

Je suis pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie de document constitue une fraude caractérisée.

Nom, date et signature :

Simulation d'applications dynamiques pour plateformes de calculs hautes performances

Steven QUINITO MASNADA

Encadrants : Arnaud
LEGRAND · Luka STANISIC

Juin 2015

Résumé Actuellement, la majorité des supercalculateurs sont des noeuds composés de machines hybrides. Pour tirer partie de toute la puissance de calcul disponible, il est indispensable d'avoir un programme qui soit dynamique. Cependant, les APIs de programmation classiques conduisent à une mise en oeuvre très complexe. Le paradigme de programmation par tâches couplé à un système dynamique permet de répondre à ce problème, mais il est difficile d'en évaluer les performances. L'objectif de notre étude est donc de mettre en place les dispositifs nécessaire à l'évaluation de performances d'un tel système.

1 Introduction

La majorité des supercalculateurs actuels, comme le montre le site top500¹ sont des clusters massivement parallèles et composés de noeuds hybrides (CPU-GPU). Pour les programmer, il existe certains standards. Il y a tout d'abord la norme MPI (Message Passing Interface), qui est une API de communication basée sur l'envoi et la réception de message. Elle a pour objectif d'être performante et portable. Elle est de plus haut niveau que les sockets et apporte des mécanismes comme des fonctions de communications collectives (exemple broadcast). Ensuite, il y a l'API OpenMP qui est une interface de multithreading de plus haut niveau de PThread. Elle permet de découper facilement des traitements et d'exploiter les architectures multicœurs. Enfin, il y a l'API CUDA qui permet de tirer partie de la puissance de calcul des GPUs. Pour cela il est nécessaire de spécifier explicitement ce que l'on veut envoyer aux GPUs et on doit également gérer la synchronisation entre les CPUs et les GPUs.

Si l'on veut optimiser le rendement d'une application afin que celle-ci tire partie de toute la puissance de calcul disponible, il est nécessaire d'utiliser plusieurs paradigmes à la fois ce qui complique grandement la tâche. Nous sommes donc face à un problème de programmation classique où l'on doit, avec les APIs précédentes, indiquer explicitement où et quand chacun des calculs doit être réalisé. Par exemple pour exploiter efficacement un GPU, on doit transférer explicitement les données du CPU vers le GPU, lancer l'exécution du calcul sur le GPU, gérer la synchronisation sur l'attente du résultat, récupérer le résultat et pendant ce temps continuer à occuper le CPU avec un autre calcul. Cet exemple n'illustre que la difficulté liée à la répartition de charge au niveau d'un seul et même noeud. Cela se complique davantage lorsque l'on veut également répartir la charge entre plusieurs machines. Cependant même si l'on arrive à équilibrer les charges correctement, cette solution est difficilement portable vers une autre machine.

La solution serait donc d'avoir une gestion dynamique des charges. Mais cela s'avère bien plus compliqué, voir impossible à réaliser directement avec ces méthodes de programmation. L'alternative est la programmation par tâches. Ce paradigme fournit une abstraction à la notion d'exécution de calculs sur CPU, GPU et sur d'autres machines. Ainsi le développeur n'a plus à se soucier de sur quelle ressource le calcul est effectué, mais seulement d'exprimer le calcul sous la forme d'un graphe de tâches. De plus avec un système de répartition dynamique l'utilisateur n'aurait également plus de besoin de soucier de quand les traitements doivent être effectués. La librairie StarPU [1] est un exemple utilisant cette approche, c'est cette dernière que nous allons utiliser. C'est un système runtime qui permet une répartition des traitements de manière dynamique et opportuniste. Pour ce faire, StarPU tient à jour un graphe de dépendance permettant d'optimiser l'ordonnancement des tâches. La première version de StarPU a été conçue spécialement pour des architectures hybrides.

1. <http://www.top500.org>

Une version récente (StarPU MPI) [4] a été réalisée pour bénéficier d'un ordonnancement et d'une exécution qui soit à la fois dynamique et opportuniste dans un contexte distribuée.

Les performances d'un tel système sont difficiles à évaluer pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la configuration du runtime est un paramètre à prendre en compte, on peut choisir des heuristiques et des politiques d'ordonnements différentes. Ensuite, il y a les réglages au niveau de l'application qu'il faut prendre en compte, notamment le découpage des tâches, qui entraîne la génération d'un graphe de tâches différent.

Dans cet objectif, la première partie de ce rapport montre qu'une des approches possible est la simulation. La seconde partie présente en détail le fonctionnement de StarPU et SimGrid ainsi que les difficultés rencontrées. La troisième partie est consacrée à la méthodologie employée. Une quatrième partie montre la contribution à la simulation de telles applications. Et la cinquième partie aborde ce que nous avons réussi à mettre en place.

2 État de l'art

En HPC, il y a deux grandes approches possibles pour évaluer les performances d'applications.

2.1 Test sur systèmes réels

Cette approche consiste à lancer la vraie application sur le système réel afin d'effectuer les mesures. Cependant cette méthode peut se révéler très coûteuse et il n'est pas toujours possible d'avoir accès à la plateforme. De plus comme les exécutions sont non déterministes il est indispensable de réaliser un grand nombre d'expériences, or à cause du coût il n'est possible d'effectuer qu'un petit nombre de mesures sur un nombre restreint de plate-formes. Il est donc difficile d'extrapoler ce qui serait pourtant très utile aux développeurs de runtimes et d'applications.

2.2 Simulation

La simulation a pour but de définir un modèle et de calculer une prédiction du comportement du système avec généralement un code déterministe et séquentiel. Cela permet ainsi de s'affranchir de la plateforme et les expériences peuvent être effectuées à partir de n'importe quel système. Il n'est plus nécessaire d'avoir accès à la plateforme, ce qui rend cette approche peu coûteuse. Comme la simulation nous permettrait d'avoir un contrôle sur de nombreux paramètres, nous pouvons avoir un système déterministe qui nous permettrait d'avoir des expériences qui peuvent être reproduites. Par ailleurs il est facile d'extrapoler les résultats car on peut changer les paramètres du modèle. Enfin la simulation permet d'avoir un temps d'exécution plus court

qu'avec des tests réels car on n'effectue que certains traitements ce qui nous permet pouvoir effectuer un grand nombre de mesures.

2.2.1 Approche par rejeu de trace

Cette méthode consiste à exécuter une première fois l'application sur un système réel pour ensuite rejouer la trace post-mortem. Elle est couramment employée dans le contexte d'applications MPI statiques. Ici, nous avons à faire à une exécution complètement dynamique, ce qui est totalement inadaptés car le flot de contrôle du programme est non déterministes.

2.2.2 Approche hybride par simulation / émulation

Pour avoir des simulations qui soient réalistes, nous avons besoin d'exécuter le vrai code et de ne simuler que les communications et les calculs coûteux. Dans notre cas on simulerait donc la plateforme de même que l'OS. Et en plus on utiliserait l'émulation où l'on exécuterait en vrai, mais de manière contrôlée le programme sur le système simulé. Cette approche est suivie dans [5] où StarPU a été porté sur SimGrid mais avec un noeud seulement. Notre objectif est d'utiliser la même approche mais avec plusieurs noeuds et avec StarPU MPI.

L'approche simulation et émulation se révèle donc la plus adaptée. Nous avons choisi le simulateur SimGrid qui permet de simuler des systèmes distribués, des grilles des calculs, des systèmes peer to peer et cloud.

3 Analyse du problème

3.1 SimGrid

SimGrid est propose de plusieurs APIs et est composé de plusieurs modules (voir figure 1). Il y a tout d'abord l'API SURF qui a pour objectif de décrire les caractéristiques de la plateforme et de la simuler. On lui fournit donc une modèle de performance qui permettra d'estimer la durée des calculs et des transferts.

Ensuite, le module SIMIX permet de simuler la partie OS. C'est lui qui s'occupe notamment de la gestion et de l'ordonnancement des processus et également des mécanismes de synchronisation. Sous SimGrid, les processus sont modélisés par des threads, ce qui signifie que leur espace d'adressage est partagé et nous permet de simuler un environnement à mémoire partagée facilement.

Ensuite, au dessus SIMIX, il y a d'une part l'API MSG. Cette dernière permet à l'utilisateur créer et manipuler des processus de manière simple. C'est cette API qui est généralement utilisé pour la plupart des applications classiques et hybrides.

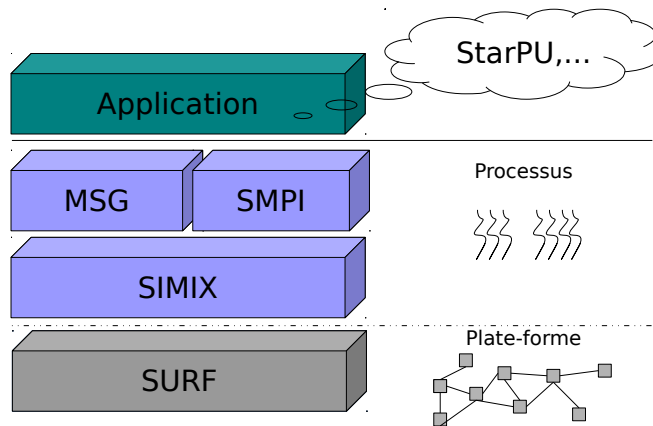


FIGURE 1 Structure de Simgrid

Et d'autre part, il y a l'API SMPI qui a été développée spécifiquement pour simuler des applications MPI. Actuellement la majeure partie des fonctionnalités de MPI ont été implémentées. La simulation de code MPI est assez compliquée et SimGrid est un des seuls simulateurs à le permettre.

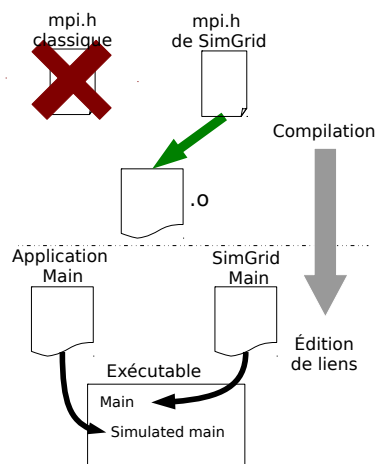


FIGURE 2 Construction de l'application simulée

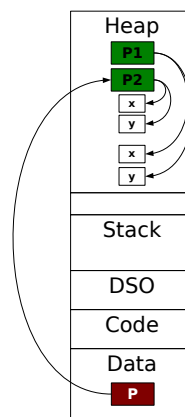


FIGURE 3 Privatisation du segment de données

Pour ce faire, on compile l'application que l'on veut tester en remplaçant le `mpi.h` classique par le `mpi.h` de SimGrid (voir figure 2). Ensuite, à l'édition de liens on remplace le `main` de l'application par le `main` de SimGrid. Ce dernier a pour rôle de préparer l'exécution du simulateur en créant la plateforme et en déployant les processus SMPI qui exécuteront chacun le `main` de l'application MPI. Comme dans le cadre d'applications MPI on est dans un environnement à mémoire distribuée et que sous SimGrid les processus sont modélisés par des threads, afin de simuler le fait que chacun ait un espace d'adresse séparé, l'approche suivie par SMPI consiste à privatiser les variables des processus en créant pour chacun un segment de données virtuel (voir figure 3). Pour cela, pour chaque processus une nouvelle zone mémoire est créée dans le tas grâce à un `mmap`, puis le segment de données est recopié dans cette zone et à chaque changement de contexte on fait pointer vers la zone correspondant à celle du processus.

3.2 StarPU-MSG : Architecture générale

Comme à la base StarPU visait le modèle CPUs-GPUs, l'API la plus proche était MSG, notamment car le modèle de performances des communications entre noeuds est différents de celui entre CPUs et GPUs. StarPU a donc été modifié pour pouvoir fonctionner au dessus du simulateur SimGrid en se basant sur MSG. Ainsi, l'application (le runtime de StarPU) est réellement exécutée, mais les allocations mémoires des tâches ne sont pas effectuées, les codes de calcul sont simulés et remplacés par un délai de même pour les transferts CUDA.

3.3 StarPU-SMPI : Ce qui coince

Avec StarPU MPI, la modélisation est différente. On est à la fois un environnement à mémoire partagée (entre les CPUs et les GPUs d'une même machine) et un environnement à mémoire distribuée (entre les différents noeuds). On doit donc permettre d'avoir des modèles de performances différents selon qu'on est entre noeud où à l'intérieur d'un noeud. Il nous faut également activer la privatisation de variables entre les noeuds mais également permettre le partage de variables à l'intérieur de chacun des noeuds.

Pour cela nous avons besoin de faire fonctionner MSG et SMPI ensemble. Or non seulement StarPU est essentiellement basé sur MSG mais MSG et SMPI n'ont par ailleurs pas été

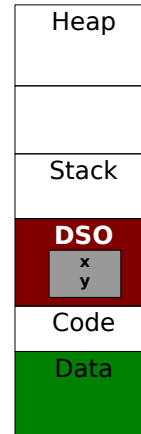


FIGURE 4 Emplacement en mémoire des bibliothèques dynamiques

prévu pour fonctionner ensemble même si dans le principe rien ne l'interdit. Il faudra donc initialiser correctement à la fois la partie MSG et la partie SMPI.

Il y a également un autre point à prendre en considération, celui des librairies dynamiques.

Dans SimGrid seul le segment données est privatisé, comme les variables globales des librairies dynamiques ne se trouvent pas dans ce dernier (DSO sur la figure 4), elles restent donc accessibles à tous les processus SimGrid. Nous devons donc également faire en sorte de privatiser les variables globales des librairies externes entre les noeuds.

4 Méthodologie

Comme nous travaillons avec SimGrid et StarPU à la fois, nous utilisons un dépôt complexe comprenant les deux et géré avec l'outil submodule de [git](#). Ce dernier nous permet de gérer des sous dépôt indépendamment, ainsi il est plus aisé de traiter les mises à jours de ces derniers.

Afin de pouvoir retracer le cheminement de mon travail, mais aussi de pouvoir garder le fil d'un jour à l'autre, un cahier de laboratoire est tenu en org-mode et est hébergé sur [github](#).

Comme on l'a vu précédemment il est nécessaire d'apporter quelques modifications au niveau du simulateur et de StarPU. Dans ce but, il a été dans un premier temps nécessaire de consulter la documentation afin de comprendre le fonctionnement et l'architecture de SimGrid. Ensuite il a fallu explorer le code afin de déterminer où et comment apporter les modifications. Pour cela les outils tels que GDB et Valgrind ont été d'une aide précieuse et ont permis de notamment vérifier que les changements de segment mémoire s'effectuent bien au bon moment.

5 Contribution

La toute première chose à réaliser, a été la gestion du partage du segment de données au niveau du simulateur dans un contexte SMPI. Comme la mémoire est partagée au sein d'un noeud, nous avons fait en sorte que les processus d'un même noeud aient leurs segment données en commun. Le principe est le suivant, il y a dans un premier temps, les processus SMPI qui sont créés au lancement de l'application avec leur propre espace de données. Puis ces derniers peuvent à leurs tours créer de nouveau processus. Ceux-ci héritent donc du segment de données du processus qui les a créés. Il a par ailleurs été nécessaire d'initialiser MSG et SMPI correctement afin que les deux puissent fonctionner ensemble. SimGrid a donc été modifié en conséquences.

Une fois la gestion du partage mise en place, nous nous sommes penchés sur le cas des bibliothèques dynamiques. Nous avons vu précédemment que malgré le mécanisme de privatisation, les variables globales présentes dans ces dernières sont partagés entre les différents processus SimGrid. Pour contourner ce problème, nous avons décidé d'utiliser une version statique de la bibliothèque.

Ainsi avec une bibliothèque statique, les variables globales de celle-ci se retrouvent dans le segment données du processus et la gestion du partage / privatisation est géré par le mécanisme précédent (voir figure 5). Cette solution est relativement intrusive car elle nécessite de changer la chaîne de compilation des applications utilisant StarPU, mais cela sera suffisants dans un premier temps.

Comme StarPU a été porté au dessus de MSG, il a également été nécessaire d'apporter quelques modifications au niveau de l'initialisation. Car le mécanisme de gestion de la privatisation et de partage n'était activée que de manière tardive.

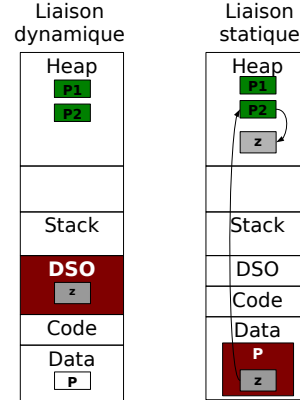


FIGURE 5 Emplacement en mémoire des bibliothèques

6 Validation

6.1 Test simple

Dans le but de tester le bon fonctionnement des modifications apportées, un test illustrant le fonctionnement de StarPU a été fourni et enrichi. Ce dernier permet ainsi d'isoler le problème afin de pouvoir nous concentrer dessus. Ce test, initialise SimGrid et la partie SMPI comme cela est fait du côté de StarPU et fait appel à une bibliothèque dynamique et manipule des variables globales. Ainsi lors de l'exécution de ce test, on doit pouvoir constater que pour des processus appartenant à un même noeuds, les valeurs des variables globales du programme et des bibliothèques dynamiques sont bien identiques.

6.2 Test de StarPU - SMPI

Comme les résultats du test simples étaient ceux attendu, nous sommes passé à un test utilisant cette fois la vraie bibliothèque StarPU. Cette dernière est fourni avec des exemples de programme MPI notamment d'algèbre linéaire tel que l'algorithme de Cholesky. Nous nous sommes servi de ces derniers afin de valider les modifications.

7 Conclusion

Pour conclure, nous avons apporté les modifications nécessaires à SimGrid et StarPU afin de pouvoir simuler des applications MPI basées sur StarPU MPI. La difficulté résidait dans le fait de comprendre des programmes complexes avec de nombreuses lignes de codes (106350 lignes pour Simgrid et 172251 lignes pour StarPU) et d'arriver à repérer où effectuer les modifications tout en faisant en sorte qu'elles soient minimales (ici une vingtaine de lignes ont été ajoutées à SimGrid et StarPU).

La prochaine étape sera d'effectuer les simulations et les mesures. Pour ce faire les expériences seront faites avec un solveur d'algèbre linéaire basé sur StarPU. Dans le but de valider le résultat des expérimentations, un test grandeur nature sera fait sur Grid5000.

Acknowledgments

Je souhaite remercier Bruno GAUJAL pour m'avoir permis de faire mon stage dans son équipe. Ensuite, je souhaite remercier Arnaud LEGRAND, mon tuteur de stage pour avoir été aussi disponible et pour sa patience, pour avoir su me guider tout au long de ce TER, et également pour m'avoir tellement appris. Grâce à cela j'ai trouvé un domaine qui me plaît particulièrement. Je souhaite également remercier Luka STANISIC pour m'avoir aidé lorsque je bloquais et donné des astuces très utiles. Et je remercie également Thibaud BUCHS pour ces pauses cafés et pour son aide également.

Références

1. C. Augonnet, S. Thibault, R. Namyst, and P.-A. Wacrenier, "StarPU : A Unified Platform for Task Scheduling on Heterogeneous Multicore Architectures," *Concurrency and Computation : Practice and Experience*, vol. 23, pp. 187–198, Feb. 2011.
2. P. Bedaride, A. Degomme, S. Genaud, A. Legrand, G. Markomanolis, M. Quinson, M. Stillwell, F. Suter, and B. Videau, "Toward Better Simulation of MPI Applications on Ethernet/TCP Networks," *Benchmarking and Simulation of High Performance Computer Systems*, Nov. 2013.
3. H. Casanova, A. Giersch, A. Legrand, M. Quinson, and F. Suter, "Versatile, Scalable, and Accurate Simulation of Distributed Applications and Platforms," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, pp. 2899–2917, 2014.
4. C. Augonnet, O. Aumage, N. Furmento, S. Thibault, and R. Namyst, "StarPU-MPI : Task Programming over Clusters of Machines Enhanced with Accelerators," 2014.
5. L. Stanisic, S. Thibault, A. Legrand, B. Videau, and J.-F. Méhaut, "Faithful Performance Prediction of a Dynamic Task-Based Runtime System for Heterogeneous Multi-Core Architectures," *Concurrency and Computation : Practice and Experience*, 2015.