la présence du répertoire donnee/enregistrement dans le répertoire de l'exécutable. La touche majuscule permet d'accéder aux fonctions d'enregistrement et de ré-initialisation des positions des pendules.

Lorsque la touche majuscule est enfoncé, les touches A, Z, E, R, T, Y, U, I, O et P, ainsi que les touches J, K, L et M ré-initialisent la position de la corde dans différentes configurations pré-réglées.

Les touches W, X, C, V, B et N enregistrent la position de la corde dans l'état actuel, les touches Q, S, D, F, G et H ré-initialisent la position de la corde dans ces états enregistrés.

B.2.9.1 Fonction élémentaire

Touche	fonction
A	nulle
Z	impulsion
E	triangle
R	triangle
T	carré
Y	carré

B.2.9.2 Quanton

Touche	fonction
U, J	impulsion
I, K	impulsion
O, L	quanton
P, M	quanton

B.2.9.3 Fichiers de ré-initialisation

Les fichiers de ré-initialisation se trouvent dans le répertoire `donnee/enregistrement`. Ils peuvent être édités. Le nom de ces fichiers doit être respecté afin de pouvoir être ouvert par le programme (ces noms sont utilisés par `donnees/fichier.c`).

Annexe C

Commandes du clavier

C.1 SiCF et SiCP

Lorsque le programme est démarré en ligne de commande, il est possible de passer un certain nombre d'options. Ces options sont communiquées au programme à l'aide du nom de l'option suivie d'un nombre. Par exemple pour démarrer SiCF avec un fond sombre et une discrétisation du temps égale à 0,00033 seconde :

```
./SiCF fond 17 dt 0.00033
```

Pour démarrer SiCP avec un fond sombre, un nombre de pendules égale à 50 et trois solitons :

```
./SiCP fond 17 soliton 3 nombre 50
```

Pour démarrer SiCP en exploitant plusieurs options :

```
./SiCP fond 45 support 0 pause 7 duree 998 dt 0.0027 nombre 777 soliton 18
```

C.1.1 Résumé des options

option	valeur	clavier	commande
fond	(fond>0 & fond<255)		Couleur du fond ***
soliton	(soliton > -99 & soliton < 99)	y,h	déphasage entre les extrémités *
dt	(dt > 0.0 & dt < DT_MAX)		discrétisation du temps
frequence	()	p, m	fréquence du générateur
dissipation	()	e, d	dissipation
equation	(equation > 0 & equation < 5)	F1, F2, F3, F4	choix de l'équation
pause	(pause > 5 pause < 555)		temps de pause en ms
duree	()	F9, F10, F11, F12	rythme de la simulation
mode	()	Entrée	Mode -1 : Wait, 1 : Poll
nombre	(nombre > 0 & nombre < 1099)		Nombre de pendules **
aide	()		Affiche l'aide
help	()		Affiche l'aide

* Initialise le déphasage entre le dernier pendule et le premier pendule dans le cas des conditions aux limites périodique.

** Spécifique à SiCP, nombre < 399 dans SiCP2.

*** Désactivé dans les versions 2.