

**Université de Montréal**

**Diffusion de modules compilés pour le langage  
distribué Termite Scheme**

par

**Frédéric Hamel**

Département d'informatique et recherche opérationnelle

Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de

Maître ès sciences (M.Sc.)

en Informatique

January 16, 2020

# Université de Montréal

Faculté des études supérieures et postdoctorales

Ce mémoire intitulé

## **Diffusion de modules compilés pour le langage distribué Termite Scheme**

présenté par

**Frédéric Hamel**

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

*Michail Famelis*

---

(président-rapporteur)

*Marc Feeley*

---

(directeur de recherche)

*Stafan Monnier*

---

(membre du jury)

## Résumé

---

Ce mémoire décrit et évalue un système de module qui améliore la migration de code dans le langage de programmation distribuée Scheme. Ce système de module a la possibilité d'être utilisé dans les applications qu'elle soit distribués ou pas. Il a pour but de faciliter la conception des programmes dans une structure modulaire et faciliter la migration de code entre les nœuds d'un système distribué. Le système de module est conçu pour Gambit, un compilateur et interprète du langage Scheme.

Notre approche permet d'identifier les modules de façon unique dans un contexte distribué. La facilité d'utilisation et la portabilité ont été des facteurs importants dans la conception du système de module.

Le mémoire décrit la structure des modules, leur implémentation dans Gambit et leur application. Les qualités du système de module sont démontrées par des exemples.

**Mots clés:** Langage de programmation fonctionnel, Scheme, Erlang, Système de module, Système distribué, Agent mobile.

# Summary

---

This thesis presents a module system for Gambit Scheme that supports distributed computing. This module system facilitates application modularity and ease code migration between the nodes of a distributed system. The Termite Scheme language is used to implement the distributed applications.

Our approach uses a naming model for the modules that uniquely identifies in a distributed context. Both ease of use and portability were important factors in the design of system module.

The thesis will describe the module structure and how it was implemented into Gambit. The features of this system are shown through application examples.

**Keywords:** Functional programming, Scheme, Erlang, Module System, Distributed System, Mobile Agent.

# Table des matières

---

<b>Résumé .....</b>	<b>3</b>
<b>Summary .....</b>	<b>4</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>9</b>
<b>Liste des sigles et des abréviations .....</b>	<b>14</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>15</b>
<b>Chapitre 1. Modularisation des systèmes distribués .....</b>	<b>16</b>
1.1. Déploiement .....	16
1.2. Systèmes distribués .....	17
1.3. Modules versionnés .....	18
1.4. Code mobile .....	19
1.5. Survol du mémoire .....	20
<b>Chapitre 2. Bibliothèques Scheme .....</b>	<b>21</b>
2.1. Scheme et sa syntaxe .....	21
2.2. Procédures et macros .....	23
2.3. Structure des bibliothèques .....	25
2.4. Conclusion .....	28
<b>Chapitre 3. Coexistence de bibliothèques dynamiques .....</b>	<b>30</b>
3.1. Format des modules .....	30

3.2.	Édition de liens dynamique .....	31
3.2.1.	Coexistence entre les bibliothèques .....	35
3.3.	Conditions de coexistence .....	35
3.3.1.	Bibliothèque C .....	37
3.3.2.	Bibliothèque Scheme avec FFI .....	42
3.3.3.	Bibliothèque JavaScript (NodeJS) .....	44
3.3.4.	Variables globales communes .....	45
3.4.	Conclusion .....	47
<b>Chapitre 4.</b>	<b>Implémentation des modules .....</b>	<b>49</b>
4.1.	La forme <code>##namespace</code> .....	50
4.2.	La forme <code>##demand-module</code> et <code>##supply-module</code> .....	51
4.2.1.	Les méta informations .....	52
4.3.	Implémentation des modules primitifs .....	53
4.3.1.	La forme <code>##import</code> .....	54
4.4.	Implémentation des modules R7RS .....	54
4.4.1.	Expansion du <code>import</code> .....	55
4.4.1.1.	Importation d'un module primitif .....	55
4.4.1.2.	Importation d'un module R7RS .....	55
4.4.2.	Expansion du <code>define-library</code> .....	57
4.4.2.1.	Extensions de Gambit .....	57
4.5.	Conclusion .....	59
<b>Chapitre 5.</b>	<b>Modèle de chargement .....</b>	<b>60</b>
5.1.	Chargement des bibliothèques .....	60
5.2.	Modèle statique .....	61
5.3.	Modèle dynamique .....	62

5.3.1. Module compilé dans Gambit .....	64
5.4. Module hébergé .....	64
5.4.1. Installation automatique .....	64
5.5. Conclusion .....	66
<b>Chapitre 6. Gestion des modules .....</b>	<b>67</b>
6.1. Sommaire .....	67
6.2. Organisation des modules .....	68
6.2.1. Installation des packages et des modules .....	69
6.3. Désinstallation .....	71
6.4. Mise à jour .....	71
6.5. Tests unitaires .....	71
6.6. Compilation d'un module .....	72
6.7. Comparaison avec d'autres systèmes .....	72
6.7.1. Organisation de OCaml .....	73
6.7.2. Organisation de Python .....	74
6.7.3. Organisation de NodeJS .....	74
6.7.4. Organisation de Java .....	75
6.7.5. Organisation de Go .....	75
6.8. Conclusion .....	76
<b>Chapitre 7. Migration de code .....</b>	<b>78</b>
7.1. Systèmes distribués .....	78
7.2. Le langage Termite .....	79
7.3. <i>Hook</i> des procédures inconnues .....	80

7.4. Exemple de migration de code .....	81
7.5. Conclusion.....	81
<b>Chapitre 8. Évaluation.....</b>	<b>86</b>
8.1. Description des expériences .....	86
8.2. Spécification des machines .....	87
8.3. Résultats .....	87
8.3.1. Dépendance entre la taille du module et les temps.....	87
8.3.2. Comparaison entre les temps interprétés et compilés.....	89
8.4. Conclusion.....	90
<b>Chapitre 9. Conclusion.....</b>	<b>91</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>93</b>
<b>Annexe A. Information des environnement de test .....</b>	<b>95</b>



## Liste des figures

---

2.1	Programme Scheme qui imprime la factorielle de 100. ....	22
2.2	Implémentation de la macro <code>include</code> qui permet l'inclusion d'un fichier dans un autre fichier avec la forme <code>define-macro</code> . ....	24
2.3	Implémentation de la macro <code>include</code> qui permet l'inclusion d'un fichier dans un autre fichier avec la forme <code>define-syntax</code> . ....	24
2.4	Le fichier <code>fact.scm</code> est un exemple de module R4RS exposant la fonction mathématique <code>fact</code> . Le fichier <code>main.scm</code> est un programme principal qui utilise le module <code>fact.scm</code> . ....	26
2.5	Structure globale d'un module R6RS. ....	27
2.6	Structure globale d'un module R7RS. ....	27
2.7	Comparaison entre la syntaxe des modules R6RS et R7RS ....	29
3.1	Chargement dynamique de la bibliothèque <code>libFoo.so</code> et résolution de la fonction <code>foo</code> sans gestion d'erreur sous Linux. ....	32
3.2	Code d'importation de la fonction <code>foo</code> de la bibliothèque <code>libFoo.so</code> en Ruby ....	33
3.3	Un exemple de dépendance de bibliothèques au sein d'une application simple fictive. La bibliothèque <code>libA.so</code> est chargée dans l'application <code>main</code> via les appels aux procédures <code>dlopen</code> et <code>dlsym</code> . Les fonctionnalités utilisées dans l'exemple sont marquées dans des ellipses. ....	33
3.4	Exemple de dépendance dans une application qui cause le masquage de la fonctionnalité <code>foo</code> de la bibliothèque <code>libfoo.so.1.0</code> par la bibliothèque <code>libfoo.so.1.1</code>	34

3.5	Un exemple d'application de conversion entre deux versions d'un format de fichier comme sqlite2 et sqlite3 exploitant la possibilité de charger plusieurs versions d'une bibliothèque. ....	36
3.6	Création d'un exécutable lié aux deux bibliothèques SDL et SDL2 dans cet ordre.	37
3.7	La comparaison entre la structure <b>SDL_Surface</b> de SDL1.2 et SDL2 respectivement. ....	38
3.8	Programme qui utilise la bibliothèque SDL1.2 sans la gestion des évènements Cette application génère une fenêtre rouge qui se ferme après 1 seconde de délais.	40
3.9	Programme qui utilise la bibliothèque SDL2 sans la gestion des évènements. Cette application génère une fenêtre verte qui se ferme aussi après 1 seconde de délais.	41
3.10	Création des bibliothèques <i>rsa.scm</i> pour OpenSSL1.0 et OpenSSL1.1 sans la spécification de <i>libcrypto.so</i> ....	43
3.11	Création des bibliothèques <i>rsa.scm</i> pour OpenSSL1.0 et OpenSSL1.1 avec la spécification de <i>libcrypto.so</i> ....	43
3.12	Schéma des dépendances entre les bibliothèques au sein d'un processus. Les dépendances qui ont été liées dynamiquement durant la création de l'application sont représentées par une flèche avec trait plein sans annotation. Ceux qui représentent les chargements de bibliothèque dynamique via <b>dlopen</b> ont l'annotation <i>dl</i> . La flèche en pointillé indique un masquage des symboles de la bibliothèque source par une ligne pointée. ....	44
3.13	Structure du module JavaScript utilisé comme proxy vers deux version de la bibliothèque <b>express</b> . ....	46
3.14	Le graphe de dépendance des bibliothèques B, C et D avec l'application <b>Programme</b> .	47
3.15	Les résultats de l'expérience avec des bibliothèques natives du système d'exploitation sous Linux. ....	47
4.1	Namespace Global . ....	50
4.2	Namespace Set . ....	50

4.3	Namespace Rename.....	51
4.4	Module Hello .....	51
4.5	Syntaxe des formes <code>demand-module</code> et <code>supply-module</code> .....	52
4.6	Écriture d'un module qui implémente une pile. Ce module est séparé en 2 fichiers. Le fichier <code>angle2/angle2#.scm</code> contient les exportations et <code>angle2/angle2.scm</code> contient l'implémentation des fonctions.....	53
4.7	Expansion de <code>(##import angle2)</code> .....	54
4.8	Expansion du <code>import</code> d'un module primitif .....	55
4.9	L'exemple de l'expansion du <code>import</code> du module <code>R7RS github.com/gambit/hello</code> qui exporte les procédures <code>hi</code> et <code>salut</code> .....	56
4.10	Différents <code>##namespace</code> générés par l'expansion du <code>import</code> d'un module R7RS...	56
4.11	Le code source du module <code>github.com/gambit/hello</code> avant l'expansion.....	57
4.12	Expansion de la forme <code>define-library</code> du module <code>github.com/gambit/hello</code> ..	58
4.13	Exemple d'importation relative du module.....	58
4.14	Implémentation de la bibliothèque système ( <code>scheme case-lambda</code> ).....	59
5.1	Un exemple qui montre la collection des modules à partir du module <code>_zlib</code> suivit de l'initialisation des modules collectés. La collection des modules est effectuée par la procédure <code>##collect-modules</code> . L'ensemble des modules retournés sont initialisés par la procédure <code>##init-modules</code> . Les enregistrements des modules <code>_zlib</code> et <code>_digest</code> ont été ajoutés à la liste des modules enregistrés (variable <code>##registered-modules</code> ).....	63
5.2	Un exemple d'un système fictif composé de différents modules. Le module principal se nomme <code>main.scm</code> avec l'extension <code>.scm</code> et les bibliothèques ont l'extension <code>.sld</code> .....	63
5.3	Un module qui implémente la fonction mathématique <code>fib</code> au niveau principal («top level»).....	64

5.4	Grammaire EBNF représentant un hostname selon un sous-ensemble du RFC-2396. ....	65
5.5	L'exemple montre le résultat d'une réponse négative lors de l'installation du module qui n'est pas dans la <i>whitelist</i> . Il ne se fait pas installer. ....	66
6.1	Grammaire formelle d'un <b>module-ref</b> . ....	68
6.2	Exemple d'installation d'un <i>package</i> hébergé dans le préfixe d'installation par défaut. ....	70
6.3	Exemple d'installation d'un <i>package</i> hébergé dans le préfixe d'installation <code>/tmp/exemple</code> ....	70
6.4	Exemple d'installation d'un <i>package</i> dans le préfixe d'installation <code>/tmp/exemple</code> à partir du répertoire local <code>/local/dir/</code> . ....	70
6.5	Une table qui compare différents systèmes de module sur la capacité d'installer plusieurs versions d'un module. Le système Go permet plusieurs versions d'un module pour des versions incompatibles selon le sémantique de version. La version 1.0.0 coexiste avec la version 2.0.0. La version récente 1.2.0 remplace la vieille version 1.0.1. ....	73
6.6	L'ensemble des répertoires qui est utilisé par Python version 3.7 pour organiser les bibliothèques sur un système de type Linux. ....	74
6.7	Exemple d'importation de la version v3 du module <code>pkg</code> en utilisant le service <i>gopkg.in</i> . ....	76
6.8	Un exemple qui montre l'importation de deux versions d'un même module en Go. Le module <b>go-hello</b> version 2 exporte la fonction <b>Salut</b> qui n'existe pas dans la version 1. ....	76
6.9	Arborescence des fichier dans le <code>gopath</code> . ....	77
7.1	La représentation du résultat de la sérialisation en <code>u8vector</code> de la procédure <code>sqrt</code> . ....	80

7.2	Le code du serveur qui configure la <i>hook</i> qui résout les références à des procédures inconnues. C'est effectué avec la procédure <code>##unknown-procedure-handler-set!</code> . . . . .	82
7.3	Le code de la boucle principale de l'horloge programmable. . . . .	83
7.4	Configuration des nœuds qui est utilisé sur les clients. . . . .	84
7.5	Un programme qui change le fuseau horaire utilisé par l'horloge. . . . .	84
7.6	Un exemple de mise à jour du code du serveur par le message <code>update-code</code> . . . .	85
8.1	Comparaison de la performance RPC de Termite avant les modules dans un contexte interprété sur la machine Gambit. (temps en millisecondes) . . . . .	88
8.2	Comparaison de la performance RPC de Termite avant les modules dans un contexte interprété sur la machine Tictoc. (temps en millisecondes) . . . . .	88
8.3	Temps d'exécution et transmission de module de différente taille entre les machines Gambit et Arctic. Les modules sont installés automatiquement sur Arctic lors de l'exécution. . . . .	88
8.4	Cette expérience est le même que la figure 8.3, sauf que le transfert de module est fait entre une machine ARM (tictoc) et x86 (arctic). . . . .	89
8.5	Temps d'exécution et de transmission de module de différente taille entre Gambit et Arctic suite à la première exécution (modules compilés déjà installés. . . . .	89
8.6	Cette expérience est le même que la figure 8.5, sauf que le transfert de module est fait entre un système ARM (tictoc) et x86 (arctic). . . . .	89
8.7	Ce test est identique à celui de la figure 8.6, mais avec un réseau de $10Mbit/s$ . . .	90
A.1	La spécification de la machine arctic qui est utilisé comme nœud de destination dans l'ensemble des tests. Cette machine, nommé <b>Arctic</b> est refroidit au liquide. . . . .	95
A.2	La spécification du CPU du Raspberry Pi utilisé dans les tests. Cette machine se nomme <b>tictoc</b> . . . . .	96
A.3	La spécification de la machine Gambit utilisé Avec macOS. . . . .	97

## Liste des sigles et des abréviations

---

FFI                      Interface de fonction étrangère (*Foreign Function Interface*)

RPC                     Appel de procédure à distance (*Remote Procedure Call*)

## Remerciements

---

Je voudrais remercier mon directeur Marc Feeley pour l'inspiration, les précieux conseils et le support qu'il m'a fournis.

Merci à ma famille, qui a toujours été là pour moi tant dans les moments faciles et difficiles. Mon père Gérard et ma mère Sylvie mon supporté et encouragé durant mon parcours académique. Mon frère Alex qui m'a aussi encouragé. Merci à ma tante Jocelyne, qui m'a appris le piano et appris la confiance en soi. Merci à mes neveux Thomas et William pour leur présence et amour. J'ai la chance exceptionnelle de les côtoyer et de pouvoir enrichir et m'inspirer d'eux.

Mes amis ont une place importante dans ma vie, ils m'ont aidé à avancer dans la vie. Entre autres, je remercie Aldo Lamarre, Sébastien Richer, Abdel et les gens de l'association d'informatique pour les discussions intéressantes. Merci aux personnes que j'ai pu rencontrer au piano publique, qui mon données l'énergie de continuer.

# Chapitre 1

---

## Modularisation des systèmes distribués

Les programmes modernes ont une structure *modulaire*, c'est-à-dire que leur code se décompose logiquement en différentes parties relativement indépendantes, les *modules*. Cette structure a de nombreux avantages, entre autres sur les plans du développement, la maintenance et le déploiement des programmes. Ce mémoire porte sur la modularité dans le contexte des systèmes distribués où le calcul est réparti sur de multiples ordinateurs reliés en réseau. Ce contexte pose des défis particuliers de déploiement.

### 1.1. Déploiement

Le *déploiement* d'un programme c'est sa mise en service pour qu'il soit utilisable. Ça consiste à installer une forme exécutable du programme sur le(s) ordinateur(s) de sorte à pouvoir l'exécuter. La façon de diffuser les modules, les stocker sur disque, les charger en mémoire, etc. peut prendre plusieurs formes.

Un programme sous forme *monolithique* contient dans son code exécutable toutes les instructions exécutées par l'ordinateur. Cette forme était la norme dans les premiers systèmes informatiques, et l'est toujours pour les systèmes embarqués qui n'ont pas de système d'exploitation indépendant. Lorsqu'un système d'exploitation est disponible sur l'ordinateur on peut le considérer comme étant un module puisqu'il offre des services précis avec une interface standardisée. Dans ce cas, un programme peut prendre la forme d'un seul fichier de code qui, à son exécution, communiquera avec le système d'exploitation pour accéder à ses services. Ce genre de fichier exécutable est obtenu par une *édition de liens statique* qui combine en un seul fichier tous les modules (à l'exception du système d'exploitation). Par rapport à la forme monolithique, cette organisation simplifie le développement, car le



programmeur n'a pas à se soucier du développement des services de base comme l'accès aux fichiers, la gestion des processus et de la mémoire, etc. Le programme peut être diffusé à d'autres ordinateurs ayant le même système d'exploitation simplement en y transférant le fichier exécutable.

L'édition de lien statique a un certain nombre de défauts. L'état des modules utilisés au moment de l'édition de liens est figé au sein du programme, ce qui empêche la mise à jour individuelle des modules à de nouvelles versions. Il faut recompiler tous les modules qui ont subi une mise à jour et refaire l'édition de liens du programme principal. Le coût en temps et l'effort pour un petit changement sont importants. Le chapitre 5 va détailler plus en profondeur ces problèmes.

L'édition de liens peut se faire paresseusement par le système d'exploitation à l'exécution du programme, ce qu'on appelle l'*édition de liens dynamique*. Cela permet de garder la structure modulaire au *déploiement*. Chaque module est une composante séparée du programme principal. Ces modules sont lus du disque et chargés en mémoire durant l'exécution du programme. Ce chargement est effectué par l'*éditeur de liens dynamique* qui s'occupe de lier les fonctionnalités des modules au programme principal. Le chapitre 3 explique plus en profondeur le fonctionnement de l'éditeur de liens dynamique. L'avantage principal du chargement dynamique de module est la possibilité de mise à jour individuelle d'un module sans avoir à lier le programme principal; dans le modèle statique, le programme principal doit être lié à nouveau avec les modules. Les modules chargés dynamiquement par le système d'exploitation peuvent être partagés entre différents programmes. Ce type de module, les *bibliothèques partagées*, est décrit dans le chapitre 3.

## 1.2. Systèmes distribués

Un *système distribué* est un groupe d'ordinateurs, les *nœuds* de calcul, reliés en réseau afin qu'ils puissent échanger des messages et coordonner leurs activités. Chaque nœud peut exécuter le même code que les autres nœuds ou bien un code spécialisé au rôle qu'il joue au sein du système (e.g. serveur vs client). D'une façon ou de l'autre on parlera de l'ensemble du code comme étant le *programme distribué* qu'ils exécutent.

Les programmes distribués posent de nouveaux problèmes de déploiement, car les nœuds sont rarement identiques. Ils peuvent avoir des architectures matérielles différentes, et/ou

des ressources et périphériques différents, et/ou des systèmes d'exploitation différents. Il est à noter que ces caractéristiques peuvent changer pendant la période d'exploitation du programme, par exemple lors de mise à jour du matériel et du système d'exploitation. Ce problème est exacerbé par le *code mobile*, c'est-à-dire un calcul en exécution sur un nœud qui se déplace, ou *migre*, sur un autre nœud pour poursuivre son exécution. Cette *migration de tâche* est utile pour améliorer la performance lorsque le nœud destinataire est plus puissant ou possède localement les données utilisées par la tâche migrée. Finalement, dans le cas de programmes distribués offrant un service à l'externe, on veut minimiser les interruptions de service causées par les mises à jour du système ou d'une de ses parties, que ce soit 1) au niveau matériel et/ou le système d'exploitation ou 2) le programme distribué lui-même. Dans le premier cas, la migration de tâche peut être utilisée pour migrer le service à un autre nœud le temps que se fasse la mise à jour. Dans le deuxième cas, on aimerait utiliser les nouveaux modules modifiés sans avoir à arrêter le programme et le redémarrer.

Il apparaît donc avantageux que le code du programme distribué prenne une forme exécutable *portable* qui peut s'adapter aux particularités de chaque nœud sans demander au développeur de modifier ou recompiler le programme distribué. Idéalement, cette portabilité ne devrait pas causer des pertes de performance. D'autre part, la possibilité de substituer une version d'un module par une nouvelle version sans interruption du programme est attrayante.

### 1.3. Modules versionnés

Nous définissons le terme *version de module* comme étant tout simplement un état de son code. Ainsi, lorsqu'on fait une modification au code d'un module pour corriger un problème ou pour étendre ses fonctionnalités on obtient une nouvelle version du module. La version d'un module est donc essentielle pour identifier son code, et donc sa fonctionnalité, de façon précise.

Le concept de version de module n'est pas intégré à la sémantique de plusieurs langages de programmation. Ainsi en Python et Java les modules sont référés dans le code avec un nom qui n'inclut pas la version. Go est un rare exemple de langage de programmation qui permet d'inclure la version lorsqu'on réfère à un module.

Dans les systèmes qui considèrent chaque version d'un module comme un module différent, il devient possible d'écrire des programmes qui utilisent de multiples versions d'un

module simultanément. Cela peut amener certains problèmes de conflit entre les versions. Ces conflits peuvent être observés dans les langages interprétés comme JavaScript ou dans les langages compilés comme C/C++. Les conflits peuvent être dans les noms des fonctions du module ou dans des variables globales partagées entre plusieurs versions du module.

Nous reviendrons sur les modules versionnés au chapitre 3, car ce concept est essentiel dans notre approche de modularisation.

## 1.4. Code mobile

Dans un système distribué, il est utile d'amorcer des calculs sur un nœud à partir d'un autre. Cela peut se faire avec un appel RPC (*Remote Procedure Call*) ou par *migration de tâches*. Un appel RPC correspond à une requête d'exécution d'un calcul sur un nœud distant. Une migration de tâche copie l'état courant de la tâche et l'envoie sur le nœud distant où son exécution est continuée.

Les appels RPC sont présents dans plusieurs systèmes et langages de programmation. Le protocole `ssh` permet une forme d'appel RPC par invocation de processus sur un système distant. Java offre les appels distants par un mécanisme similaire au RPC nommé RMI (*Remote Method Invocation*). Le langage C offre des bibliothèques qui implémentent un protocole de RPC. Ces variantes de RPC sont limitées aux fonctionnalités fournies par le nœud distant. Pour le bon fonctionnement de cette approche, il est nécessaire que le service demandé soit déjà déployé sur la machine distante.

La migration de tâche permet de transférer une tâche d'un nœud à un autre. Ce mécanisme a été implémenté dans différents langages comme Erlang [18], Java [5], Scheme [22][11], JavaScript [17]. Ce mécanisme requiert typiquement que l'ensemble du code soit disponible sur le système distant.

Le système Java présenté dans l'article [5] est un cas de migration de tâche. Il capture l'état présent du programme qui consiste aux valeurs et aux types de toutes les variables de chaque objet. La pile des appels de méthode avec les valeurs de toutes les variables est aussi incluse dans l'état du programme. Ces informations sont transmises au nœud distant qui les utilise pour reconstruire le programme initial. L'ensemble des méthodes sur le nœud de départ est présent sur le nœud d'arrivée.

Le système Erlang [18] qui implémente des agents mobiles requiert que le code soit disponible sur le nœud destination.

Le système de migration en JavaScript utilise des nœuds pour conserver le code. Il est basé sur le fait que le code des agents est connu par les nœuds spécialisés. Puisque le code des agents est connu, il suffit de transmettre l'état de l'agent pour effectuer une migration.

Un exemple concret de migration de code est présenté au chapitre 7.

Notre point de vue est que la migration de code ne devrait pas demander une préconfiguration des nœuds, car une gestion coordonnée de tous les nœuds d'un système distribué est difficile ou impossible lorsqu'il y a plusieurs nœuds et/ou des nœuds de nature différente et/ou il n'y a pas un gestionnaire unique de l'ensemble des nœuds. Même dans le cas où les nœuds sont sous le contrôle d'un unique gestionnaire, il serait avantageux de ne pas interrompre le fonctionnement du système distribué lorsque les modules sont améliorés.

## 1.5. Survol du mémoire

Pour ces raisons, nous avons développé un système de module pour le langage de programmation Scheme qui offre la possibilité de migrer un agent sur un nœud qui ne connaît pas à priori le code de l'agent, et qui permet à des versions multiples d'un module de coexister.

Le chapitre 2 explique les approches existantes de modularisation en Scheme. Le chapitre 3 explique les problématiques des dépendances entre des modules natifs au sein du système de module. Le chapitre 4 traite de l'implémentation du système de module et son intégration dans Gambit, un compilateur/interprète performant pour Scheme. Le chapitre 5 explique les mécanismes de chargement des modules. Le chapitre 6 traite de la diffusion des modules et de la migration de tâche. Le chapitre 7 présente une évaluation du système de modules avec des résultats d'expérience effectuée entre des systèmes d'exploitation (SE) et architectures différentes.

# Chapitre 2

---

## Bibliothèques Scheme

Pour développer notre approche de modularisation dans le contexte de systèmes distribués nous avons choisi un langage de programmation nous permettant de facilement expérimenter avec le code mobile. Le langage Termit Scheme, une variante de Scheme étendue avec des fonctionnalités de programmation distribuée inspirées du langage Erlang, nous est apparu comme une option intéressante vue sa performance, sa portabilité et son support pour la méta programmation facilitée par son homoiconicité. Notre travail a donc pu se concentrer sur la conception d'un système de module spécialisé aux besoins du code mobile.

Ce chapitre introduit la syntaxe de Scheme et les différentes approches de modularisation existantes. Afin de faciliter son adoption, le système de module que nous avons développé se base sur ces approches.

### 2.1. Scheme et sa syntaxe

Le langage Scheme[7], conçu en 1975 par Guy L. Steele et Gerald Jay Sussman, est une variante minimaliste de Lisp. Depuis sa conception, plusieurs normes ont vu le jour; les plus connues étant le R4RS (1991), R5RS (1998), R6RS (2007) et R7RS (2013).

Scheme est un langage de programmation avec un système de type dynamique. Les types sont associés aux valeurs plutôt qu'aux variables et une variable donnée n'est pas contrainte à contenir un type particulier. Il permet la programmation fonctionnelle, la programmation impérative et la méta programmation.

Sur le plan syntaxique, Scheme hérite la syntaxe préfixe parenthésée de Lisp. Un programme Scheme est une séquence de *s-expressions*. Chaque *s-expression* correspond soit

à une constante, une variable ou une forme (*<op> <arg>...*) qui dénote un appel de procédure, un appel de macro, ou une forme spéciale.

Les formes syntaxiques spéciales de base en Scheme sont **define**, **lambda**, **let**, **if** et **set!**.

- La forme (**define** *<name>* *<val>*) associe le nom *<name>* avec la valeur de l'expression *<val>*. Il est utilisé pour définir les variables globales.
- La forme (**lambda** *<params>* *<body>*) permet la définition de procédures anonymes. Les paramètres sont *<params>* et le corps de la procédure est l'expression *<body>*.
- La forme (**let** *<bindings>* *<body>*) permet de créer des associations (*<bindings>*) visibles seulement dans le contexte de l'expression *<body>* dont la valeur de la forme **let**. Les associations sont sous la forme d'une liste associative nom et valeur.
- L'évaluation conditionnelle est obtenue par la forme (**if** *<e1>* *<e2>* *<e3>*). L'expression *<e2>* est exécutée si la valeur de l'expression *<e1>* est vraie sinon l'expression *<e3>* est exécutée.
- La forme (**set!** *<name>* *<val>*) modifie le contenu de la variable *<name>* avec la valeur *<val>*.

À titre d'exemple, la figure 2.1 montre un programme Scheme simple avec deux définitions de fonctions.

```
(define sq (lambda (x) (* x x)))

(define fact
  (lambda (n)
    (if (< n 2)
        1
        (* n (fact (- n 1))))))

(println (fact (sq 10)))
```

**Fig. 2.1.** Programme Scheme qui imprime la factorielle de 100.

Les différents types primitifs disponibles dans la norme Scheme sont `boolean`, `pair`, `symbol`, `number`, `char`, `string`, `vector`, `port` et `procedure`. Plusieurs systèmes Scheme offrent des extensions à ces types, tels les dictionnaires (“hash tables”), les structures (“records”) et tableaux numériques (par exemple Gambit offre le type `u8vector` qui est un tableau d’octets).

## 2.2. Procédures et macros

Les procédures sont des objets de première classe, c’est-à-dire pouvant être manipulées comme n’importe quel type de donnée. Elles peuvent être passées en tant que paramètre à une procédure et retournées en tant que résultat. Certaines procédures, comme `for-each`, `map` et `fold`, en tirent profit.

Les procédures sont définies par la forme `lambda` qui a une liste de paramètres et une séquence d’au moins une *s-expression* comme corps. Lors de l’appel d’une procédure, chacun des paramètres actuels est évalué puis propagé à la procédure. C’est un mode de passage de paramètre par valeur. Les boucles sont normalement exprimées sous la forme de récursion. Cela est facilité par l’existence de l’appel terminal garanti. Il est assez simple d’ajouter une syntaxe pour les boucles à l’aide de la méta programmation.

La méta programmation en Scheme est basée sur la capacité d’un programme de manipuler d’autre programme comme des données. Cela implique qu’il est possible de générer, analyser et modifier le code d’un autre programme. Les constructions utilisées pour manipuler le code du programme et ajouter des extensions au langage sont les macros.

En C et C++, les macros sont basées sur un modèle de remplacement textuel simple et ne permettent pas de récursion se référant à elle-même. Un appel à la macro est remplacé par le corps de celle-ci. Les macros de style Lisp permettent des transformations qui se font avec l’ensemble des procédures du langage, ce qui leur donne plus de flexibilité. La différence entre les procédures et les macros est le mode de passage de paramètres. Les paramètres sont passés à la macro sans être évalués. Certaines implémentations de Scheme offrent la forme `define-macro` pour définir les macros. Cette forme est équivalente au `defmacro` de Lisp. Elle accepte en entrée des *s-expressions* et retourne une *s-expression*.

Un exemple qui montre les capacités des macros Scheme est la macro `include`. Cette macro permet l’inclusion du contenu d’un fichier au point d’appel. Pour inclure un fichier

```
(define-macro (include filename)
  (call-with-input-file
    filename
    (lambda (port)
      '(begin
        ,@(read-all port))))))
```

**Fig. 2.2.** Implémentation de la macro `include` qui permet l'inclusion d'un fichier dans un autre fichier avec la forme `define-macro`.

dans un autre, il faut tout d'abord lire le contenu du fichier à inclure. Ensuite, il suffit de retourner le code lu. La figure 2.2 montre une implémentation de cette macro avec `define-macro`. Pour les systèmes Scheme n'offrant pas la forme `define-macro`, il est assez simple d'implémenter la forme `include` avec `define-syntax` qui est une forme de définition de macro alternative à `define-macro`. L'implémentation de cette macro est donnée à la figure 2.3. Les particularités de `define-syntax` ne sont expliquées puisqu'elles ne sont pas pertinentes à ce mémoire.

```
(define-syntax include
  (lambda (stx)
    (syntax-case stx ()
      ((_ filename)
        (let ((content
              (call-with-input-file
                (syntax->datum (syntax filename))
                (lambda (port)
                  '(begin ,@(read-all port))))))
          (datum->syntax stx content))))))
```

**Fig. 2.3.** Implémentation de la macro `include` qui permet l'inclusion d'un fichier dans un autre fichier avec la forme `define-syntax`.



## 2.3. Structure des bibliothèques

Les bibliothèques, aussi appelées modules, facilitent le partage de fonctionnalités entre plusieurs programmes. Dans le standard R4RS[6] et R5RS[16] les modules consistent en des fichiers Scheme qui contiennent des définitions de procédures et de macros. Ils sont chargés dans l'environnement global par la procédure `load`. Certaines implémentations de Scheme ont la forme spéciale `include` qui permet de séparer un module Scheme en plusieurs parties. Cette forme peut s'ajouter facilement au langage (tel que montré à la figure 2.3). Le modèle de bibliothèque basé sur `load` et `include` possède plusieurs lacunes.

- Ce modèle de chargement n'est pas à l'abri des chargements multiples d'un module qui mène soit à de la duplication de code (dans le cas de la forme `include`) ou à de la réévaluation d'un code (dans le cas de `load`).
- Toutes les déclarations dans un module sont ajoutées à l'environnement global lors du chargement par `load`. Cela mène à des conflits de nom entre les identifiants du module principal et des modules importés.
- L'importation d'un module par `load` ou `include` nécessite la connaissance de son emplacement dans le système de fichier.

Le chargement d'un module dans Gambit Scheme par `load` se fait en plusieurs phases: l'analyse lexicale, l'analyse syntaxique, l'expansion de macro et l'évaluation. L'analyse lexicale brise l'expression en lexèmes. La séquence de lexèmes est associée à un contexte par l'analyse syntaxique dans laquelle il y a aussi une expansion des macros. L'inclusion d'un fichier avec `include` n'effectue qu'une analyse lexicale qui est effectuée par la procédure `read-all`. L'évaluation est effectuée après l'analyse syntaxique et l'expansion des macros. D'autres systèmes Scheme permettent le chargement des macros par `load`.

Dans un module, il y a du code qui est exécuté lors de l'expansion (les macros) et à l'évaluation. La procédure `load` donne accès aux procédures définies dans le module, mais pas aux macros, car elles sont expansées. Après un `load`, il ne reste que les procédures et variables globales qui résultent de l'expansion des macros. Pour avoir accès aux macros, il faut utiliser la forme spéciale `include` qui est expansée par le contenu du fichier. L'expression `(include "foo.scm")` est remplacée par le contenu du fichier `foo.scm`. L'exemple 2.4 montre un exemple de module simple n'utilisant que la procédure `load`.

<pre>;; fact.scm (define (fact n)   (if (&lt; n 2)       n       (* n (fact (- n 1)))))</pre>	<pre>;; main.scm (load "fact.scm") (display (fact 5))</pre>
---	---

**Fig. 2.4.** Le fichier `fact.scm` est un exemple de module R4RS exposant la fonction mathématique `fact`. Le fichier `main.scm` est un programme principal qui utilise le module `fact.scm`.

Le standard R6RS[21] renforce le concept de module avec la syntaxe `library`. Un module R6RS est séparé en 4 parties: le nom, une sous-forme `export`, une sous-forme `import` et le corps du module. Le nom du module l'identifie de façon unique, il peut contenir une spécification de version. La version est spécifiée par une liste d'entiers positifs. Une liste vide () correspond à ne pas spécifier la version. Ensuite, il y a la liste des exportations qui est spécifiée par la sous-forme `export`. Chaque élément de cette liste est soit un identifiant ou une sous-forme `rename` qui renomme l'identifiant exporté. L'`import` donne la liste des dépendances du module. Chaque dépendance spécifie:

- le nom du module importé et de façon optionnelle, une contrainte sur la version;
- le niveau d'import (temps d'expansion de macros ou évaluation);
- un sous-ensemble de l'`export` du module et le nom local utilisé au sein du module présent pour chaque exportation du module.

Le corps du module contient une séquence de définitions suivie par une séquence d'expressions. Une définition peut être locale ou exportée. Les expressions initialisent le module lors de l'exécution. Le R6RS ajoute aussi la forme `import` pour l'importation d'un module et enlève la procédure `load`. Contrairement au `load`, la forme `import` garantit le chargement unique d'un module. La syntaxe du `import` permet de manipuler les noms des symboles importés et exportés.

La forme `import` de R6RS permet l'importation d'un ensemble de modules. Chaque spécification d'import `<import spec>` peut être une simple importation ou une importation

```
(library <library name>
  (export <export spec> ...)
  (import <import spec> ...)
  <library body>)
```

**Fig. 2.5.** Structure globale d'un module R6RS

avec un niveau. Les différents niveaux d'importation sont: **run**, **expand** ou **(meta <level>)**. Le niveau méta donné par **<level>** est un entier exact. Un niveau d'importation 0 correspond à **run** et un niveau d'importation de 1 correspond à **expand**.

La syntaxe pour l'importation avec les niveaux méta est décrite dans la spécification R6RS [21]. Le **import** R6RS permet un grand contrôle lors de l'importation des modules au prix d'une sémantique plus complexe.

Les déclarations d'un module R6RS sont dans un espace distinct de l'espace global et des autres modules. Les déclarations d'un module ne peuvent pas être en conflit avec des déclarations globales ou d'autres modules. L'élément qui permet de distinguer deux modules est leurs identifications (nom avec version). Le nom du module correspond à l'espace de nom du module. C'est ce qui unit les déclarations au module et empêche les conflits de nom entre les modules.

Le standard R7RS[20] simplifie la syntaxe des modules R6RS[21]. L'importation d'un module fait abstraction du niveau d'importation. Les macros et les procédures sont importées de façon transparente. La procédure **load** est conservée. La forme spéciale pour définir un module est **define-library**. Il n'y a pas d'ordre spécifique dans les déclarations de la bibliothèque comme en R6RS. Un module R7RS commence par un nom suivi de plusieurs déclarations.

```
(define-library <library name>
  <library declaration>*)
```

**Fig. 2.6.** Structure globale d'un module R7RS

Une déclaration dans un module est soit un **import**, un **export**, un **include**, un **include-ci**, un **cond-expand** ou un bloc **begin**.

- La déclaration `import` est équivalente au R6RS sans le concept de niveau d'importation.
- La déclaration `export` est idem au R6RS.
- Les déclarations `include` et `include-ci` permettent l'inclusion d'un fichier en tant qu'un bloc de code. La seconde forme non sensible à la casse des caractères.
- La déclaration `cond-expand` est une extension du SRFI-0 [8] dans le contexte d'une bibliothèque permettant l'inclusion conditionnelle de code.

La forme `import` en R7RS permet d'importer un ensemble d'identifiants qui sont exportés par un module. Chaque ensemble importé spécifie le nom des identifiants du module et parfois même associe un nom local aux identifiants. L'`import` peut prendre l'une des formes suivantes:

- `<library-name>`
- `(only <import-set> <id1> ...)`
- `(except <import-set> <id1> ...)`
- `(prefix <import-set> <id>)`
- `(rename <import-set> (<id1> <id2>) ...)`

Dans la première forme, tous les identifiants exportés par la bibliothèque `<library-name>` sont importés. Les autres types de `<import-set>` modifient l'ensemble comme suit:

- **only** inclut seulement les identifiants spécifiés. C'est une erreur d'importer un identifiant non exporté par la bibliothèque.
- **except** permet d'exclure des identifiants de l'ensemble.
- **rename** renomme les identifiants importés.
- **prefix** ajoute un préfixe à l'ensemble des identifiants importés.

## 2.4. Conclusion

Pour notre objectif de modularisation dans les systèmes distribués, les révisions de Scheme qui offrent les fonctionnalités requises sont R6RS et R7RS. Elles permettent toutes les deux la modularisation du code et la création de modules avec des noms uniques, ce qui est requis pour le bon fonctionnement du code mobile. Nous avons choisi l'approche avec

<pre>;; Bibliotheque R6RS (library (math)   (export fact)   (import (rnrs base))   (define (fact n)     (if (&lt; n 2)         1         (* n (fact (- n 1))))))</pre>	<pre>;; Bibliotheque R7RS (define-library (math)   (export fact)   (import (scheme base))   (begin     (define (fact n)       (if (&lt; n 2)           1           (* n (fact (- n 1))))))</pre>
--	--

**Fig. 2.7.** Comparaison entre la syntaxe des modules R6RS et R7RS

`define-library`, puisque Gambit se veut compatible avec le R7RS. Cela a permis d'expérimenter avec le code mobile. En plus, cela facilite son adoption et sa portabilité entre les implémentations de Scheme qui sont de plus en plus compatibles avec R7RS.

# Chapitre 3

---

## Coexistence de bibliothèques dynamiques

Ce chapitre traite du fonctionnement de l'éditeur de liens du système d'exploitation (*dynamique linker*) et des bibliothèques dynamiques. Le système de modules, présenté dans ce mémoire, supporte le chargement de plusieurs versions d'un module. Une version d'un module correspond à un état de son code à un moment précis dans son évolution. Cela a le potentiel de causer des problèmes d'exécution du programme. Puisque ce système de module utilise des bibliothèques dynamiques du système d'exploitation, il est donc nécessaire de déterminer la nature de ces situations problématiques. Nous avons procédé à des expériences pour déterminer sous quelles conditions des bibliothèques dynamiques peuvent coexister.

### 3.1. Format des modules

La modularisation est utile pour séparer un programme en plusieurs composantes relativement indépendantes. Ici nous traitons des modules au niveau du système d'exploitation ("system libraries"). La forme dans laquelle un module est stocké dépend du contexte. Dans les langages interprétés, les modules ont la forme de fichier textuel, contenant du code, qui est compréhensible par un humain. Cela facilite les modifications du code du module. Par contre, l'interprétation de module en format textuel est beaucoup plus lente. Les modules compilés sont l'alternative aux modules textuels.

Un module qui est compilé en format binaire est plus difficile à comprendre du point de vue d'un humain, mais est plus rapide à s'exécuter. Le compromis est la rapidité contre la lisibilité. Le format binaire peut varier d'un système à l'autre. Les systèmes Linux utilisent le format ELF (*Extensible Linking Format*), Microsoft Windows le format PE (*Portable*

*Executable*) et macOS le format Mach-O (*Mach object*). Ces formats binaires sont utilisés pour les exécutables, les bibliothèques statiques et les bibliothèques dynamiques.

Les bibliothèques dynamiques ont des problèmes propres comparativement aux bibliothèques statiques.

## 3.2. Édition de liens dynamique

une application qui utilise une bibliothèque partagée ne contient pas le code de la bibliothèque, mais plutôt le nom des bibliothèques utilisées. la récupération le code à partir du nom est la résolution qui est effectuée par le *dynamic loader*. lorsqu'un programme lié dynamiquement à plusieurs bibliothèques partagées exécute un appel à une procédure externe, la routine de résolution est démarrée pour résoudre le code de cette procédure.

Par exemple, sous Linux l'utilitaire «yes», qui est écrit en C, est lié aux bibliothèques système suivantes:

```
linux-vdso.so.1 (0x00007ffef7f9000)
libc.so.6 => /usr/lib/libc.so.6 (0x00007ff68161c000)
/lib64/ld-linux-x86-64.so.2 => ...
```

La bibliothèque *libc.so.6* contient un grand nombre des fonctions standards du système telles que *fopen*, *fclose*, .... Le chargement de certaines bibliothèques utilisé par le *dynamic loader* est effectué au début de l'application, avant l'exécution de la fonction principale souvent nommée **main**. Plusieurs bibliothèques peuvent coexister simultanément au sein d'un même processus sans que l'exécution du programme en soit affectée.

La résolution des fonctionnalités de ces bibliothèques est effectuée par un programme appelé le *program interpreter* du système qui correspond à */lib64/ld-linux-x86-64.so.2*. Il est aussi possible de forcer la résolution d'une fonctionnalité d'une bibliothèque de façon manuelle. Ce genre d'interaction est possible sur les trois principales plateformes utilisées sur le marché (Windows, macOS et Linux).

Sur Linux, l'API qui permet d'interagir avec les bibliothèques partagées provient de *libdl.so*. Elle contient les fonctions *dlopen*, *dlsym*, *dlerror* et *dlclose* pour gérer des bibliothèques de code supplémentaire chargé manuellement à l'exécution. Pour charger la fonction *foo*, qui ne prend pas d'argument et ne retourne rien de la bibliothèque *libFoo.so* en C, il faut exécuter les deux appels de la figure 3.1:

```
...  
void *handle = dlopen("./libFoo.so", RTLD_LAZY);  
void (*foo)() = dlsym(handle, "foo");  
...
```

**Fig. 3.1.** Chargement dynamique de la bibliothèque *libFoo.so* et résolution de la fonction *foo* sans gestion d'erreur sous Linux

L'équivalent des bibliothèques partagées sous Windows est les DLLs, qui peuvent être chargées de façon similaire dans un programme en utilisant les fonctions *LoadLibrary*, *LoadLibraryEx* et *GetProcAddress*. Ils fonctionnent de la même façon que leur équivalent Linux. Pour macOS, il faut passer par les routines:

- *NSCreateObjectFileImageFromFile*
- *NSLinkModule*
- *NSLookupSymbolInModule*
- *NSAddressOfSymbol*

La majorité des langages interprétés permettent l'importation de bibliothèques de code natives, via une interface nommée *foreign function interface* (FFI). Cette interface offre une couche d'abstraction de ces procédures. Prenons comme exemple les langages Python, Ruby, Lua et Scheme. Python possède le module **ctypes** qui permet de charger des bibliothèques natives dynamiques, et Ruby possède le module **ffi**.

Certains langages ont un mécanisme pour charger des bibliothèques natives s'ils ont été conçus spécialement. Dans le langage de programmation Lua, il est possible de charger directement une bibliothèque dynamique si elle contient une fonction **luaopen\_*libname*** où *libname* est le nom de la bibliothèque. Gambit Scheme utilise un mécanisme équivalent. Il permet le chargement de ces modules qui ont été compilés en bibliothèque partagée (DLL) avec la fonction (**load "libname"**).

La résolution des fonctionnalités effectuée par le *dynamic linker* utilise un ordre de recherche défini. Cet ordre de recherche inclut l'exécutable courant, les dépendances de l'exécutable, la bibliothèque passée à *dlsym*. Une résolution d'une fonctionnalité est soit directe



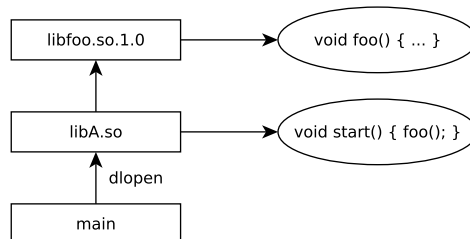
```

require 'ffi'
# Chargement d'une bibliotheque native.
module LibFoo
  extend FFI::Library
  ffi_lib './libFoo.so'
  attach_function :foo, [], :void
end
# Appel de la fonction foo.
LibFoo.foo

```

**Fig. 3.2.** Code d'importation de la fonction **foo** de la bibliothèque *libFoo.so* en Ruby

ou indirecte. La résolution d'une fonctionnalité par *dlsym* qui n'engendre pas la résolution d'une autre fonctionnalité externe est directe. Une résolution directe n'utilise pas le programme principal dans l'ordre de recherche. Les résolutions de fonctionnalité provenant d'appels indirects au *dynamic linker* inclut le programme principal et ses dépendances avant la bibliothèque passée à *dlsym*.



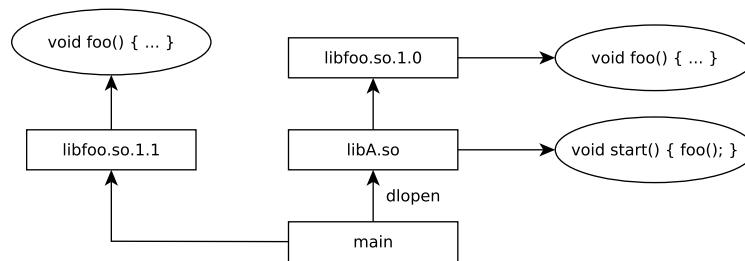
**Fig. 3.3.** Un exemple de dépendance de bibliothèques au sein d'une application simple fictive. La bibliothèque *libA.so* est chargée dans l'application **main** via les appels aux procédures *dlopen* et *dlsym*. Les fonctionnalités utilisées dans l'exemple sont marquées dans des ellipses.

Dans la situation présentée dans la figure 3.3, quelles sont les étapes incluses dans l'exécution de ce programme qui invoque la fonctionnalité **start** de la bibliothèque *libA.so*? La fonctionnalité externe **start** est résolue de façon directe par un appel à `dlsym(libA,"start")`

qui commence la recherche de la procédure `start` dans la bibliothèque spécifiée en paramètre `dlsym`. Le programme l'invoque une fois la procédure trouvée. L'appel à une procédure non résolue (e.g. la procédure `foo` invoquée dans `start`) déclenche une procédure automatique de résolution des fonctionnalités. Cette procédure de résolution commence sa recherche à partir de l'exécutable, puis itère la liste des dépendances directe. Si la fonctionnalité n'est pas encore trouvée, la recherche continuera à partir de la bibliothèque passée à `dlsym`.

Il est facile d'exploiter l'ordre de recherche du *dynamic linker* pour causer un masquage de fonctionnalité dans une application. Ce masquage est utilisé dans certains contextes pour déboguer un programme, mais il peut aussi nuire à l'exécution du programme. Il y a au moins deux structures de programme qui causent un masquage. L'application principale est construite comme une bibliothèque dynamique exécutable et fournit une fonctionnalité qui porte le même nom qu'une fonctionnalité exportée par une bibliothèque externe chargée manuellement. L'application principale est liée avec une bibliothèque qui exporte une fonctionnalité qui porte le même nom que celle utilisée dans la bibliothèque externe.

La figure 3.4 est un exemple de masquage qui utilise la seconde méthode. La première méthode requiert des bibliothèques exécutables qui ne sont pas disponibles sur toutes les plateformes. Sous Linux, il est possible de créer une bibliothèque exécutable en passant le paramètre `-rdynamic` à `gcc` lors de la construction de la bibliothèque.



**Fig. 3.4.** Exemple de dépendance dans une application qui cause le masquage de la fonctionnalité `foo` de la bibliothèque `libfoo.so.1.0` par la bibliothèque `libfoo.so.1.1`

L'analyse des interactions entre des bibliothèques au sein d'un même programme permet de mieux comprendre quelles sont les circonstances qui peuvent conduire à des comportements non désirés, comme le masquage de fonctionnalité présent dans l'exemple de la

figure 3.4. Cela permet aussi d'établir les conditions qui permettent d'éviter ces comportements non désirés.

### 3.2.1. Coexistence entre les bibliothèques

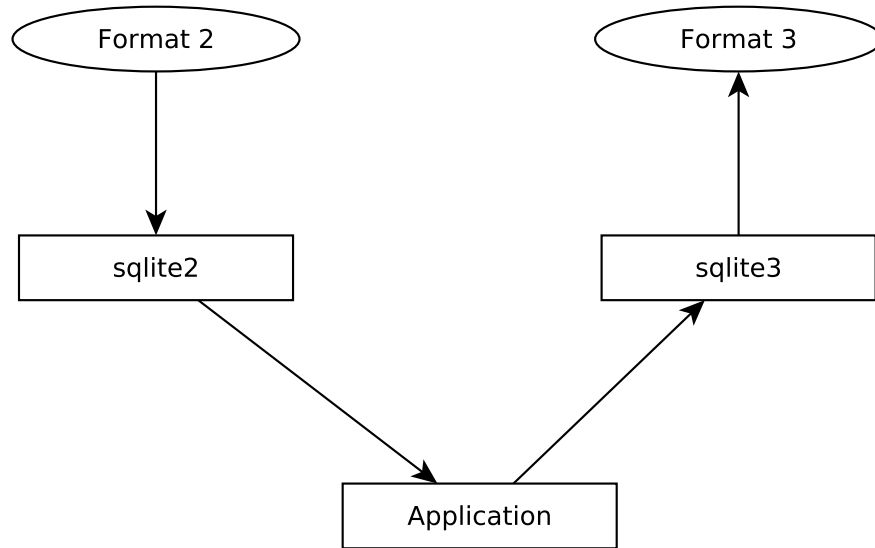
Les bibliothèques coexistent dans deux contextes principaux, de façon passive dans un système de fichier et de façon active durant l'exécution d'un programme. Un système de fichier contient une arborescence hiérarchique de répertoires et de fichiers avec une seule racine. Un fichier est l'entité dans un système de fichier qui contient le code des bibliothèques. Les répertoires sont les entités qui permettent de regrouper plusieurs fichiers de façon logique. La racine correspond au sommet de la hiérarchie du système de fichier. La façon de référer à un fichier dans un système de fichier est d'utiliser le chemin absolu. Cela correspond à la liste des répertoires à parcourir de la racine jusqu'au fichier. L'outil responsable d'organiser les bibliothèques sur un système est le *package manager*. Il a plusieurs objectifs incluant l'installation de bibliothèque, la mise à jour des bibliothèques installées, la désinstallation de bibliothèque et la résolution des dépendances.

Un cas intéressant de coexistence entre bibliothèques est celui qui inclut plusieurs versions d'une bibliothèque. Les problèmes peuvent être liés à l'organisation sur le système de fichier et au masquage de fonctionnalité durant l'exécution d'un processus. Il y a aussi plusieurs utilités de conserver plusieurs versions d'une bibliothèque, cela permet de supporter des applications qui dépendent de bibliothèques antérieures.

Une autre application est de convertir un vieux format de fichier vers un format plus récent. Dans le cas où il n'est pas possible d'avoir en même temps plusieurs versions d'une bibliothèque, il faut alors écrire un parseur pour lire le vieux format, ensuite utiliser les fonctions de la version cible de la bibliothèque pour générer le nouveau format du fichier. Cette solution est clairement laborieuse et susceptible à des erreurs de codage.

## 3.3. Conditions de coexistence

Des conditions suffisantes pour que deux bibliothèques puissent coexister au sein d'un processus incluant deux versions de la même bibliothèque sont l'absence d'état global ou local, et l'unicité des noms des fonctionnalités. L'absence d'état garantit que chaque fonction de la bibliothèque retourne toujours un résultat prévisible dans un contexte identique. Un



**Fig. 3.5.** Un exemple d'application de conversion entre deux versions d'un format de fichier comme sqlite2 et sqlite3 exploitant la possibilité de charger plusieurs versions d'une bibliothèque.

cas extrême est la pureté fonctionnelle, qui est d'autre part avantageuse dans un contexte *multithread*, car il n'est pas possible d'avoir une condition de course sur une donnée partagée. La pureté fonctionnelle garantit qu'il n'y a pas d'affectation et donc pas d'état. Le fait que chaque fonctionnalité soit associée à un nom unique qui empêche une bibliothèque de masquer une fonctionnalité d'une autre bibliothèque.

Ces conditions sont suffisantes pour que deux bibliothèques coexistent sans problème, mais elles ne sont pas nécessaires. Il existe des bibliothèques qui ne respectent pas ces conditions, mais coexistent avec d'autres versions de la bibliothèque. Pour tester la coexistence entre plusieurs bibliothèques, des expériences ont été effectuées dans plusieurs systèmes de modules existants. Le but de l'expérience est d'observer le bon fonctionnement des bibliothèques au sein du processus.

Les expériences qui suivent permettent d'observer et d'identifier les cas de cohabitation de bibliothèques au sein d'une application qui cause des problèmes. Ils permettent aussi d'identifier les capacités d'un langage à charger plusieurs versions d'une bibliothèque.

### 3.3.1. Bibliothèque C

Les bibliothèques dans le langage C sont compilées dans un format natif pour la plateforme courante (e.g. Window, macOS, Linux). Leur format diffère d'un système d'exploitation à un autre, Window utilise le format *dll* (*dynamic loading library*), macOS utilise le format *dylib* (*Mach-O dynamic library*) et Linux utilise le format *so* (*shared object*).

Les bibliothèques C consistent de symboles qui correspondent aux fonctions et variables globales exportées. Une bibliothèque est généralement liée à un programme C lors de la création du programme. Les symboles non définis sont résolus durant l'exécution du programme.

Les collisions de symboles entre deux bibliothèques causent un masquage de fonctionnalité d'une des deux bibliothèques. Un problème est de savoir si cela est possible de charger deux bibliothèques avec des collisions de symboles et accéder aux fonctionnalités distinctes de ces bibliothèques.

Pour charger deux versions d'une même bibliothèque en C, il faut utiliser un moyen qui prend en compte des symboles communs. La résolution des symboles se fait par un parcourt en largeur dans la liste des symboles des bibliothèques. Le résultat est le premier objet qui correspond au nom de symbole recherché. L'ordre des bibliothèques utilisé dans la résolution des symboles correspond à l'ordre spécifié lors de la construction de l'exécutable.

```
> gcc -lSDL -lSDL2 exemple.c -o exemple
> ldd ./exemple
libSDL.so => /usr/lib/libSDL.so
libSDL2.so => /usr/lib/libSDL2.so
```

**Fig. 3.6.** Création d'un exécutable lié aux deux bibliothèques SDL et SDL2 dans cet ordre.

La figure 3.6 donne la procédure de création d'un exécutable lié avec deux versions de SDL. Les tests ont été effectués sur deux versions de SDL, 1.2 et 2. Ces versions peuvent utiliser des ressources communes comme les événements du clavier, la mémoire et le GPU en utilisant OpenGL pour faire de l'affichage 2D ou 3D. Plusieurs situations sont testées, chacune sans thread et avec des threads:

- (1) Une utilisation de SDL minimaliste qui n'écoute pas les événements utilisateurs.

- (2) Une utilisation de SDL avec une boucle d'événements de base.
- (3) Une utilisation de SDL avec une utilisation d'un contexte OpenGL.

Puisque SDL1.2 et SDL2 ont des collisions de symboles (e.g. `SDL_Init`, `SDL_FillRect`, `SDL_BlitSurface`, ...), l'une des premières observations à effectuer est la bonne répartition des appels de fonctions des deux bibliothèques dans le contexte d'une même application. Le problème à identifier est un appel invalide à une procédure de SDL2 qui était destiné à SDL1.2. Le facteur, qui influence laquelle des deux bibliothèques va masquer l'autre, est l'ordre dans laquelle elles sont liées au programme à la création, qui est montrée à la figure 3.6.

Le masquage est un problème qui peut mener à une défaillance du programme, car cela peut provoquer la transmission d'une structure incompatible de la première bibliothèque à la deuxième. Dans le cas de SDL, la structure `SDL_Surface` a une disposition différente des champs, donc incompatible. Le premier champ qui décale l'alignement de ces deux structures est le *pitch*, qui dans SDL1.2 est déclaré en `Uint16` alors qu'en SDL2 il est un `int` qui sont des types de taille différente. Donc, l'accès au prochain champ `pixels` est différent entre SDL1.2 et SDL2, ce qui peut causer un accès invalide en mémoire. si une structure de SDL1.2 est accédée comme une structure de SDL2.

1	<code>typedef struct SDL_Surface {</code>	<code>typedef struct SDL_Surface {</code>	1
2	<code>    Uint32 flags;</code>	<code>    Uint32 flags;</code>	2
3	<code>    SDL_PixelFormat *format;</code>	<code>    SDL_PixelFormat *format;</code>	3
4	<code>    int w, h;</code>	<code>    int w, h;</code>	4
5	<code>    Uint16 pitch;</code>	<code>    int pitch;</code>	5
6	<code>    // Different offset here</code>	<code>    // Different offset here</code>	6
7	<code>    void *pixels;</code>	<code>    void *pixels;</code>	7
8	<code>    ...</code>	<code>    ...</code>	8
9	<code>} SDL_Surface;</code>	<code>} SDL_Surface;</code>	9

**Fig. 3.7.** La comparaison entre la structure `SDL_Surface` de SDL1.2 et SDL2 respectivement.

La coexistence entre deux bibliothèques conflictuelles au sein d’une application n’est pas possible en lien l’application aux bibliothèques durant sa construction 3.6. Il est peu probable d’avoir une coexistence entre deux bibliothèques avec des noms de fonctionnalités similaires au sein.

La façon d’avoir plusieurs bibliothèques conflictuelles au sein d’un programme est d’utiliser l’API du `dynamic linker`. Le cas qui pourrait permettre plusieurs bibliothèques avec des collisions de symboles au sein d’une même est avec l’API du *dynamic linker*. Un test simple permet de démontrer la capacité de répartir les appels d’une fonction identifiés par le même nom dans différentes bibliothèques.

La structure générale des tests est organisée comme suit. Deux bibliothèques implémentant une interaction valide avec l’une des versions de la bibliothèque (e.g. SDL1.2, SDL2). Une application qui unit ces deux bibliothèques en utilisant l’API du *dynamic linker* pour exécuter ces deux bibliothèques séquentiellement ou parallèlement.

Dans le test minimaliste sans gestion d’évènements, l’exécution des bibliothèques fonctionne dans les deux cas, séquentiellement et en parallèle. La raison qui explique ce bon fonctionnement est la répartition des appels aux fonctions des deux bibliothèques et le fait qu’il n’utilise pas de structure commune, qui pourrait causer des conditions de course dans le test en parallèle.

Dans le test incluant des évènements, l’hypothèse supposait que les évènements du clavier auraient causé des problèmes de conditions de course en parallèle. Le test a aussi fonctionné séquentiellement et en parallèle, malgré la dépendance commune du clavier.

Le test qui incluait OpenGL, n’aurait pas dû fonctionner par hypothèse. Les deux versions de SDL référaient à une unique version de OpenGL. Le résultat a été surprenant, car le test séquentiel et parallèle à fonctionné. Ce qui amène à conclure qu’il existe des cas de coexistence entre des bibliothèques avec des collisions de symbole qui fonctionne sans causer des problèmes d’exécution.

```

#include <SDL/SDL.h>

int main(int argc, char **argv) {
    SDL_Init(SDL_INIT_VIDEO);
    SDL_WM_SetCaption("sdl1_2", NULL);
    SDL_Surface *win =
        SDL_SetVideoMode(200, 200, 24, SDL_HWSURFACE);

    Uint32 color = SDL_MapRGB(win->format, 255, 0, 0);

    SDL_FillRect(win, NULL, color);
    SDL_Flip(win);
    SDL_Delay(1000);

    SDL_FreeSurface(win);
    SDL_Quit();
    return 0;
}

```

**Fig. 3.8.** Programme qui utilise la bibliothèque SDL1.2 sans la gestion des évènements. Cette application génère une fenêtre rouge qui se ferme après 1 seconde de délais.



```

#include <SDL2/SDL.h>

int main(int argc, char **argv) {
    SDL_Init(SDL_INIT_VIDEO);
    SDL_Window *win = SDL_CreateWindow("title",
        SDL_WINDOWPOS_CENTERED, SDL_WINDOWPOS_CENTERED,
        200, 200, SDL_WINDOW_SHOWN);
    SDL_Surface *screen = SDL_GetWindowSurface(win);

    Uint32 color = SDL_MapRGB(screen->format, 0, 255, 0);
    SDL_FillRect(screen, NULL, color);
    SDL_UpdateWindowSurface(win);
    SDL_Delay(1000);
    SDL_DestroyWindow(win);
    SDL_Quit();
    return 0;
}

```

**Fig. 3.9.** Programme qui utilise la bibliothèque SDL2 sans la gestion des événements. Cette application génère une fenêtre verte qui se ferme aussi après 1 seconde de délais.

### 3.3.2. Bibliothèque Scheme avec FFI

La compatibilité entre versions a été testée sur la partie cryptographique RSA de OpenSSL, SDL et un générateur aléatoire qui possède un état global. Pour observer le comportement de bibliothèque Scheme liant des fonctionnalités implémentées dans un autre langage, dans ces exemples C. Ces tests montrent le problème de masquage décrit précédemment dans des bibliothèques réelles. Pour tester les bibliothèques natives en Scheme, il a fallu écrire du code spécial pour lier les types et les fonctions à des procédures Scheme. Cela a été fait par la FFI de Gambit.

Par hypothèse, la partie cryptographique des deux versions de OpenSSL peut coexister. Chacune des fonctions cryptographiques de OpenSSL1.0 et OpenSSL1.1 exécute du code disjoint qui n'interfère pas avec une zone mémoire commune. Cela implique qu'un appel à une fonction de OpenSSL1.0 n'affectera pas les résultats des appels futurs de OpenSSL1.1. Les fonctions nécessaires pour tester la partie cryptographique RSA sont:

- `PEM_read_bio_RSA_PUBKEY` et `PEM_read_bio_RSAPrivateKey`: Ce sont les fonctions OpenSSL qui permettent de lire la clef publique et la clef privée.
- `RSA_public_encrypt`: La fonction de cryptage qui crypte un message en utilisant une clef publique.
- `RSA_private_decrypt`: La fonction qui permet de décrypter un message en utilisant la clef privée.
- `RSA_free`: La fonction qui libère la mémoire allouée pour les clefs publiques et privées. Cette fonction n'est pas nécessaire pour les tests, mais utile pour une bonne gestion mémoire.

La structure de donnée utilisée par les fonctions d'OpenSSL pour la cryptographie RSA est un pointeur vers un enregistrement RSA. La liaison avec le type C est effectuée avec la forme spéciale `c-define-type`.

Le test consiste à crypter un message en utilisant une clé publique, décrypter le cryptogramme avec la clé privée et comparer le message original avec le message décrypté pour les deux versions de OpenSSL chargé dans le même processus. Pour vérifier la bonne invocation des fonctions de OpenSSL1.0 et OpenSSL1.1 respectifs, le débogueur **`gdb`** a été utilisé. Les bibliothèques d'OpenSSL consistent en deux fichiers `libssl.so` et `libcrypto.so`. En déboguant la répartition des appels avec *gdb*, il y a eu l'observation que la bibliothèque

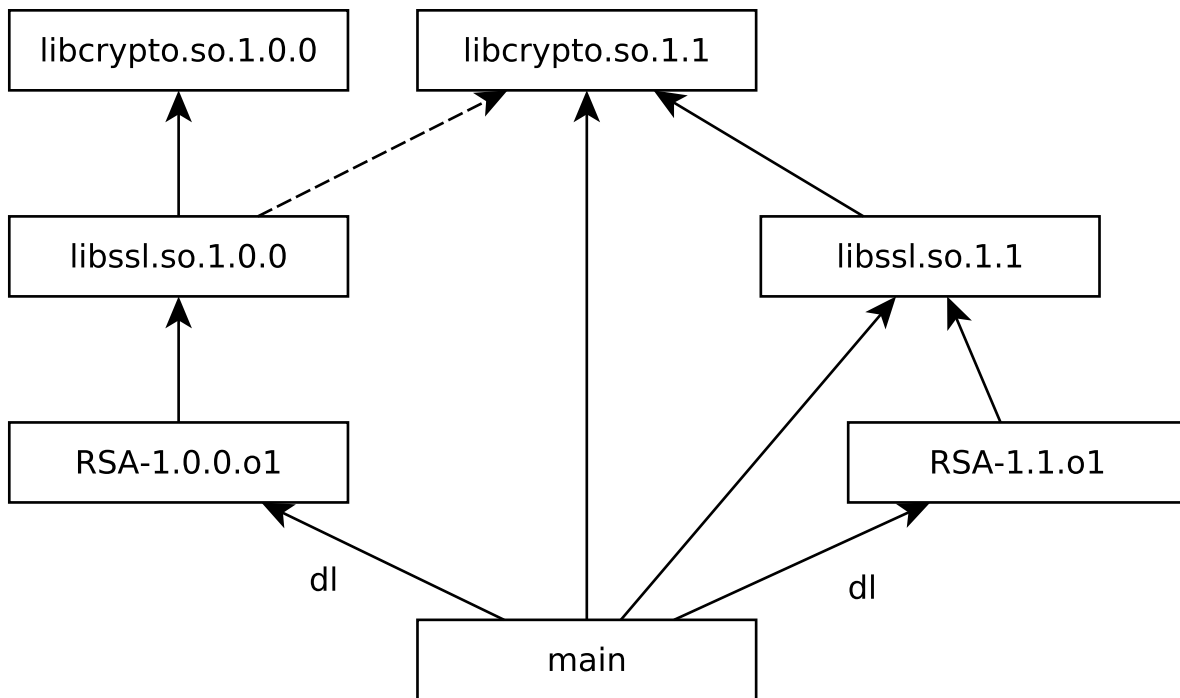
`libcrypto.so` de OpenSSL1.1 masquait la version de OpenSSL1.0 s'il n'est pas spécifié explicitement lors de la création de la bibliothèque Scheme *rsa.scm* comme à la figure-3.10. Les raisons sont liées à plusieurs facteurs qui étaient présents durant l'expérience. L'ordre de recherche des symboles inclut les symboles des bibliothèques liés à l'exécutable, qui est prioritaire, est suivi de `libssl.so` et `libcrypto.so` de OpenSSL1.1. Dans ce cas, il était possible de résoudre ce problème en ajoutant une dépendance directe à *libcrypto* lors de la construction des bibliothèques Scheme RSA comme montrée dans la figure 3.11.

```
gsc -o rsa-1-0-0.o1 \  
-cc-options '-I /usr/include/openssl-1.0' \  
-ld-options '-L /usr/lib/openssl-1.0 -lssl' \  
-prelude '(define-cond-expand-feature|openssl-v10|)' rsa.scm  
  
gsc -o rsa-1-1-0.o1 \  
-ld-options "-lssl" rsa.scm
```

**Fig. 3.10.** Création des bibliothèques *rsa.scm* pour OpenSSL1.0 et OpenSSL1.1 sans la spécification de *libcrypto.so*

```
gsc -o rsa-1-0-0.o1 \  
-cc-options '-I /usr/include/openssl-1.0' \  
-ld-options '-L /usr/lib/openssl-1.0 -lssl -lcrypto' \  
-prelude '(define-cond-expand-feature|openssl-v10|)' rsa.scm  
  
gsc -o rsa-1-1-0.o1 \  
-ld-options "-lssl -lcrypto" rsa.scm
```

**Fig. 3.11.** Création des bibliothèques *rsa.scm* pour OpenSSL1.0 et OpenSSL1.1 avec la spécification de *libcrypto.so*



**Fig. 3.12.** Schéma des dépendances entre les bibliothèques au sein d'un processus. Les dépendances qui ont été liées dynamiquement durant la création de l'application sont représentées par une flèche avec trait plein sans annotation. Ceux qui représentent les chargements de bibliothèque dynamique via `dlopen` ont l'annotation *dl*. La flèche en pointillé indique un masquage des symboles de la bibliothèque source par une ligne pointée.

### 3.3.3. Bibliothèque JavaScript (NodeJS)

Des tests similaires ont été effectués avec les bibliothèques JavaScript pour montrer la coexistence de bibliothèques dans un langage interprété.

Pour effectuer des tests sur la coexistence de différente version d'une bibliothèque JavaScript dans NodeJS, il faut tout d'abord permettre l'importation de plusieurs versions d'une même bibliothèque. Dans NodeJS, l'importation de modules s'effectue avec la fonction `require(module-name)`. Puisque l'information de version de la bibliothèque n'est pas fournie en paramètre à la fonction, il faut donc utiliser une autre méthode pour forcer plusieurs versions des bibliothèques. La configuration d'un module dans NodeJS utilise le format JSON pour spécifier le nom, la version, les dépendances, etc.

Les dépendances sont conservées sous la forme d'un arbre, chaque module à ses dépendances directes qui ont aussi des dépendances indirectes. Lors de l'écriture d'un module JavaScript, il est possible de spécifier la version de chaque dépendance dans le fichier *package.json*.

```
{  
  ...  
  "dependencies": {  
    "express": "4.16.3"  
  },  
  ...  
}
```

En utilisant cette fonctionnalité du système de module de NodeJS, deux bibliothèques *wrapper* sont écrites pour interfacer les deux versions de express. Puisque l'API public d'express n'a pas changé entre les versions 3.21.1 et 4.16.3, il est possible de recycler le code de la bibliothèque qui encapsule une version d'express (figure-3.13).

Le programme principal ne fait qu'importer les deux encapsulations de bibliothèque et invoque la fonction *start*.

Le résultat attendu dans cette expérience est que ces deux versions de la bibliothèque express coexistent sans problème, sauf dans le cas où le port TCP utilisé par les deux versions est le même. Si le port TCP est le même, c'est la bibliothèque dont la fonction *start* a été invoquée en premier qui va monopoliser le port TCP. Dans ce cas la ressource qui inhibe la coexistence de ces modules au sein d'un même processus est liée au *socket*.

### 3.3.4. Variables globales communes

Les bibliothèques au sein d'une application sont chargées de façon unique. Puisqu'il n'existe qu'une seule instance de chaque bibliothèque dans un processus, les variables globales d'une bibliothèque sont partagées. Ces variables composent l'état de la bibliothèque.

```

const express = require('express');

function start() {
  const app = express();
  const port = Math.floor(Math.random() * 64535 + 1000);

  app.get('/', (req, res) => {
    res.send('Hello_world!\n');
  });

  app.listen(port, 'localhost', () => {
    console.log('Listen_on_port_' + port);
  });
}
exports.start = start;

```

**Fig. 3.13.** Structure du module JavaScript utilisé comme proxy vers deux version de la bibliothèque `express`.

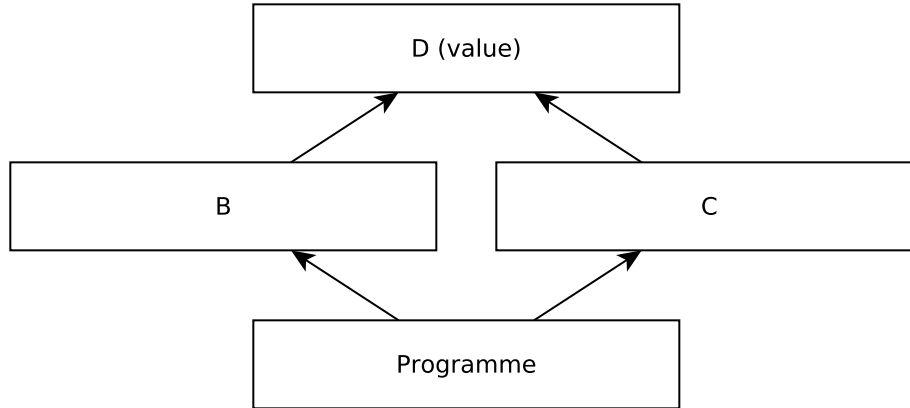
L'expérience définit 3 bibliothèques B, C et D. La bibliothèque D exporte une variable globale. Les bibliothèques B et C dépendent de D. Le programme principal utilise les bibliothèques B et C. La figure 3.14 est une représentation graphique des dépendances présente dans l'expérience.

La notation `X.Y.val` exprime une référence à la variable `val` de Y à partir de la bibliothèque X.

Les étapes exécutées par le programme dans l'expérience sont les suivantes:

- (1) charge les bibliothèques B et C;
- (2) affiche le contenu de `B.D.value` et `C.D.value`;
- (3) modifie le contenu de `B.D.value`;
- (4) affiche le contenu de `B.D.value` et `C.D.value`.

L'expérience indique si la référence à la variable globale `value` défini dans D est partagé entre les bibliothèques B et C. Les valeurs de `B.D.value` et `C.D.value` doivent être égales



**Fig. 3.14.** Le graphe de dépendance des bibliothèques B, C et D avec l'application **Programme**.

à l'étape 2. Les variables sont partagées si la condition `B.D.value == C.D.value` est vraie après l'étape 3 de l'expérience.

```
1- B.D.value: 0,  C.D.value: 0
2- set B.D.value 42
3- B.D.value: 42,  C.D.value: 42
```

**Fig. 3.15.** Les résultats de l'expérience avec des bibliothèques natives du système d'exploitation sous Linux.

Le résultat de l'expérience de la figure 3.15 montre que chacune des variables globales d'une bibliothèque partagée existe qu'en une seule instance.

### 3.4. Conclusion

Ce chapitre a traité du fonctionnement de l'éditeur de lien et des bibliothèques dynamiques. Des expériences ont été effectuées pour déterminer les conditions sous lesquelles des bibliothèques dynamiques peuvent coexister. Les résultats des expériences nous ont permis de déterminer que les bibliothèques dynamiques sont en conflit lorsqu'ils exportent les mêmes identifiants ou utilisent des ressources communes (e.g. clavier, souris). Nous avons aussi déterminé que l'utilisation de variables globales peut entraîner des problèmes de coexistence entre des bibliothèques. Ils apparaissent dans plusieurs langages de programmation interprétés. Les états globaux dans une bibliothèque doivent être évités. Ces conflits présents

dans les bibliothèques dynamiques du système d'exploitation peuvent être propagés par la FFI du langage de programmation.

Le système de module que nous avons développé pour Scheme permet en principe la coexistence de différentes versions d'un module Scheme. Cependant, si la FFI est utilisée pour interfacer à des bibliothèques dynamiques du système d'exploitation qui ne peuvent pas coexister cela va indirectement empêcher la coexistence des modules en qui en dépendent. C'est un problème incontournable qu'il faut garder à l'esprit lors de la conception des modules Scheme.



# Chapitre 4

---

## Implémentation des modules

Ce chapitre traite de notre implémentation des modules dans Gambit qui se veut éventuellement portable entre les différentes implémentations de Scheme. Notre approche des modules se base sur la syntaxe de R7RS. Notre implémentation des modules utilise des formes déjà existantes et aussi de nouvelles formes qui ont été ajoutées au besoin. Ces nouvelles formes nous ont permis d'intégrer la syntaxe des modules R7RS avec les modules primitifs de Gambit. Il y a deux façons d'écrire des modules. Les modules primitifs sont utilisés pour implémenter des fonctionnalités système dans Gambit, par exemple, un module qui implémente une nouvelle syntaxe. La syntaxe des modules R7RS est utilisée lorsqu'un module se veut compatible avec d'autres implémentations du langage de programmation Scheme supportant R7RS.

Les formats des modules R7RS, construits avec `define-library`, contiennent plusieurs composantes. L'espace de nom du module qui regroupe toutes les fonctionnalités. Une liste des modules qui sont utilisés par le module courant. Une liste des symboles exportés par le module. Il est possible de modifier les identifiants d'un module lors de l'importation et de l'exportation. L'importation multiple d'un module doit correspondre à un seul chargement. Pour exprimer les relations entre les modules certaines formes spéciales ont été ajoutées dans Gambit. Si les concepteurs de bibliothèques respectent la syntaxe R7RS, alors il est possible de l'importer dans Gambit. C'est indépendant du système Scheme pour lequel les bibliothèques ont été écrites.

## 4.1. La forme `##namespace`

Les espaces de nom sont gérés avec une forme spéciale propre à Gambit. Cette forme se nomme `##namespace` et permet d'associer des identifiants à d'autres identifiants. Cette forme primitive est présente dans Gambit depuis longtemps. Un espace de nom se compose de n'importe quelle séquence de caractère terminé par un `#`. Il y a seulement l'espace de nom vide qui est une exception à cette règle et c'est l'espace de nom par défaut. Les associations de symboles données par la forme `##namespace` respectent la portée lexicale. Il y a trois types d'opérations avec les espaces de nom.

Il y a les espaces de nom global qui s'applique à tous les symboles qui ne contiennent pas de `#`.

```
(##namespace ("<ns>"))  
;; <symbol-name> => <ns><symbol-name>
```

**Fig. 4.1.** Namespace Global

Il est possible de spécifier la liste des symboles qui sont affectés par la déclaration d'espace de nom. À partir de la syntaxe de la figure 4.1, il suffit d'ajouter les symboles après le nom de l'espace de nom.

```
(##namespace ("<ns>" A B ...))  
;; A => <ns>A  
;; B => <ns>B  
;; ...
```

**Fig. 4.2.** Namespace Set

La forme `##namespace` permet aussi d'associer un identifiant à un autre identifiant dans un espace de nom donné. Chaque association est marquée par une paire qui crée un alias entre le premier élément et le second. Par exemple, la paire (`<old>` `<new>`) remplace `<old>` par `<ns><new>`.

```
(##namespace ("<ns>" (<old> <new>) ...))  
;; <old> => <ns><new>  
;; ...
```

**Fig. 4.3.** Namespace Rename

Cette forme est utilisée pour créer un espace distinct pour chaque module. Cela permet d'éviter les conflits de nom entre les identifiants des modules. Chaque module commence par déclarer son espace de nom suivi des définitions des procédures du module. Les différentes formes d'espace de noms sont données par les figures 4.1, 4.2 et 4.3.

```
;; hello.scm  
(##namespace ("hello#" hi))  
(define (hi)  
  (display "Hello, world!\n"))  
(hi)
```

**Fig. 4.4.** Module Hello

L'exemple 4.4 est un exemple d'utilisation de la forme `##namespace` pour créer un espace pour le module `hello`. La procédure `hi` est dans l'espace de nom `hello#`.

## 4.2. La forme `##demand-module` et `##supply-module`

Le mécanisme de chargement des modules est géré par la forme spéciale `##demand-module`. Cette forme indique au système de charger un module s'il n'est pas déjà chargé. Cette forme gère le chargement multiple d'un module. Elle est utilisée pour importer la liste des modules requis par le module courant. Le fonctionnement de cette forme est similaire à la procédure `load` avec quelques différences. La forme `##demand-module` est une macro qui génère une expression vide. L'effet de cette forme agit après la phase d'expansion des macros. Le paramètre passé à `##demand-module` doit être un symbole qui correspond au nom du module. La procédure `load` requiert le chemin complet vers le fichier à charger.

Il est à noter que l'ordre des `##demand-module` correspond à l'ordre dont les modules sont visités. Cette forme agit, peu importe son emplacement où l'expansion de macros est appliquée.

Une forme spéciale conjointe au `##demand-module`, qui indique le nom symbolique des modules importés des modules exportés. Cette forme spéciale est `##supply-module`, elle accepte comme paramètre le nom du module exporté par l'entité courant. La syntaxe de ces deux formes dans la figure 4.5.

```
(##demand-module <module-ref>)  
(##supply-module <module-ref>)
```

**Fig. 4.5.** Syntaxe des formes `demand-module` et `supply-module`

#### 4.2.1. Les méta informations

Il est utile d'attacher à un module des informations qui sont accessibles lors de l'expansion et même la compilation. Ces informations sont spécifiées par la forme `##meta-info`. Cette forme accepte au moins un paramètre qui correspond au nom de la méta information, le reste des paramètres est la valeur associer à la méta donnée.

```
(##meta-info <name> <value>)  
(##meta-info <name> <value> ...)
```

Les méta informations sont utilisées pour donner des paramètres de compilation du module. Les différentes méta informations sont `cc-options`, `ld-options`, `ld-options-prelude`, `pkg-config` et `pkg-config-path`. Ces méta informations ne sont utiles que pour les modules compilés.

- Les `cc-options` sont ajoutés aux options de la commande qui invoque le compilateur C.
- Les méta informations `ld-options` et `ld-options-prelude` composent les paramètres de la commande qui invoque l'éditeur de lien. Les paramètres dans `ld-options-prelude` précèdent ceux qui sont dans `ld-options`.

- `pkg-config` contient le nom des bibliothèques C à être liées au module Scheme. Les options nécessaires pour le compilateur C sont déterminées automatiquement par l'utilitaire `pkg-config`.
- `pkg-config-path` ajoute des répertoires à la variable d'environnement `PKG_CONFIG_PATH` qui est utilisée par l'utilitaire `pkg-config`.

### 4.3. Implémentation des modules primitifs

Un module primitif est généralement constitué d'un fichier d'entête avec la déclaration de l'espace de nom et les définitions de macros et un fichier contenant les procédures. Dans Gambit les fichiers d'entête sont marqués par un `#` juste avant l'extension, tel que `angle2/angle2#.scm`.

- `<name>#.scm` est la structure du nom fichier d'entête. Ce fichier contient des déclarations d'espace de nom et des définitions de macros.
- `<name>.scm` est la structure du nom du fichier qui contient les procédures du module.

Le nom des fichiers doit correspondre à la dernière partie du nom de module. Par exemple, le module primitif `angle2` doit inclure les fichiers `angle2/angle2.scm` et généralement `angle2/angle2#.scm`.

```
;; angle2/angle2#.scm
(##namespace ("angle2#" deg->rad rad->deg))

;; angle2/angle2.scm
(include "angle2#.scm")
(##namespace ("angle2#" factor))
(##supply-module angle2)
(define factor (/ (atan 1) 45))
(define (deg->rad x) (* x factor))
(define (rad->deg x) (/ x factor))
```

**Fig. 4.6.** Écriture d'un module qui implémente une pile. Ce module est séparé en 2 fichiers. Le fichier `angle2/angle2#.scm` contient les exportations et `angle2/angle2.scm` contient l'implémentation des fonctions.

Dans l'exemple de la figure 4.6, il y a dans `angle2/angle2.scm` l'inclusion du fichier d'entête `angle2/angle2#.scm` qui ajoute une déclaration redondante de l'espace de nom dans ce cas. La déclaration `(##namespace ("angle2#"))` implique l'espace de nom ajouté par l'inclusion du fichier d'entête. Il est possible que l'espace de nom déclaré dans `angle2/angle2#.scm` soit différent de celui utilisé dans `angle2/angle2.scm`.

La forme `##namespace` dans l'exemple 4.6 s'applique aux identifiants suivants:

```
factor      --> angle2#factor
deg->rad    --> angle2#deg->rad
rad->deg    --> angle2#rad->deg
```

#### 4.3.1. La forme `##import`

L'importation des modules est effectuée par la forme `##import` qui effectue deux actions, l'inclusion du fichier `<name>#.scm` et un chargement des définitions. La forme `##import`, comme `##demand-module` s'occupe de trouver l'emplacement du fichier d'entête à partir du nom du module. Elle génère le `##include` du fichier d'entête s'il existe et un `##demand-module` du module. L'importation `(##import angle2)` est équivalente à:

```
(##include "/un/chemin/angle2/angle2#.scm")
(##demand-module angle2)
```

**Fig. 4.7.** Expansion de `(##import angle2)`

## 4.4. Implémentation des modules R7RS

Pour que le système de module soit compatible avec d'autres implémentations de Scheme, les modules de haut niveau sont définis dans le standard R7RS Small [20]. Les modules sont définis par la forme `define-library` dont la syntaxe est donnée par la figure 2.6. Les formes `define-library` et `import` sont expansées dans les formes spéciales utilisées par les modules primitifs. L'élément qui distingue un module primitif et un module R7RS est donc l'utilisation de la forme `define-library`.

#### 4.4.1. Expansion du `import`

L'expansion de la forme `import` dépend du type de module qui est importé. L'importation d'un module primitif est différente de l'importation d'un module R7RS. Gambit permet l'importation d'un module primitif en utilisant la même forme que pour les modules R7RS. Les capacités du `import` dépendent de sa provenance, s'il est dans un `define-library` ou dans un programme principal. Dans le cas d'un `define-library` le `import` supporte l'importation relative, qui est une extension de Gambit.

##### 4.4.1.1. *Importation d'un module primitif*

L'importation d'un module primitif limite la syntaxe du `import`. Il n'est pas possible d'utiliser les extensions `only`, `except` et `rename` sur un module primitif présentement. Le `import` R7RS se rabat sur le `##import` des modules primitifs qui ne supporte pas les extensions R7RS. Cela permet d'utiliser des modules primitifs dans un contexte R7RS.

```
;; expansion of (import (termite))  
(##import termite)
```

**Fig. 4.8.** Expansion du `import` d'un module primitif

##### 4.4.1.2. *Importation d'un module R7RS*

L'importation d'un module R7RS est expansée en au plus trois parties. Un `##demand-module` qui s'occupe de charger l'implémentation des procédures du module. Une déclaration d'espace de nom qui donne accès aux identifiants que le module exporte. L'implémentation des macros qui sont exportées du module.

L'instruction de chargement du module est générée dans tous les cas qu'un module définit des procédures. Un module qui ne définit que des macros ne nécessite pas d'être chargé durant l'exécution seulement dans le contexte d'expansion des macros. L'importation d'un module R7RS qui ne contient qu'une déclaration `export` ne nécessite pas d'être chargé durant l'exécution. Ce type de module est utilisé pour exporter les fonctionnalités déjà implémentées dans Gambit dans un contexte R7RS.

La forme utilisée pour rendre disponible l'ensemble des identifiants importés est `##namespace`. L'ensemble des identifiants importés dépend de la forme du `import`. Par défaut, tous les identifiants exportés par le module sont importés. Les opérateurs `only` et `except` affectent le nombre d'identifiants importés. Les opérateurs `prefix` et `rename` affectent le nom des identifiants. Dans l'exemple 4.9, l'importation inclut l'ensemble des identifiants exportés par le module. L'ensemble des formes `##namespace` générées par un `import` est donné par la figure 4.10.

```
;; expansion of (import (github.com/gambit/hello))
(##demand-module github.com/gambit/hello)
(##namespace ("github.com/gambit/hello#" hi salut))
;; macros
```

**Fig. 4.9.** L'exemple de l'expansion du `import` du module R7RS `github.com/gambit/hello` qui exporte les procédures `hi` et `salut`.

```
;; (import (only (github.com/gambit/hello) hi))
(##namespace ("github.com/gambit/hello#" hi))

;; (import (except (github.com/gambit/hello) hi))
(##namespace ("github.com/gambit/hello#" salut))

;; (import (prefix (github.com/gambit/hello) m-))
(##demand-module github.com/gambit/hello)
(##namespace ("github.com/gambit/hello#" (m-hi hi) (m-salut salut)))

;; (import (rename (github.com/gambit/hello) (hi howdy)))
(##namespace ("github.com/gambit/hello#" (howdy hi) salut))
```

**Fig. 4.10.** Différents `##namespace` générés par l'expansion du `import` d'un module R7RS.



#### 4.4.2. Expansion du `define-library`

La forme `define-library` est expansée dans les formes qui composent un module primitif. Chacune des déclarations de la bibliothèque est utilisée dans l'expansion du `define-library`. La déclaration d'exportation est valide si tous les identifiants exportés sont distincts. Une déclaration `export` qui exporte un identifiant plusieurs fois cause une erreur de syntaxe. Les informations sur les identifiants exportés ne sont pas utilisés lors de l'expansion du `define-library`, mais lors de l'importation de cette bibliothèque. Les déclarations `import` sont expansées de la même façon que dans des programmes principaux.

```
(define-library (hello)
  (import (scheme base) (scheme write))
  (export hi salut)
  (begin
    (define (exclaim msg1 msg2)
      (display msg1)
      (display msg2)
      (display "!\n"))
    (define (hi name) (exclaim "hello " name))
    (define (salut name) (exclaim "bonjour " name))
    ;; it is best for a library to not have side-effects...
    #;(salut "le monde")))
```

**Fig. 4.11.** Le code source du module `github.com/gambit/hello` avant l'expansion.

##### 4.4.2.1. *Extensions de Gambit*

Gambit offre des extensions au `define-library` et au `import`. L'importation dans le contexte d'une bibliothèque peut être relative au module courant. Plusieurs déclarations supplémentaires ont été ajoutées dans la forme `define-library`.

- `namespace`
- `cc-options`

```
;; expansion of (define-library (hello) ...)
(##declare (block))
(##supply-module github.com/gambit/hello)
(##namespace ("github.com/gambit/hello#"))
(##namespace ("" define ...))
(##namespace (" write-shared write display write-simple))
(define (exclaim msg1 msg2)
  (display msg1) (display msg2) (display "!\n"))
(define (hi name) (exclaim "hello " name))
(define (salut name) (exclaim "bonjour " name))
(##namespace (""))
```

**Fig. 4.12.** Expansion de la forme **define-library** du module `github.com/gambit/hello`.

- `ld-options` et `ld-options-prelude`
- `pkg-config` et `pkg-config-path`

La figure 4.13 est un exemple d'importation relative. L'importation relative part du `module-ref` du module courant. Un `import` de `(.. C)` à partir du module `(A B)` correspond à l'importation de `(A C)`. Cela permet au sous-module de tests unitaires de référer au module principal en préservant le `module-ref` avec la version.

```
(define-library (A B)
  (import (.. C)) ;; => (import (A C))
  (import (..))) ;; => (import (A))
```

**Fig. 4.13.** Exemple d'importation relative du module

La déclaration `namespace` permet de forcer l'espace de nom d'un module. L'utilisation primaire de cette déclaration est l'implémentation de modules qui exporte les fonctionnalités déjà implémentées dans Gambit.

Les déclarations `cc-options`, `ld-options`, `ld-options-prelude`, `pkg-config` et `pkg-config-path` permet d'ajouter des éléments dans les méta informations respectifs.

```
(define-library (scheme case-lambda)
  (namespace "")
  (export
case-lambda
  ))
```

**Fig. 4.14.** Implémentation de la bibliothèque système (`scheme case-lambda`).

## 4.5. Conclusion

Notre implémentation des modules utilise une forme compatible avec les autres implémentations de Scheme R7RS. En plus, les extensions que nous avons ajoutées offrent une interface avec les modules système de Gambit. L'implémentation actuelle des modules est suffisante pour permettre la diffusion de code, car elle offre des identifiants uniques pour les modules.

Notre approche supporte la création de modules qui dépendent de bibliothèques du système d'exploitation. Cela est réalisé par les extensions de la forme `define-library` et par la FFI de Gambit.

# Chapitre 5

---

## Modèle de chargement

Ce chapitre traite des mécanismes de chargement implémenté pour le système de module. Dans notre implémentation, les modules sont référés par un nom symbolique plutôt que leur emplacement sur le système de fichier. Elle garantit l'ordre dans lequel ils sont chargés et aussi le chargement unique de chaque module. Pour permettre la diffusion des modules, nous avons ajouté un mécanisme d'installation automatique et de chargement des modules à la volée.

Un système est composé d'un ensemble de modules qui interagissent entre eux. L'interaction entre les modules est dans un contexte statique ou dynamique. Dans le contexte statique, les modules sont incorporés au sein de l'application, ils n'ont pas besoin d'être chargés. Dans le contexte dynamique, les modules sont externes à l'application et requièrent un chargement dynamique. Le chargement dynamique de modules est une partie importante dans un système de modules, il permet l'utilisation de modules externes.

La diffusion des modules requiert que le chargement de modules qui ne sont pas encore installés soit effectué durant l'exécution.

### 5.1. Chargement des bibliothèques

Le chargement d'une bibliothèque Scheme (ou module) dans Gambit est séparé en plusieurs niveaux. Il y a la phase de recherche du module et de ses dépendances qui valide la présence, sur le système de fichier ou en mémoire, de tous les modules nécessaires. Ensuite, le module et ses dépendances sont chargés dans un ordre qui respecte les relations de dépendance. Un module est soit sur le système de fichier ou déjà en mémoire. L'emplacement

des bibliothèques sur le système de fichier est lié par défaut aux chemins spécifiés par le `##module-search-order` qui a comme défaut `~~lib` et `~~userlib`.

La procédure exacte de chargement des bibliothèques par `import` n'est pas spécifiée par le standard R7RS. Le standard spécifie seulement une syntaxe de base et le comportement principal qui est requis. L'importation d'une bibliothèque doit charger la bibliothèque et rendre ses fonctionnalités disponibles dans le contexte où l'importation a eu lieu (qui peut soit venir d'un programme principal ou d'une bibliothèque).

Le chargement d'une bibliothèque peut-être effectuée à l'exécution par l'utilisation de `eval` (par `load`) pour les fichiers source et `load-object-file` pour les bibliothèques compilées. Cette recherche peut aussi avoir lieu durant l'édition des liens en utilisant les méta-infos contenues dans les fichiers `.c` qui sont chacun compilés par le compilateur C en `.o` et lié par l'éditeur de lien.

## 5.2. Modèle statique

Le modèle de bibliothèque statique consiste à intégrer la bibliothèque dans le fichier exécutable de l'application finale. La bibliothèque n'a donc pas besoin d'être chargée durant l'exécution. L'avantage du modèle statique est sur le plan du déploiement. Puisque toutes les dépendances sont dans l'application finale, il suffit de distribuer celui-ci. Le compilateur Gambit supporte un modèle statique pour des programmes simples. Compiler une application liée statiquement est possible de façon manuelle. Pour lier statiquement deux fichiers Scheme simples, il suffit d'invoquer le `gsc` comme suit:

```
$ gsc -exe file1.scm file2.scm
```

Un des problèmes du modèle statique est le coût lié à la maintenance. Les programmes qui utilisent des bibliothèques statiques ne permettent pas une construction modulaire. La mise à niveau d'une des bibliothèques statiques nécessite la recompilation du programme au complet. En plus, cela n'est pas adapté pour des applications évolutives qui peuvent être étendues par l'utilisateur. Une solution qui a été adoptée est le modèle dynamique, présenté dans la prochaine section. Cela offre une plus grande flexibilité dans le déploiement des programmes.

### 5.3. Modèle dynamique

Dans le modèle dynamique, chaque module externe est séparé durant l'exécution. L'application contient les informations pour accéder aux fonctionnalités des modules durant l'exécution. Le déploiement d'une application nécessite la distribution de toutes les dépendances directes et indirectes. Les bibliothèques partagées offrent plusieurs avantages par rapport aux bibliothèques statiques.

Dans ce modèle les bibliothèques sont liées au programme durant l'exécution. Cela nécessite que les bibliothèques soient organisées sur le système de fichier d'une façon distinguable. Chaque module doit posséder un nom unique qui permet d'y référer. Ce nom unique va être utilisé lors de la collection des dépendances.

La recherche des bibliothèques est effectuée dans un ordre spécifique indépendant de la spécification. L'algorithme de recherche des bibliothèques prend en paramètre le nom de la bibliothèque et retourne le chemin absolu correspondant à son emplacement dans l'arborescence du système de fichier. Les bibliothèques sont situées dans différents répertoires: le répertoire des bibliothèques système (`~~lib`) et le répertoire des bibliothèques utilisateur (`~~userlib`) ou des répertoires explicitement ajoutés au «module search order».

Chaque module possède trois niveaux d'initialisation dans le système numérotés de 0 à 2. Le niveau 0 indique que le module est collecté en mémoire, mais non initialisé. Le niveau 1 indique que l'initialisation de bas-niveau a été complétée et que le descripteur Scheme du module a été récupéré. Le niveau 2 marque les modules chargés dont toutes les définitions et expressions au niveau principales («top level») ont été évaluées et donc le module est prêt à être utilisé.

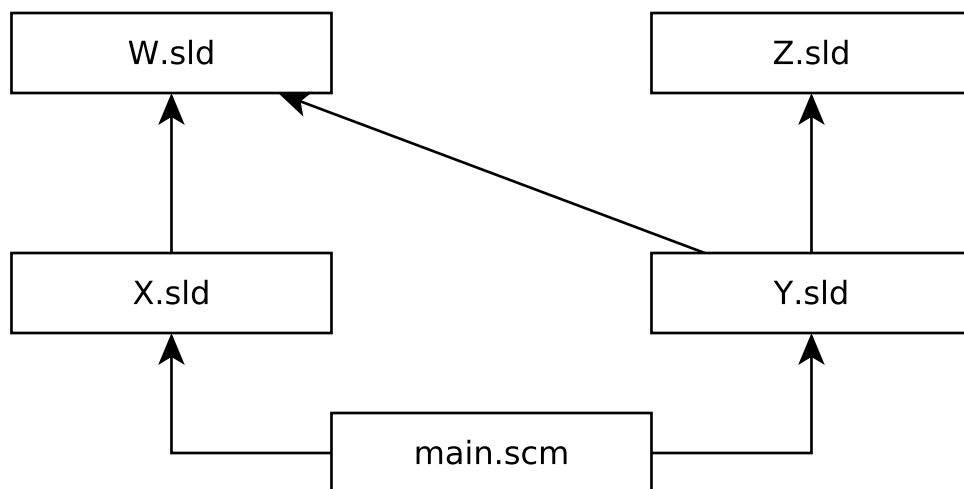
Dans l'exemple à la figure 5.2, l'exécution du module principal **main.scm** déclenche la collection des modules X et Y, qui récursivement déclenche la collection de W et Z. L'algorithme de collection des modules gère les modules qui apparaissent plusieurs fois au sein du graphe et les cycles. Après la collection de tous ces modules, le descripteur de module est récupéré par un appel aux primitives du système d'exploitation si compilé.

```

> (define mods (##collect-modules '(_zlib)))
> mods
((#(_digest 0 (#(_digest) #() () 1 #<procedure #2> ...))
  #(_zlib 0 (#(_zlib) #(_digest) () 1 #<procedure #4> ...)))
> (##init-modules mods)
#t
> ##registered-modules
((#(_digest 2 (#(_digest) #() () 1 #<procedure #2 _digest#> ...))
  #(_zlib 2 (#(_zlib) #(_digest) () 1 #<procedure #4 _zlib#> ...))
  ...))

```

**Fig. 5.1.** Un exemple qui montre la collection des modules à partir du module `_zlib` suivit de l'initialisation des modules collectés. La collection des modules est effectuée par la procédure `##collect-modules`. L'ensemble des modules retournés sont initialisés par la procédure `##init-modules`. Les enregistrements des modules `_zlib` et `_digest` ont été ajoutés à la liste des modules enregistrés (variable `##registered-modules`).



**Fig. 5.2.** Un exemple d'un système fictif composé de différents modules. Le module principal se nomme **main.scm** avec l'extension **.scm** et les bibliothèques ont l'extension **.sld**

### 5.3.1. Module compilé dans Gambit

Les modules dans Gambit peuvent être compilés pour plus de performance en bibliothèque dynamique. Les programmes principaux peuvent être compilés en exécutable. Gambit permet l'utilisation de bibliothèques statiques et dynamiques.

```
;; fib.scm
(define (fib n)
  (if (< n 2)
      n
      (+ (fib (- n 1))
          (fib (- n 2))))))
```

**Fig. 5.3.** Un module qui implémente la fonction mathématique `fib` au niveau principal («top level»).

La construction d'une bibliothèque dynamique à partir du fichier `fib.scm` de la figure 5.3 s'effectue par le compilateur de Gambit qui se nomme `gsc`. Cela produit un fichier avec l'extension `.oN` où le `N` correspond à la version générée de la bibliothèque qui commence à 1.

## 5.4. Module hébergé

Un module qui est hébergé est un module dont le code source est stocké sur un serveur de versionnement de source accessible sur le réseau au nœud d'un nom de domaine comme `github.com`. La syntaxe des noms de domaine est inspirée du RFC-2396 [3]. La différence avec la spécification du *hostname* dans le RFC-2396 est que le *hostname* ne peut pas se terminer par un point et doit contenir au moins un `domainlabel`. C'est pour permettre de distinguer un module local et un module hébergé.

### 5.4.1. Installation automatique

L'installation automatique d'un module hébergé dépend du contenu de la *whitelist*. La *whitelist* contient une liste de préfixe utilisé pour valider les `<module-ref>`. La validation consiste à trouver un élément dans la *whitelist* qui correspond à un préfixe du `<module-ref>`.



```

hostname      = ( domainlabel "." )+ toplabel
domainlabel   = alphanum | alphanum ( alphanum | "-" )* alphanum
toplabel      = alpha | alpha ( alphanum | "-" )* alphanum
alphanum      = alpha | digit
alpha         = [a-zA-Z]
digit         = [0-9]

```

**Fig. 5.4.** Grammaire EBNF représentant un hostname selon un sous-ensemble du RFC-2396.

Un élément est considéré un préfixe, si chacune des composantes de l'élément est incluse dans le *<module-ref>* dans le même ordre. L'élément `github.com/gambit` est un préfixe de `github.com/gambit/hello`, car les parties `github.com` et `gambit` font partie du *<module-ref>*. Le module `github.com/gambitXYZ/hello` ne contient pas le préfixe `github.com/gambit`, car `gambit` est différent de `gambitXYZ`.

Par défaut `github.com/gambit` est inclus dans la *whitelist*. Cela implique que tous les modules sous `github.com/gambit` peuvent être installés automatiquement. La *whitelist* peut être modifiée par une option de l'interprète:

```

$ gsi -:whitelist=github.com/foo
> (##os-module-whitelist)
("github.com/gambit" "github.com/foo")

```

En plus de la *whitelist* il y a aussi le mode d'installation. Le mode d'installation indique si l'installation demande une confirmation à l'utilisateur pour l'installation d'un module qui n'est pas dans la *whitelist*. Il y a trois modes d'installation.

- **never:** il y a seulement les modules qui sont dans la *whitelist* qui peuvent être installés.
- **repl:** les modules qui ne sont pas dans la *whitelist* peuvent être installés avec la confirmation textuelle de l'utilisateur s'il y a une *repl*.
- **ask-always:** les modules qui ne sont pas dans la *whitelist* peuvent être installés avec la confirmation textuelle de l'utilisateur.

Le mode d'installation est spécifié par le *runtime option* nommée *ask-install*.

```
$ gsi -:ask-install=always
Gambit v4.9.3

> (import (github.com/frederichamel/semver))
Hosted module github.com/frederichamel/semver is required but is not installed.
Download and install (y/n)? n
*** ERROR IN (stdin)@1.9 -- Cannot find library (github.com/frederichamel/semver)
>
```

**Fig. 5.5.** L'exemple montre le résultat d'une réponse négative lors de l'installation du module qui n'est pas dans la *whitelist*. Il ne se fait pas installer.

## 5.5. Conclusion

Ce chapitre a traité des méthodes de chargement de module et des mécanismes d'installation automatique qui sont requis dans la diffusion des modules. Notre implémentation du chargement des modules garantit le chargement unique des modules dans un ordre qui respecte les dépendances. Ceci est demandé dans l'implémentation des modules Scheme R7RS.

Notre approche nous permet l'installation automatique de modules qui sont inclus dans la *whitelist* lorsque demandé. Cela offre une forme simple de contrôle de sécurité sur les modules qui peuvent s'installer automatiquement sur un nœud du système distribué. Cela offre la diffusion des modules entre les nœuds d'un tel système pour permettre des appels RPC sur un nœud ne connaissant pas le code demandé.

# Chapitre 6

---

## Gestion des modules

Ce chapitre décrit l'organisation des modules sur le système de fichier pour permettre plusieurs versions d'un module. Notre approche est d'associer à chaque version d'un module un répertoire différent. Cela permet de stocker les différentes versions d'un module dans le système de fichier. Nous avons comparé les différentes façons d'organiser les modules dans plusieurs langages comme Python, JavaScript, Go, OCaml. Il est important que l'installation d'un module n'altère pas le bon fonctionnement des autres modules. Le modèle de gestion des modules choisi garantit que les dépendances d'un module sont fixes.

### 6.1. Sommaire

La gestion des modules inclut généralement l'installation, la mise à jour et la désinstallation. L'organisation des modules est un élément important dans la gestion des modules. Les gestionnaires de modules sont présents dans beaucoup de langages tels que Python, Ruby, JavaScript, Common Lisp, Go, etc. Un gestionnaire de module est inclus dans le système Gambit Scheme pour organiser les modules.

Le gestionnaire de module de Gambit Scheme fournit les opérations d'installation, de désinstallation, de mise à jour, de compilation d'un module et l'exécution des tests unitaires du module. Les modules sont versionnés par Git. L'emplacement des modules est spécifié par une liste de répertoires qui inclut les modules système et les modules utilisateur. La gestion des modules est effectuée par le module `_pkg` qui offre les procédures d'installation d'installation et de désinstallation.

## 6.2. Organisation des modules

Les modules sont organisés dans des répertoires donnés par le système Gambit. Ils contiennent l'ensemble des modules internes et actuellement installés sur le système. Il y a trois principaux répertoires spéciaux qui contiennent des modules.

- `~~userlib`: c'est le répertoire qui contient les modules de l'utilisateur, par défaut `.gambit_userlib` dans le répertoire maison de l'utilisateur.
- `~~lib`: c'est le répertoire d'installation de Gambit qui contient les modules système. Les modules dans ce répertoire sont communs à tous les utilisateurs.
- `~~instlib`: c'est le répertoire d'installation des modules. Par défaut, il correspond au répertoire `~~userlib`.

Un module local ou hébergé est identifié de façon unique par un `module-ref`. Un `module-ref` est séparé en trois parties: le `hostname`, le `path` et l'étiquette qui donne la version. La différence entre une référence à un module local et hébergé est la première partie. Dans le cas hébergé, le champ `hostname` contient l'information du nom de domaine qui, dans le cas local, est vide. Le `<tag>` spécifie la version du module avec une référence à un commit du système de révision Git. Un `<tag>` vide réfère à la version de développement du module (à éviter pour le déploiement final). La syntaxe du nom de domaine est donnée par la grammaire à la figure 5.4. La grammaire formelle à la figure 6.1 décrit la syntaxe du `<module-ref>` dans le cas hébergé et local.

<code>&lt;module-ref&gt;</code>	<code>:= &lt;local&gt;   &lt;hosted&gt;</code>
<code>&lt;local-package&gt;</code>	<code>:= &lt;id&gt;</code>
<code>&lt;hosted-package&gt;</code>	<code>:= &lt;hostname&gt;/&lt;id&gt;/&lt;id&gt;</code>
<code>&lt;local-module&gt;</code>	<code>:= &lt;local-package&gt;(/&lt;id&gt;)*&lt;tag&gt;</code>
<code>&lt;hosted-module&gt;</code>	<code>:= &lt;hosted-package&gt;(/&lt;id&gt;)*(@&lt;tag&gt;)?</code>

Fig. 6.1. Grammaire formelle d'un `module-ref`

Le `module-ref` `github.com/gambit/hello` réfère au module `hello` sur le serveur de révision `github.com` dans l'espace `gambit`. Le champ `host` est dans ce cas `github.com/gambit` qui correspond au nom de domaine avec le nom de l'espace sur le serveur.

### 6.2.1. Installation des packages et des modules

Un *package* est un regroupement de modules. L'installation d'un package est faite à partir d'un serveur de révision ou un répertoire local qui est versionné par un système de gestion de versions (git, hg, svn). La syntaxe d'un *package* local est donné par la règle `<local-package>` de la figure 6.1 et la syntaxe d'un *package* hébergé est donné par la règle `<hosted-module>`. Chaque *package* est associé à un répertoire unique.

Les *packages* déployés sont généralement hébergés sur des serveurs de version tels que github, gitlab, bitbucket, etc. Une version d'un module est installée à partir d'un package dans un répertoire distinct. Il est donc possible d'avoir plusieurs versions d'un module installées sur le système de fichier.

L'installation d'un *package* est faite par le module `_vcs` qui offre une interface uniforme aux outils de gestion de versions tels que `git`, `hg` et `svn`. Le processus d'installation est séparé en plusieurs étapes.

- (1) Le *package* est téléchargé dans un répertoire temporaire.
- (2) Le répertoire temporaire est renommé au répertoire prévu de façon atomique.

Cette procédure d'installation garantit qu'un seul processus d'installation peut installer ce package.

L'installation des modules ressemble à celle des **package** par le fait que le contenu du module est installé dans un répertoire temporaire qui est ensuite renommé atomiquement au répertoire associé du module. Cela permet de faire apparaître le module installé de façon atomique.

Tout d'abord, la branche principale du dépôt du *package* est clonée dans un répertoire unique dans le préfixe d'installation qui est par défaut `~~userlib`. L'installation d'un module se fait par la copie de ses fichiers dans le *package* dans un dossier temporaire qui est renommé dans un dossier `@<version>` dans le répertoire du *package*. Le répertoire `@` est utilisé comme version de développement qui change avec les mises à jour du *package*. Plusieurs versions d'un module peuvent coexister dans un même préfixe d'installation, puisque chaque version est associée à un répertoire différent. La version d'un module spécifié par une étiquette au sein du système de gestion de module.

Il est possible d'installer un module par une procédure dans le langage. La procédure `install` du module interne `_pkg` permet l'installation de module, elle accepte deux paramètres: le nom du module et de façon optionnelle le préfixe d'installation. Elle retourne la valeur de vérité vraie (`#t`) si l'installation réussit, sinon elle retourne la valeur de vérité fausse (`#f`).

```
(install mod #!optional dir)
```

L'installation des *package* peut être effectuée en invoquant l'interprète Gambit avec l'option `-install`. Cette option requiert le nom du package. Le répertoire d'installation optionnel est spécifié par l'option `-dir`. Il est possible de spécifier un répertoire local où le *package* est situé. Un paramètre est reconnu comme un répertoire local, s'il termine soit par un `/` ou par un point.

```
$ gsi -install [-dir <path>] [local-dir] package
```

Le répertoire d'installation `<path>` est la racine utilisée pour installer les modules et est spécifié par l'option `-dir`. La racine par défaut est `~~userlib`. Voici un exemple d'installation d'une version spécifique du module `semver` qui implémente la logique du *semantic versioning*. Les figures [6.2, 6.3, 6.4] montrent les différentes façons d'installer d'un *package* en invoquant de l'interprète Gambit.

```
$ gsi -install github.com/frederichamel/semver
```

**Fig. 6.2.** Exemple d'installation d'un *package* hébergé dans le préfixe d'installation par défaut.

```
$ gsi -install -dir /tmp/exemple github.com/frederichamel/semver
```

**Fig. 6.3.** Exemple d'installation d'un *package* hébergé dans le préfixe d'installation `/tmp/exemple`

```
$ gsi -install -dir /tmp/exemple /local/dir/ github.com/frederichamel/semver
```

**Fig. 6.4.** Exemple d'installation d'un *package* dans le préfixe d'installation `/tmp/exemple` à partir du répertoire local `/local/dir/`.

### 6.3. Désinstallation

Il est possible de désinstaller une version d'un module spécifique où le *package* au complet. La désinstallation d'un module consiste à supprimer les fichiers de ce module. Le module `_pkg` offre la procédure `uninstall` qui accepte deux arguments: le nom du module, et de façon optionnelle, le répertoire dans lequel les modules sont situés. Les valeurs retournées par cette procédure sont similaires à la procédure `install`.

```
(uninstall mod #!optional dir)
```

La désinstallation peut être faite en passant l'option `-uninstall` à l'interprète Gambit. Cette option requiert le nom du module et le répertoire des modules à désinstaller.

```
$ gsi -uninstall [-dir <path>] (<module>|<package>)
```

Le répertoire `<path>` est l'emplacement des modules à désinstaller. Le format des arguments pour la désinstallation est le même que pour l'installation. Le répertoire par défaut est le répertoire `~~userlib`.

La désinstallation du module `semver` qui est installé dans le répertoire `/tmp/exemple` est fait par la commande suivante:

```
$ gsi -uninstall -dir /tmp/exemple github.com/frederichamel/semver
```

### 6.4. Mise à jour

Cette opération actualise le *package* courant. Cela donne accès aux nouvelles publications d'un module. Le répertoire `@` est effacé et remplacé par le dernier état de la branche de développement. Pour installer une nouvelle version d'un module, il suffit de faire la mise à jour de la branche master et d'installer la nouvelle version.

```
$ gsi -update [-dir <path>] <package>
```

### 6.5. Tests unitaires

Les tests unitaires exécutés sont dans un fichier conjoint au module. Gambit offre un module de test unitaire nommé `_test`. Il contient plusieurs procédures et macros pour tester le bon fonctionnement d'un module. Les tests unitaires pour un module nommé `A` sont par convention dans le sous-module `A/test`.

```
$ gsi module/test
```

```
*** all tests passed out of a total of N tests
```

La commande affiche le résultat des tests unitaires contenus dans le sous-module test.

## 6.6. Compilation d'un module

La compilation d'un module est faite en passant le nom du module (*<module-ref>*) en paramètre. Le compilateur cherche le module dans les répertoires du `##module-search-order`. Le module est installé au besoin et ensuite compilé dans un sous répertoire. Ce dossier associe la compilation de ce module à la version de Gambit et à la cible (C, JavaScript, ...). La compilation d'un module se fait par la commande suivante:

```
$ gsc <module-ref>
```

L'arborescence du répertoire du module après la compilation du module `_digest` pour le *backend* C est:

```
digest
├── digest@gambit409003@C
│   ├── _digest.c
│   └── _digest.o1
├── _digest#.scm
├── _digest.scm
├── makefile
└── test.scm
```

Il est possible de forcer la compilation d'un module par la présence d'un fichier *module-name.\_must-build\_*. Cette fonctionnalité permet le chargement d'un module qui doit être compilé pour fonctionner.

## 6.7. Comparaison avec d'autres systèmes

L'organisation des modules sur le système de fichier dans Gambit diffère de celui de OCaml, Python et NodeJS. Ceux-ci ne permettent pas l'installation de plus d'une version d'un module directement. Le système de module qui est utilisé dans le langage de programmation Go est le plus similaire à celui dans Gambit.

Un système de module permet la coexistence de plusieurs versions du même module sur le système de fichier s'ils sont considérés comme des modules différents. L'installation d'une



version différente d'un module ne remplace pas la version déjà installée. L'organisation des bibliothèques est importante pour permettre cette coexistence.

La caractéristique que le système de bibliothèque doit avoir pour permettre plusieurs versions d'une bibliothèque est une organisation qui permet de distinguer les différentes versions de la bibliothèque par un chemin unique. La plupart des systèmes de module ne distinguent pas les versions d'un même module et ne permettent l'installation que d'une seule version. Les systèmes de module permettent la gestion de différents préfixes dans lesquels les modules sont installés. Chaque préfixe peut contenir une version différente d'un même module. Pour avoir une nouvelle version d'un module, il faut créer un nouveau préfixe.

	Multiple versions
OCaml	✗
Python	✗
NodeJS	✗
Java	✗
Go	✓

**Fig. 6.5.** Une table qui compare différents systèmes de module sur la capacité d'installer plusieurs versions d'un module. Le système Go permet plusieurs versions d'un module pour des versions incompatibles selon le sémantique de version. La version 1.0.0 coexiste avec la version 2.0.0. La version récente 1.2.0 remplace la vieille version 1.0.1.

### 6.7.1. Organisation de OCaml

Le système de gestion de bibliothèques d'OCaml se nomme OPAM. Ce système permet d'avoir plusieurs environnements distincts contenant chacun un ensemble de versions des bibliothèques. Chaque environnement permet l'installation d'une version spécifique de chaque bibliothèque et est étiqueté avec un nom choisi par l'utilisateur. Un changement d'environnement est effectué par une requête de l'utilisateur `opam switch <envname>`. Il utilise le projet *mancoosi* pour gérer les contraintes de version, les dépendances optionnelles et la gestion des conflits. L'environnement par défaut est lié aux dépôts standard d'OCaml.

### 6.7.2. Organisation de Python

L'organisation des bibliothèques Python ne permet de stocker qu'un (typiquement la dernière) version d'une bibliothèque. Les emplacements des bibliothèques sont modifiés par la variable d'environnement `PYTHONPATH` qui correspond dans Python à la variable `path` de la bibliothèque interne `sys`. Le système de bibliothèque de Python ne permet pas la coexistence de plusieurs versions de la même bibliothèque. Le *package manager* principal de Python est *pip*. L'installation d'une autre version d'une bibliothèque désinstalle ou masque la version déjà installée. Le système de module ne permet pas de référer à deux versions de la même bibliothèque.

```
>>> import sys
>>> print('\n'.join(sys.path))
/usr/lib/python37.zip
/usr/lib/python3.7
/usr/lib/python3.7/lib-dynload
/home/username/.local/lib/python3.7/site-packages
/usr/lib/python3.7/site-packages
```

**Fig. 6.6.** L'ensemble des répertoires qui est utilisé par Python version 3.7 pour organiser les bibliothèques sur un système de type Linux.

Python a le concept équivalent à OCaml de `virtualenv` qui permet d'avoir plusieurs versions installées sur la même machine. Cela permet d'installer des bibliothèques dans un environnement isolé des autres. L'avantage est qu'il est possible d'avoir une compatibilité avec des logiciels qui utilisent des versions de bibliothèques antérieures. Un inconvénient est qu'il n'y a pas un partage des versions de bibliothèques communes entre les différents environnements, cela a comme effet d'avoir plus d'un exemplaire d'une version de la bibliothèque installée sur le système de fichier. Chaque `virtualenv` ne permet qu'une seule version de chaque bibliothèque d'être installé.

### 6.7.3. Organisation de NodeJS

NodeJS est un interprète JavaScript qui a été conçu pour être exécuté du côté serveur dans un modèle client-serveur. Les bibliothèques sont installées au niveau du projet. Cela

implique que plusieurs projets qui utilisent la même version de la bibliothèque vont référer au même exemplaire de la bibliothèque.

La structure d'une bibliothèque dans NodeJS est décrite par un fichier `package.json` qui contient plusieurs méta données comme le nom, la version, le nom des dépendances, la version des dépendances, la licence sous laquelle la bibliothèque est publiée et plusieurs autres méta données liées à la bibliothèque. Sous NodeJS, les bibliothèques sont gérées par projet plutôt que globalement cela a comme avantage que chaque projet fonctionne avec ses versions des bibliothèques.

#### 6.7.4. Organisation de Java

Les modules en Java sont nommés *package*. Le nom des modules utilise généralement l'inverse d'une URL comme espace de nom. Par exemple, les noms des modules liés aux services Google vont débiter par `com.google`. Cette convention a pour but d'unifier les noms de module. La version des modules n'est pas liée au nom du module dans le cas de Java. Il n'est pas possible de charger deux modules qui utilisent le même espace de nom, comme deux versions d'un même module.

#### 6.7.5. Organisation de Go

L'organisation des bibliothèques dans Go [4] est plus dans un contexte environnement dont la racine est spécifiée par la variable d'environnement `GOPATH` avec un répertoire pour les exécutables compilés (`bin`), un répertoire contenant le code source des différents projets (`src`) et un répertoire pour les objets des modules installés (`pkg`). Chaque paire de systèmes d'exploitation et d'architecture a son propre répertoire dans `pkg`.

Le système Go permet l'installation de plusieurs versions d'un même module dans le même environnement en utilisant le service `gopkg.in`. Il y a deux syntaxes utilisées pour l'URL des modules Go avec `gopkg.in`. Il est possible de spécifier une version spécifique du module lors de l'importation.

gopkg.in/pkg.v3           -> github.com/go-pkg/pkg (branch/tag v3, v3.N, or v3.N.M)  
gopkg.in/user/pkg.v3 -> github.com/user/pkg   (branch/tag v3, v3.N, or v3.N.M)

**Fig. 6.7.** Exemple d'importation de la version v3 du module pkg en utilisant le service

```
gopkg.in.
package main

import (
    hellov1 "gopkg.in/FredericHamel/go-hello.v1"
    hellov2 "gopkg.in/FredericHamel/go-hello.v2"
)

func main() {
    // use hello version 1
    hellov1.Hello("Bob")

    // use hello version 2
    hellov2.Salut("Alice")

    // hellov1.Salut("Eve")
}
```

**Fig. 6.8.** Un exemple qui montre l'importation de deux versions d'un même module en Go. Le module **go-hello** version 2 exporte la fonction **Salut** qui n'existe pas dans la version 1.

## 6.8. Conclusion

Ce chapitre a traité de la gestion des modules. Les opérations du système de modules présentés dans ce chapitre sont l'installation, la désinstallation et la mise à jour. Notre approche de gestion des modules offre correctement la possibilité d'avoir plus d'une version d'un module. Cela empêche les bris de dépendances lors de l'installation de nouveaux modules. L'installation des modules peut-être déclenchés procéduralement ce qui est nécessaire pour diffuser les modules.

```
$GOPATH/  
- bin  
  - ... binaries  
- src  
  - github.com  
    - UserName1  
      - project1  
      - project2  
    - UserName2  
      - projectA  
      - projectB  
- pkg  
  - linux_amd64  
    - pkglist  
    - objets
```

**Fig. 6.9.** Arborescence des fichier dans le gopath.

# Chapitre 7

---

## Migration de code

Ce chapitre traite du mécanisme de diffusion de modules qui est utilisé dans la migration de code. Notre approche exploite la sérialisation des objets Scheme, le langage Termite et l'installation automatique des modules durant l'exécution.

### 7.1. Systèmes distribués

Les systèmes distribués sont constitués d'un ensemble de nœuds interconnectés de calculs. Les nœuds interagissent par l'envoi et la réception de message au sein d'un réseau de communication. Chaque nœud a un but spécifique. Le *Web* est un exemple notable qui permet d'avoir un aperçu. Il est composé de clients et de serveurs qui exécutent des applications clients et serveurs différentes.

L'implémentation d'un système distribué inclut le développement des applications installé sur les nœuds et la logique d'interaction entre les nœuds. Il est possible de voir l'ensemble des programmes sur les nœuds comme un programme global. Les problèmes discutés dans ce chapitre sont les suivants:

- **RPC:** Comment l'appel distant à une procédure (RPC) implémentée quand l'envoyeur et le receveur ne sont pas conçus ensemble?
- **Mise à jour de code:** Comment la mise à jour du programme d'un nœud est effectuée lors d'un *bugfix* ou lorsqu'une nouvelle version est disponible?
- **Migration de tâche:** Comment déplacer un service sur un nouveau nœud quand le système sous-jacent est sur un système d'exploitation différent, à une architecture différente, etc.?

- **Opération continue:** Comment éviter les interruptions dans les situations précédentes?

Le langage Termit Scheme [11] a été conçu pour simplifier l'implémentation de systèmes distribués et fournit certaines solutions aux problèmes de ces systèmes. Le langage Termit Scheme est fortement inspiré des concepts du langage de programmation d'Erlang avec la syntaxe et la sémantique de Scheme. Une fonctionnalité intéressante qui est absente en Erlang est la capacité d'envoyer une continuation en message. Termit Scheme est implémenté sur le système Gambit Scheme qui offre une façon de sérialiser la plupart des objets Scheme incluant les procédures et les continuations.

La sérialisation de procédures est un outil utile pour implémenter un protocole RPC. En plus des procédures, il est possible de sérialiser des continuations. Une continuation est une structure de donnée qui capture l'état d'un processus. Donc il est possible de transmettre l'état d'un processus sur un autre nœud.

L'implémentation originale de Termit avait certaines limitations lors de la sérialisation des procédures et des continuations. Dans le cas interprété, les procédures et les continuations sont transmises sans problème entre les nœuds. Dans le cas compilé, il faut que chaque nœud possède le code compilé des procédures qui sont transmises.

## 7.2. Le langage Termit

Ce langage, conçu par Guillaume Germain en 2006, est l'implémentation du style de programmation par message d'Erlang dans Gambit Scheme. Les processus sont représentés par les threads de Scheme. La communication entre ces processus est effectuée par un système de boîte de message présent dans Gambit. Chaque thread possède une file d'attente de messages entrants.

Termit expose plusieurs procédures pour gérer les processus et la transmission de message entre chacun des nœuds.

- La procédure (`spawn <thunk> #!key <name>`) permet de créer des processus Termit. Le paramètre `<thunk>` est la procédure principale du thread. Le paramètre `<name>` est un paramètre associatif optionnel.
- La procédure (`! <node> <msg>`) envoie le message `msg` au nœud `node`.

- La procédure (?) permet de recevoir un message envoyé par un autre processus au nœud courant.
- La procédure (!? <node> <msg>) envoie un message au nœud `node` et attend la réponse.
- La macro (recv (<pattern> <expr1> ...) ...) permet un filtrage par motif des messages reçus du nœud courant.

L'ensemble des données transmis sont sérialisées par la procédure `object->u8vector`. La sérialisation d'une procédure contient le nom de celle-ci et un entier qui l'identifie. La figure 7.1 montre un exemple de la sérialisation d'une procédure compilée. Cette représentation est conçue pour être compacte et éviter la redondance dans les données. En plus, elle est indépendante de l'architecture de la machine.

```

> (##subprocedure-id sqrt)
0

> (##subprocedure-parent sqrt)
#<procedure #2 sqrt>

> (##subprocedure-parent-name sqrt)
sqrt

> (object->u8vector sqrt)
#u8(64 92 171 61 6 4 115 113 114 116)
      409003      sqrt
      ↑
subprocedure  Gambit
with id=0     version

```

**Fig. 7.1.** La représentation du résultat de la sérialisation en `u8vector` de la procédure `sqrt`.

### 7.3. *Hook* des procédures inconnues

Le système Termite permet la migration de code compilé avec les procédures `object->u8vector` et `u8vector->object`. Ces procédures effectuent respectivement la sérialisation et la désérialisation. La sérialisation d'une procédure est encodée par le nom de la procédure et un entier qui l'identifie (`id`).

Le nom qualifié de la procédure (i.e. qui contient un #) est composé de l'espace de nom et du nom court. La procédure `_hamt#make-hamt` est dans l'espace de nom `_hamt` et à un nom court `make-hamt`. L'espace de nom dans un module qui est hébergé correspond au



`module-ref` qui est dans le cas des modules hébergés l'URL du dépôt contenant le code du module.

Dans le processus de désérialisation, le nom de la procédure et le `id` sont utilisés pour retrouver la procédure. Un *hook* est invoqué si la procédure n'existe pas dans le processus courant. Le but de ce *hook* est de dynamiquement installer et charger le module qui implémente la procédure inconnue.

## 7.4. Exemple de migration de code

L'exemple d'application est une horloge programmable implémentée en Scheme avec Termit. C'est un exemple de migration de tâche qui contient du code non présent sur le nœud destination. Cette horloge offre un API simple:

- La modification du fuseau horaire est faite en envoyant un message (nombre entier).
- Le message `timezone-get` permet de récupérer le fuseau horaire courant.
- Le message `update-code` permet la mise à jour dynamique du code du serveur.
- Tous les autres messages sont rejetés par le serveur.

Le code exécuté par la boucle principale est présent dans la figure 7.3. L'affichage de l'heure est actualisé à une fréquence constante. Le serveur démarre un nœud Termit qui exécute la boucle de la figure 7.3.

## 7.5. Conclusion

Ce chapitre présente le mécanisme de diffusion des modules utilisés dans la migration de code. L'exemple de l'horloge montre une application de mise à jour dynamique du code qui est possible grâce au mécanisme de diffusion du code. Notre implémentation de ce système permet l'installation de la nouvelle version d'un module qui répare un bug dans l'application `termite-clock` dans arrêter l'application.

Ce mécanisme est utile pour mettre à jour un serveur évolutif sans l'interrompre. Notre approche permet la diffusion de modules entre les nœuds d'un système distribué.

```

;; clock-app.scm
(import (termite))
(import (github.com/frederichamel/termite-clock @v1))

;; Should be integrated in the system.
(##unknown-procedure-handler-set!
  (lambda (name id)
    (let* ((name-str (##symbol->string name))
          (proc/ns (##reverse-string-split-at name-str #\#)))
      (and (##pair? (##cdr proc/ns))
           (let ((mod-name (##last proc/ns)))
             (##load-module (##string->symbol mod-name))
             (let ((proc (##get-subprocedure-from-name-and-id name id)))
               proc))))))

(define node (make-node "0.0.0.0" 3000))
(define (start)
  (node-init node)
  (display "\033[H\033[J") ;; clean screen
  (clock-start 'clock-app)
  (wait-for (resolve-service 'clock-app)))

(start)

```

**Fig. 7.2.** Le code du serveur qui configure la *hook* qui résout les références à des procédures inconnues. C'est effectué avec la procédure `##unknown-procedure-handler-set!`.

```

(define (clock-thread-loop timezone)
  (let tick ()
    (let* ((now (time->seconds (current-time)))
           (next (* 0.5 (floor (+ 1 (* 2 now))))) ;; next 1/2 second
           (to (seconds->time next)))
      (let wait ()
        (recv
         ((from tag timezone) (where (integer? timezone))
          (! from (list tag 'ok)) ;; send confirmation
          (clock-thread-loop timezone))

         ((from tag ('update-code k))
          (! from (list tag 'ok)) ;; send confirmation
          (k timezone))

         ((from tag 'timezone-get)
          (! from (list tag timezone))
          (wait))

         (after to
          (clock-update next timezone)
          (tick))))))

```

**Fig. 7.3.** Le code de la boucle principale de l'horloge programmable.

```
;; config.scm
(define local (make-node "a.local" 3000))
(define remote (make-node "b.local" 3000))

(node-init local)
```

**Fig. 7.4.** Configuration des nœuds qui est utilisé sur les clients.

```
(import (termite))

;; Configure the current node.
(include "config.scm")

;;; Update timezone
(let* ((args (command-line))
      (rest (cdr args)))
  (if (or (null? rest)
        (pair? (cdr rest)))
      (pp (!? (remote-service 'clock-app remote) 0))
      (let ((timezone (string->number (car rest))))
        (pp (!? (remote-service 'clock-app remote) (or timezone 0))))))
```

**Fig. 7.5.** Un programme qui change le fuseau horaire utilisé par l'horloge.

```
(import (termite))  
(import (github.com/frederichamel/termite-clock @v2))  
  
;; Configure the current node.  
(include "config.scm")  
  
(!? (remote-service 'clock-app raspi4)  
    (list 'update-code clock-thread-loop))
```

**Fig. 7.6.** Un exemple de mise à jour du code du serveur par le message `update-code`.

# Chapitre 8

---

## Évaluation

Ce chapitre évalue les performances du système de modules. Notre approche d'évaluation utilise trois programmes de test (benchmarks). Nous avons fait des expérimentations pour comparer les performances de la diffusion de module, que nous avons conçu, dans un contexte compilé avec la diffusion de code interprété déjà présent dans Termite Scheme.

Le but est de prouver que l'utilisation de modules compilés, rendu possible par notre approche, est plus avantageuse au niveau de la performance par rapport à la diffusion de code interprété. Nous avons aussi testé la diffusion des modules entre des nœuds de nature différente (ARM, x86).

### 8.1. Description des expériences

Les expériences exploitent l'installation automatique des modules pour la diffusion. Les performances du système de module sont mesurées en utilisant le temps de téléchargement, de compilation et de chargement des modules. Les modules pour tester les capacités de diffusion de code sont basés sur certains *benchmarks* standard de Scheme présent dans Gambit:

- Puzzle (4K)
- Scheme (40K)
- Compiler (400K)

Nous référons à ces *benchmarks* par leur taille du code source en octets (4K, 40K et 400K).

Les tests de performance sont effectués sur deux nœuds **A** et **B**. Le test de RPC consiste à diffuser une tâche sur le nœud générique **B** qui ne connaît aucun code qui est diffusé dessus.

La diffusion de code est effectuée 100 fois pour chaque benchmark. Le temps d'exécution du benchmark est paramétré de telle sorte que le temps de la version interprétée du benchmark soit proportionnel à sa taille. Le temps respectif de la version interprétée des benchmarks: Puzzle, Scheme et Compiler sont respectivement dans les ordres de 0.1 seconde, 1 seconde et 10 secondes. La première ligne des figures [8.1, 8.2] montre cette tendance dans les temps d'exécutions. Notre but est de montrer un lien entre la taille du programme et le temps d'exécution.

## 8.2. Spécification des machines

Les machines sur lesquelles les tests ont été effectués sont:

- arctic, une machine x86\_64 roulant Linux;
- gambit, une machine x86\_64 roulant macOS;
- tictoc, un Raspberry Pi ARM roulant Linux.

Les spécifications détaillées de ces machines sont présentes à l'annexe A. La diversité des machines utilisées montre que la diffusion de code compilé est indépendante de la plateforme et de l'architecture de la machine.

La machine **arctic** est la machine la plus stable de toutes celles utilisées, car elle a un système de refroidissement au liquide.

## 8.3. Résultats

Les temps dans les tests sont mesurés en millisecondes (ms). Les éléments qui affectent les résultats sont le réseau et la vitesse de la machine de destination. Étant donné que le réseau a perturbé 10% des transmissions effectuées dans l'ensemble des tests dans l'ordre des millisecondes, nous avons enlevé 5% des valeurs minimales et 5% des valeurs maximales pour minimiser l'effet aléatoire du réseau. Cela est observé par une variance élevée dans le temps de transfert. Pour la même taille de transmission, le temps de transfert est plus grand pour plusieurs exécutions.

### 8.3.1. Dépendance entre la taille du module et les temps

Le temps d'installation du module sur le nœud de destination est dépendant de sa taille. Plus un module est gros, plus il prend de temps à s'installer.

	4K	40K	400K
Temps total	150.9( $\sigma = 1.4$ )	978.2( $\sigma = 1.5$ )	12397.7( $\sigma = 5.2$ )
Transfert	5.8( $\sigma = 0.0$ )	11.6( $\sigma = 0.0$ )	54.6( $\sigma = 1.0$ )
Exécution	139.0( $\sigma = 1.3$ )	957.3( $\sigma = 1.3$ )	12274.7( $\sigma = 5.0$ )

**Fig. 8.1.** Comparaison de la performance RPC de Termite avant les modules dans un contexte interprété sur la machine Gambit. (temps en millisecondes)

	4K	40K	400K
Temps total	178.6( $\sigma = 1.4$ )	1033.0( $\sigma = 1.8$ )	12871.0( $\sigma = 18.5$ )
Transfert	6.6( $\sigma = 0.2$ )	13.1( $\sigma = 0.3$ )	50.4( $\sigma = 13.6$ )
Exécution	154.3( $\sigma = 1.1$ )	987.1( $\sigma = 1.5$ )	12559.9( $\sigma = 4.6$ )

**Fig. 8.2.** Comparaison de la performance RPC de Termite avant les modules dans un contexte interprété sur la machine Tictoc. (temps en millisecondes)

	4K	40K	400K
Temps total	1761.6( $\sigma = 84.9$ )	4816.6( $\sigma = 136.5$ )	48609.4( $\sigma = 112.4$ )
Scheme à C	122.7( $\sigma = 4.9$ )	589.6( $\sigma = 4.9$ )	9335.7( $\sigma = 15.7$ )
Compilation C	686.3( $\sigma = 0.0$ )	3102.1( $\sigma = 99.7$ )	36443.8( $\sigma = 53.8$ )
Install	850.4( $\sigma = 17.6$ )	918.6( $\sigma = 82.3$ )	1192.3( $\sigma = 67.4$ )
Transfert	58.1( $\sigma = 63.8$ )	172.0( $\sigma = 60.0$ )	133.5( $\sigma = 77.4$ )
Exécution	9.3( $\sigma = 4.8$ )	0.2( $\sigma = 0.0$ )	1473.0( $\sigma = 9.3$ )

**Fig. 8.3.** Temps d'exécution et transmission de module de différente taille entre les machines Gambit et Arctic. Les modules sont installés automatiquement sur Arctic lors de l'exécution.

Les temps de compilation de Scheme à C et C à langage machine sont stable pour toutes les expériences, puisque les compilations ont tous été effectuées sur le même système **arctic** pour la stabilité d'exécution. Les temps de compilation croissent avec la taille du programme.

Le temps d'exécution ne suit pas la même tendance. Dans les cas compilés, l'expérience 40K est plus rapide que 4K dans l'exécution. Cela s'explique par le fait que certains programmes sont mieux optimisés que d'autres par le compilateur.



	4K	40K	400K
Temps total	1851.8( $\sigma = 93.6$ )	4885.8( $\sigma = 167.9$ )	48656.7( $\sigma = 112.8$ )
Scheme à C	123.3( $\sigma = 5.0$ )	590.1( $\sigma = 5.2$ )	9336.8( $\sigma = 16.3$ )
Compilation C	686.3( $\sigma = 0.1$ )	3068.8( $\sigma = 98.5$ )	36444.8( $\sigma = 54.6$ )
Install	869.8( $\sigma = 56.6$ )	948.1( $\sigma = 98.7$ )	1213.5( $\sigma = 29.4$ )
Transfert	89.1( $\sigma = 64.8$ )	194.0( $\sigma = 66.1$ )	150.7( $\sigma = 79.2$ )
Exécution	10.2( $\sigma = 5.5$ )	0.2( $\sigma = 0.1$ )	1467.6( $\sigma = 9.8$ )

**Fig. 8.4.** Cette expérience est la même que la figure 8.3, sauf que le transfert de module est fait entre une machine ARM (tictoc) et x86 (arctic).

	4K	40K	400K
Temps total	23.6( $\sigma = 0.9$ )	10.5( $\sigma = 0.3$ )	1492.8( $\sigma = 1.9$ )
Transfert	4.8( $\sigma = 0.1$ )	5.7( $\sigma = 0.1$ )	14.2( $\sigma = 0.5$ )
Exécution	14.0( $\sigma = 0.7$ )	0.2( $\sigma = 0.0$ )	1473.5( $\sigma = 1.6$ )

**Fig. 8.5.** Temps d'exécution et de transmission de module de différente taille entre Gambit et Arctic suite à la première exécution (modules compilés déjà installés).

	4K	40K	400K
Temps total	92.6( $\sigma = 15.2$ )	92.9( $\sigma = 5.2$ )	1554.1( $\sigma = 17.3$ )
Transfert	31.7( $\sigma = 1.5$ )	32.9( $\sigma = 1.4$ )	49.0( $\sigma = 1.4$ )
Exécution	19.8( $\sigma = 0.0$ )	0.2( $\sigma = 0.0$ )	1486.6( $\sigma = 2.1$ )

**Fig. 8.6.** Cette expérience est la même que la figure 8.5, sauf que le transfert de module est fait entre un système ARM (tictoc) et x86 (arctic).

Cela respecte la première l'hypothèse qui suppose le temps de compilation de transfert et d'exécution sont dépendant de la taille du module.

### 8.3.2. Comparaison entre les temps interprétés et compilés

Le temps d'exécution total des programmes de tests exploitant la diffusion de code compilé, nécessitant l'installation et la compilation du module, est plus lent que la version interprétée. Le facteur qui prend le plus de temps dans le contexte compilé est l'installation et la

	4K	40K	400K
Temps total	2123.0( $\sigma = 152.4$ )	5219.7( $\sigma = 152.9$ )	49377.5( $\sigma = 154.4$ )
Scheme à C	123.3( $\sigma = 5.2$ )	590.9( $\sigma = 5.5$ )	9345.3( $\sigma = 20.7$ )
Compilation C	686.3( $\sigma = 0.1$ )	3094.8( $\sigma = 100.4$ )	36440.8( $\sigma = 47.8$ )
Install	895.6( $\sigma = 133.8$ )	999.1( $\sigma = 71.2$ )	1614.4( $\sigma = 95.2$ )
Transfert	335.0( $\sigma = 71.6$ )	449.2( $\sigma = 61.9$ )	468.0( $\sigma = 80.7$ )
Exécution	10.4( $\sigma = 5.6$ )	0.2( $\sigma = 0.0$ )	1467.7( $\sigma = 10.5$ )

**Fig. 8.7.** Ce test est identique à celui de la figure 8.6, mais avec un réseau de 10Mbit/s.

compilation des modules diffusés. Suite à une première exécution qui a installé les module compilés, l'exécution est plus rapide que dans le cas interprété par un facteur d'environ 10.

Dans le cas où les modules ont déjà été installés et compilés, le temps global d'exécution des programmes de tests est plus rapide dans le cas compilé. Dans ce cas, les modules sont chargés dynamiquement dans le programme de tests lors de la diffusion de code. Les figures [8.5, 8.6] montrent les temps dans le cas où les modules ont été compilés et les figures [8.1, 8.2] montrent les temps des modules interprétés. Cela s'explique par le fait qu'il y a moins de données transmises et que l'exécution de code compilé est plus rapide que l'interprétation.

Le temps de transmission des données dans les programmes de test compilés était plus lent que dans le cas interprété pour certaines des transmissions, malgré le fait qu'il y a moins de données à transmettre. Cela affecte environ 10% des transmissions et est lié à des facteurs aléatoires du réseau.

## 8.4. Conclusion

Le temps de diffusion des modules est proportionnel à leurs tailles. Plus un module est gros plus son temps de diffusion est grand. La diffusion de modules compilés est avantageée lorsque le temps d'exécution de l'appel RPC interprété est plus grand que les temps de compilation et d'installation. Le temps d'exécution compilé lorsque les modules sont déjà installés, mais non chargés est plus rapide que la transmission des modules interprétés. Notre approche de diffusion offre une exécution qui est amortie après la première diffusion de module, c'est-à-dire après que les modules aient été installés et compilés.

# Chapitre 9

---

## Conclusion

Ce mémoire a présenté un système de module spécialisé pour les systèmes distribués. Il permet la conception d'applications qui exploite la diffusion de modules entre les nœuds. Les appels RPC et la migration de code mobile entre des nœuds de nature différente sont possibles. Chaque module diffusé a un nom unique basé sur l'URL du dépôt de code qui permet de le récupérer. La diffusion se fait par le nom des identifiants qui contient l'URL du module. La façon de nommer les modules dans ce système est similaire à celui du langage de programmation Go.

Nous avons commencé par exposer les limitations du système Termite Scheme par des expérimentations dans plusieurs situations. Dans le contexte purement interprété, la migration fonctionnait correctement même dans le cas où le nœud de destination ne connaît pas le code de l'agent mobile. C'est dans le contexte où les applications de chaque nœud sont compilées que la migration de tâche est un défi, car elle requiert la présence du code compilé de l'agent mobile sur l'ensemble des nœuds qui peuvent avoir des architectures et système d'exploitation différents.

Nous avons exploré plusieurs méthodes de chargement automatique des modules. Le langage Scheme permet le chargement de module à la demande.

Ce qui nous a menés à un constat que le nom des identifiants de module transmettait devait être unique au sein du système distribué. Les modules, basés sur R5RS, n'offraient pas la possibilité d'avoir des identifiants uniques.

Nous avons ajouté une forme spéciale à Gambit pour permettre la création de modules. Le projet a mené au système de modules spécialisés pour les systèmes distribués à commencer par des expérimentations avec Termite. Le résultat présent est prometteur, il permet le

déploiement de serveurs sur plusieurs machines d'architecture et de systèmes d'exploitation différents.

Le système Gambit a été amélioré par l'ajout des modules primitifs et aussi des modules R7RS. De nouveaux mécanismes de chargement de modules ont été ajoutés pour garantir l'ordre et le chargement unique de chaque module.

L'installation et la compilation des modules sont effectuées automatiquement à la demande. Les coûts du chargement de module sont amorties après la première installation et compilation d'un module. L'utilisation interprétée de Termite n'utilise pas la compilation et l'installation automatique. La vitesse d'exécution après l'amortissement surpasse la version interprétée. Le facteur d'accélération observé après la première exécution qui installe les modules compilés est approximativement de 75x pour le test de 4K, 459x pour le test de 40K et 33x pour le test de 400K. Le facteur d'accélération est principalement lié au fait que le code compilé est plus rapide que celui interprété. Puisqu'il y a moins de transmission dans le temps compilé, parce que les données sont plus compactes que lorsqu'interprété, le temps de transmission est généralement plus petit. La taille de la sérialisation d'une procédure compilée est environ 400 fois plus petite que sa version interprétée.

# Références bibliographiques

---

- [1] *TCLTK'96: Proceedings of the 4th Conference on USENIX Tcl/Tk Workshop, 1996 - Volume 4*, Berkeley, CA, USA, 1996. USENIX Association.
- [2] David M. BEAZLEY, Brian D. WARD et Ian R. COOKE : The inside story on shared libraries and dynamic loading. *Computing in Science and Engineering*, 3(5):90–97, 2001.
- [3] T. BERNERS-LEE, MIT/LCS, R. FIELDING, U.C. IRVINE, L. MASINTER et Xerox CORPORATION : Uniform resource identifiers (uri): Generic syntax. <https://tools.ietf.org/html/rfc2396>, 1998.
- [4] Tyler BUI-PALSULICH et Eno COMPTON : Go reference manual 1.13.5. <https://blog.golang.org/using-go-modules>, 2019.
- [5] CAPTURING, et Stefan FUNFROCKEN : Transparent migration of Java-based mobile agents. *In Mobile Agents*, pages 26–37. Springer-Verlag, 1998.
- [6] W. CLINGER, J. REES et *et al* : Revised<sup>4</sup> report on the Algorithmic Language Scheme. <http://people.csail.mit.edu/jaffer/r4rs.pdf>, novembre 1991.
- [7] William D CLINGER : Scheme@33. *In Celebrating the 50th Anniversary of Lisp*, LISP50, pages 7:1–7:5, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [8] Marc FEELEY : Feature-based conditional expansion construct. <https://srfi.schemers.org/srfi-0/srfi-0.html>, 1999.
- [9] Marc FEELEY et Philip W. TRINDER, éditeurs. *Proceedings of the 2006 ACM SIGPLAN Workshop on Erlang, Portland, Oregon, USA, September 16, 2006*. ACM, 2006.
- [10] Adrian FRANCALANZA et Tyron ZERAFA : Code management automation for Erlang remote actors. *In JAMALI et al.* [14], pages 13–18.
- [11] Guillaume GERMAIN : Concurrency oriented programming in termite scheme. *In FEELEY et TRINDER* [9], page 20.
- [12] Robert S. GRAY : Agent tcl: A flexible and secure mobile-agent system. *In Proceedings of the 4th Conference on USENIX Tcl/Tk Workshop, 1996 - Volume 4*, TCLTK'96, pages 9–23, Berkeley, CA, USA, 1996. USENIX Association.
- [13] W. Wilson HO et Ronald A. OLSSON : An approach to genuine dynamic linking. *Softw., Pract. Exper.*, 21(4):375–390, 1991.

- [14] Nadeem JAMALI, Alessandro RICCI, Gera WEISS et Akinori YONEZAWA, éditeurs. *Proceedings of the 2013 Workshop on Programming based on Actors, Agents, and Decentralized Control, AGERE!@SPLASH 2013, Indianapolis, IN, USA, October 27-28, 2013*. ACM, 2013.
- [15] Takashi KATO : Implementing r7rs on an r6rs Scheme system. *In Scheme and Functional Programming Workshop, SFPW 2014*, 2014.
- [16] R. KELSEY, W. CLINGER, J. REES et *et al* : Revised<sup>5</sup> report on the Algorithmic Language Scheme. <https://schemers.org/Documents/Standards/R5RS/r5rs.pdf>, février 1998.
- [17] A. LUKIĆ, N. LUBURIĆ, M. VIDAKOVIĆ et M. HOLBL : Development of multi-agent framework in JavaScript. *In ICIST 2017 Proceedings Vol.1*, pages 261–265, 2017.
- [18] Stefan M, Raymond BIMAZUBUTE et Herbert STOYAN : Mobile intelligent Agents in Erlang. *In Fourth International ICSC Symposium on ENGINEERING OF INTELLIGENT SYSTEMS (EIS 2004)*, 2004.
- [19] Michał PIOTROWSKI et Wojciech TUREK : Software agents mobility using process migration mechanism in distributed erlang. *In Proceedings of the Twelfth ACM SIGPLAN Workshop on Erlang, Erlang '13*, pages 43–50, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [20] A. SHIN, J. COWAN, ARTHUR A. GLECKLER et *et al* : Revised<sup>7</sup> report on the algorithmic language scheme. <https://small.r7rs.org/attachment/r7rs.pdf>, juillet 2013.
- [21] MICHAEL SPERBER, R. KENT DYBVIG et *et al* : Revised<sup>6</sup> report on the Algorithmic Language Scheme. <http://www.r6rs.org/final/r6rs.pdf>, septembre 2007.
- [22] Eijiro SUMII : An implementation of transparent migration on standard scheme. *In Department of Computer Science, Rice University*, 2000.

# Annexe A

---

## Information des environnement de test

Architecture:	x86_64
CPU op-mode(s):	32-bit, 64-bit
CPU(s):	4
Thread(s) per core:	1
Core(s) per socket:	4
Vendor ID:	GenuineIntel
Model name:	Intel(R) Core(TM) i7-7700K CPU @ 4.20GHz
CPU MHz:	4200.000
CPU min MHz:	800.0000
Storage:	216GB (NVME)
RAM:	16GB
Swap:	16GB
C Compiler	gcc (Debian 6.3.0-18+deb9u1) 6.3.0 20170516
Ethernet Speed	1Gbps

**Fig. A.1.** La spécification de la machine arctic qui est utilisé comme nœud de destination dans l'ensemble des tests. Cette machine, nommé **Arctic** est refroidit au liquide.

Architecture:	armv7l
Byte Order:	Little Endian
CPU(s):	4
Thread(s) per core:	1
Core(s) per socket:	4
Vendor ID:	ARM
Model name:	Cortex-A72
CPU max MHz:	1500.0000
CPU min MHz:	600.0000
OS:	Linux tictoc 4.19.66-v7l+ #1253 SMP
Hostname:	tictoc.iro.umontreal.ca
Storage:	26GB (sdcard)
RAM:	2GB
Swap:	2GB
C Compiler	gcc (Raspbian 8.3.0-6+rpil) 8.3.0
Ethernet Speed	1Gbps

**Fig. A.2.** La spécification du CPU du Raspberry Pi utilisé dans les tests. Cette machine se nomme **tictoc**.



Architecture: x86\_64  
CPU(s): 12  
Thread(s) per core: 2  
Core(s) per socket: 6  
Model name: Intel(R) Core(TM) i7-8700B CPU @ 3.20GHz  
OS: Darwin Kernel Version 19.2.0  
Hostname: gambit.iro.umontreal.ca  
Storage: 1TB (SSD)  
RAM: 8GB  
Network Speed: 1Gbps

**Fig. A.3.** La spécification de la machine Gambit utilisé Avec macOS.