Systèmes d'Exploitation

Devoir 2 : Multithreading dans NACHOS

Cette fiche ainsi que les fichiers à télécharger sont disponibles sur le site
https://gforgeron.gitlab.io/se/

L'objectif de ce devoir est de permettre d'exécuter des applications multi-threads sous Nachos. **Lisez l'ensemble du sujet avant de commencer pour avoir une vue d'ensemble des problèmes et l'ordre dans lesquels vous allez les aborder.**

Ce sujet est essentiellement indépendant du sujet précédent : vous n'avez essentiellement besoin que d'un `PutChar` fonctionnel. Si ce n'est pas le cas, demandez à votre chargé de TD de vous aider à le faire fonctionner.

Le devoir est à faire en binôme et à rendre (fichiers sources + rapport de quelques pages) avant

Mardi 12 novembre 2024, midi.

Comme pour le TP précédent, il vous est demandé de placer votre rapport au sein de votre dépôt git (`projet-xx/rendus/rapport2.pdf`) et de déposer sur Moodle la clé de hash de votre commit.

Merci de suivre ces recommandations.

— votre rapport doit contenir une description de la stratégie d'implémentation utilisée, et une discussion des choix que vous avez faits (5 pages maximum). Un guide de rédaction de ce document est disponible sur le site de l'UE : guide.txt

— Votre dépôt doit abriter des programmes de test représentatifs présentant les qualités de votre implémentation et ses limites. Chaque test doit contenir un commentaire expliquant comment le programme doit être lancé (options nachos à utiliser,...) et être accompagné d'un court commentaire (5–10 lignes) expliquant son intérêt.

Avant de commencer à coder, lisez bien chaque partie **en entier** : les sujets de TP contiennent à la fois des passages descriptifs pour expliquer vers où l'on va (et donc il ne s'agit que de lire et comprendre, pas de coder), et des **Actions** qui indiquent précisément comment procéder pour implémenter pas à pas (et là c'est vraiment à vous de jouer).

Partie I. Multithreading dans les programmes utilisateur

On rappelle que dans le devoir 0 on a déjà joué avec les threads *noyau* de Nachos, notamment dans la fonction `ThreadTest`. Il s'agit maintenant de permettre aux programmes utilisateurs de créer et manipuler des threads *utilisateur* Nachos au moyen d'appels système qui utiliseront des threads *noyau* pour propulser les threads *utilisateur*. Note : dans cette première partie, on se contentera de ne lancer qu'un seul thread supplémentaire.

Action I.1. *Examinez en détail le fonctionnement des threads Nachos (noyau et utilisateur). Comment ces threads sont-ils alloués et initialisés ? Où se trouve la pile d'un thread Nachos, en tant que thread* noyau *?*

Action I.2. *Lancez depuis* `userprog` *votre programme* `putchar` *avec quelques options de trace vues au TP0 :*

```
./nachos -s -d a -x ../test/putchar
```

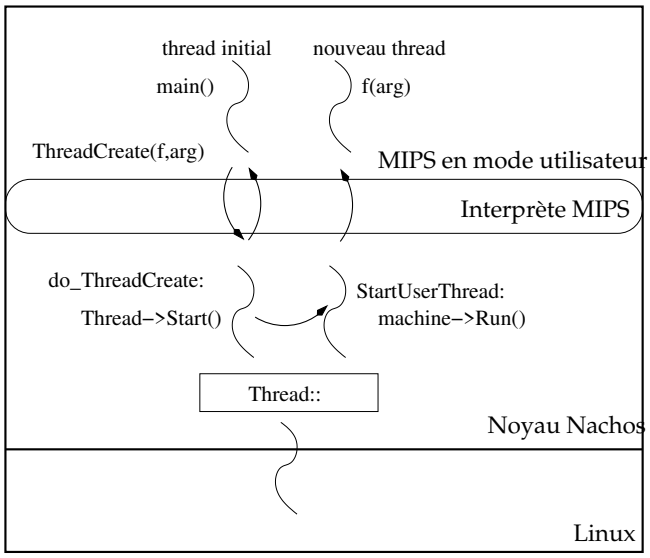
Observez en particulier au début du listing comment un programme est installé dans la mémoire (notamment à l'aide d'un objet de type `Addrspace`*), puis lancé, puis arrêté. Repérez en particulier où cela est fait dans* `userprog/progtest.cc`*, ainsi que dans le fichier* `userprog/addrspace.cc`*.*

Ouvrez également le fichier `memory.svg` *dans un navigateur web, pour ce TP on ne regarde que la partie gauche. Vous pouvez zoomer en utilisant control-molette. C'est surtout la colone de gauche qui nous intéresse, elle montre les zones mémoire et la position de PC et de SP, dont on constate que cela correspond avec le début de l'affichage du* `-d a`

On souhaite maintenant qu'un programme utilisateur puisse créer des threads qui exécuteront des fonctions du programme, c'est-à-dire effectuer un appel système MIPS

```
int ThreadCreate(void f(void *arg), void *arg)
```

Cet appel doit lancer l'exécution de `f(arg)` dans une nouvelle copie de l'interprète MIPS (autrement dit, une nouvelle instance de l'interprête exécutée par un nouveau thread *noyau*). Voici un dessin et un résumé de ce que vous allez implémenter dans les actions I.3 à I.7 (**ne commencez pas à coder maintenant**, lisez d'abord ce résumé, et commencez à coder une fois atteint le texte de l'action I.3, qui explique par quoi commencer) :



— Sur l'appel système `ThreadCreate` (on mettra cette implémentation dans une nouvelle fonction `int do_ThreadCreate(int f, int arg)` plutôt que tout mettre dans `exception.cc`), le thread noyau courant se contente de créer un nouveau thread `newThread`, l'initialiser et le placer dans la file d'attente des threads (noyau) par l'appel

```
newThread->Start(StartUserThread, schmurtz)
```

Vous remarquerez que le constructeur `Thread::Thread` positionne au passage la variable `space` de ce nouveau thread `newThread` à NULL, il faudra lui donner la valeur de la variable `space` du thread parent (`currentThread` pendant l'exécution de `do_ThreadCreate`), pour que le thread enfant se retrouve effectivement dans le même espace d'adressage MIPS !

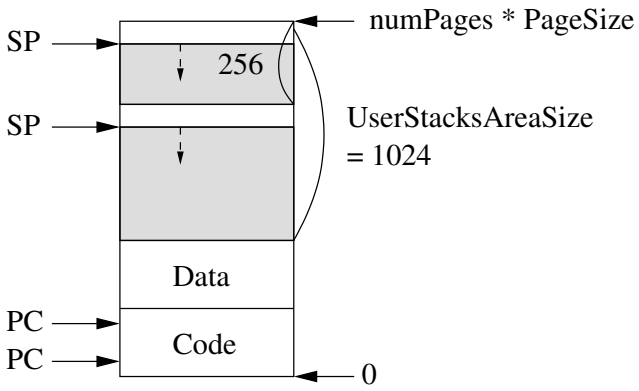
Notez que la fonction `Thread::Start` ne permettant de passer qu'un seul paramètre `schmurtz` à `StartUserThread`, vous ne pouvez passer à la fois `f` et `arg` directement par ce moyen. À vous de voir comment faire !

— Lorsqu'il est finalement activé par l'ordonnanceur, ce nouveau thread exécute la fonction `StartUserThread` (que vous allez implémenter), c'est elle qui va vraiment travailler : Cette fonction devra initialiser tous les registres MIPS, d'une façon similaire à ce que fait `AddrSpace::InitRegisters` (dont vous pouvez vous inspirer), et lancer l'interprète au moyen d'un appel à `Machine::Run`. Si vous ne savez pas quoi faire de `arg`, laissez-le de côté dans un premier temps, vous pourrez régler la question du passage de l'argument dans un deuxième temps.

Notez que vous aurez à initialiser le pointeur de pile, Il vous est suggéré de la placer dans un premier temps 256 octets en-dessous de la fin de la mémoire virtuelle (i.e. en-dessous de la pile du thread principal) Ceci est une méthode simpliste, bien sûr ! Il faudra probablement faire mieux dans un deuxième temps...

— Pour se terminer lui-même, un thread exécutant du code en espace utilisateur doit exécuter un appel système `ThreadExit`, dont on mettra l'implémentation dans une fonction `do_ThreadExit`. Cette fonction doit appeller `currentThread->Finish` pour terminer simplement le thread Nachos qui a appelé `ThreadExit`. L'objet `Thread` est déjà libéré automatiquement par l'ordonnanceur.

Ce schéma montre l'aspect de notre espace d'adressage avec la méthode simpliste pour allouer la deuxième pile :



Action I.3. *Mettre en place l'interface utilisateur des appels système suivants, comme on l'a déjà fait plusieurs fois au TP précédent, avec ces prototypes montrés à l'espace utilisateur :*

```
int ThreadCreate(void f(void *arg), void *arg);
void ThreadExit(void);
```

Ici, dans `exception.cc`, on ne fait que passer les paramètres à `do_ThreadCreate` et `do_ThreadExit` que l'on implémente dans les actions suivantes.

Action I.4. *Écrire la fonction*

```
int do_ThreadCreate(int f, int arg)
```

appelée par l'appel système `ThreadCreate`*. Vous noterez que les paramètres ne sont que des* **int**. *En effet, de la même façon que pour* `PutString` *du TP précédent, le noyau ne va pas utiliser* `f` *et* `arg` *en tant que pointeurs (puisque ce sont des adresses en espace utilisateur, non utilisables directement par le noyau). Quand on est dans le noyau on les conservera sous forme d'***int** *du début à la fin de l'appel système.*

Vous aurez à beaucoup travailler sur cette fonction que vous allez implémenter au sein du fichier `userprog/userthread.cc` *en ne plaçant que sa déclaration*

```
extern int do_ThreadCreate(int f, int arg);
```

dans le fichier `userprog/userthread.h`*. Ce fichier d'entête devra notamment être inclus depuis* `userprog/exception.cc` *pour pouvoir l'appeler. Pensez à ajuster le contenu de* `Makefile.common` *pour compiler le nouveau fichier* `userthread.cc`*.*

Pour quelle(s) raison(s) la création d'un thread pourrait-elle échouer ? On pensera plus tard à retourner `-1` *dans ce cas.*

Action I.5. *Définir dans le fichier* `userprog/userthread.cc` *la fonction*

```
static void StartUserThread(void *schmurtz)
```

appelée par le nouveau thread Nachos créé par la fonction `do_ThreadCreate`*, en vous inspirant de la fonction* `AddrSpace::InitRegisters`*, et en finissant avec un* `machine->Run()`.

Soyez très vigilants car vous n'avez aucun contrôle sur le moment où cette fonction est appelée ! Tout dépend de l'ordonnanceur... *Encore une fois, notez aussi qu'il faut passer à cette fonction à la fois les arguments* `f` *et* `arg`*. À vous de trouver comment faire !*

Notez que vous devez initialiser le pointeur de pile, ajoutez pour cela à la classe `AddrSpace` *une méthode* `AllocateUserStack` *retournant l'adresse du haut de cette nouvelle pile. Il vous est suggéré de la placer dans un premier temps 256 octets en-dessous de la fin de la mémoire virtuelle (i.e. en-dessous de la pile du thread principal) (la taille de la mémoire virtuelle est* `numPages*PageSize`*). Ceci est une méthode simpliste, bien sûr ! Il faudra probablement faire mieux dans un deuxième temps... Pour pouvoir appeler cette méthode, utilisez* `currentThread->space`*.*

Ajoutez beaucoup d'informations de débuggage : utilisez la macro `DEBUG('x', "mon debug %d\n", mavar);` *pour imprimer les valeurs que vous mettez dans les registres notamment, pour être bien sûrs de vos calculs !*

Action I.6. *Définir le comportement de l'appel système* `ThreadExit()` *par une fonction* `do_ThreadExit`*, placée elle aussi dans le fichier* `userthread.cc`*. Pour le moment, elle se contente de détruire le thread Nachos propulseur par l'appel de* `currentThread->Finish`*. Doit-on faire quelque chose pour son espace d'adressage* `space` *?*

Action I.7. *Démontrer sur un petit programme* `test/makethreads.c` *le fonctionnement de votre implémentation, en faisant appeler par la fonction donnée à* `ThreadCreate` *un simple* `PutChar` *(mais n'appelez pas encore* `PutChar` *dans le thread principal), et en faisant attention aux remarques importantes ci-dessous. Si vous avez des bugs,* ***vérifiez*** *bien avec des* `DEBUG` *quelle valeur de* `PCReg`*,* `NextPCReg` *et* `StackReg` *vous donnez à votre*

thread. Utilisez éventuellement l'option `-d m` pour voir les instructions MIPS se faire une par une et vérifier que c'est bien cohérent avec ce qu'il doit faire. Testez différentes graines.

Important : Notez que pour que vos nouveaux threads utilisateurs aient une chance de s'exécuter, le thread principal utilisateur ne doit pas se terminer (e.g. sortir de la fonction MIPS `main`) tant que les threads utilisateurs n'ont pas appelé `ThreadExit` ! Dans un premier temps, faites donc attendre la fonction MIPS `main` après avoir créé le thread avec une boucle vide infinie... Bien sûr, du coup votre programme ne termine pas. Corriger cela sera l'objet de l'action II.2.

Important : Dans un premier temps, dans vos programmes de test, terminez tous vos threads utilisateur en leur faisant invoquer systématiquement l'appel système `ThreadExit()` pour qu'ils se sabordent eux-même depuis le mode utilisateur et ainsi ne "sortent" jamais de leur fonction initiale `f`). Cf l'action III.1 plus loin pour les détails.

Important : Tant que vous n'avez pas encore mis de verrouillage sur votre implémentation de la console, ne faites pas faire d'affichage par différents threads.

Important : Nachos doit alors être lancé avec l'option `-rs` pour forcer l'ordonnancement préemptif (et donc réaliste) des threads utilisateurs :

```
./nachos -rs 1234 -x ../test/makethreads
```

En modifiant le nombre donné en paramètre à l'option, vous pouvez modifier la suite aléatoire utilisée pour l'ordonnancement.

Notez que l'ordonnancement des threads noyaux *n'est pas préemptif*.

Note : Vous pouvez observer les deux threads en ajoutant dans `StartUserThread` un appel `machine->DumpMem("threads.svg");` avant l'appel à `machine->Run();`, et constater qu'il y a désormais deux séries de flèches `SP` et `PC` !

Note : LeakSanitizer va éventuellement râler sur des fuites mémoires. Assurez-vous d'avoir bien libéré schmurtz, mais ne vous étonnez pas s'il râle sur le `Thread *` du dernier thread et sa pile : au moment du Cleanup il est effectivement normal qu'ils soient encore alloués : on ne peut pas scier la branche sur laquelle on est assis !

Partie II. Plusieurs threads par processus

L'implémentation ci-dessus est encore bien primitive, et elle peut être améliorée sur plusieurs points.

Si vous essayez de faire des écritures (par exemple par la fonction `putchar`) depuis le thread principal et depuis le thread créé, vous aurez probablement un message d'erreur `Assertion failed`. (Essayez !) En effet, les requêtes d'écriture et d'attente d'acquittement des deux threads se mélangent ! Il faut donc protéger les fonctions noyau correspondantes par un verrou (utilisez des sémaphores, ou mieux, complétez l'implémentation des locks dans `synch.cc` en vous inspirant de celle des sémaphores !)...

Action II.1. *Modifier votre implémentation de la classe `ConsoleDriver` pour placer les traitements effectués par `PutChar` et `GetChar` en section critique. Pouvez-vous utiliser deux verrous différents ? Notez que ces verrous sont privés à cette classe. Démontrez le fonctionnement par un programme de test.*

Faut-il également protéger `PutString` et `GetString` ? Pour quelle raison ?

Si un thread appelle `Exit`[1] ou que le thread principal sort de la fonction `main`, nachos est arrêté sans donner une chance aux autres threads de continuer à s'exécuter. Pour laisser les autres threads tourner dans le processus, main peut utiliser `ThreadExit` pour se terminer lui-même mais pas le processus.

Action II.2. *Est-ce que Nachos se termine effectivement si à la fois le thread créé et le thread initial utilisent `ThreadExit` ? Corrigez la terminaison en assurant une comptage dans `ThreadExit` du nombre de threads qui partagent le même espace d'adressage (`AddrSpace`) pour que le dernier thread appelle `interrupt->Powerdown()` pour terminer Nachos (dans le devoir 3 nachos sera capable de co-exécuter plusieurs, on pourra alors raffiner cette implémentation). Démontrez le fonctionnement par un programme de test.*

Note : `Exit` doit cependant continuer à faire un `interrupt->Powerdown()` sans attendre les autres threads, c'est en effet la sémantique Posix voulue. De même, si `main` retourne, on laisse l'appel système `Exit` se faire et donc terminer tout le processus. Seul un appel explicite à `ThreadExit` permet de terminer le thread initial tout en laissant les autres threads tourner.

Attention, vous voudrez éventuellement inclure `synch.h` depuis `addrspace.h`. Cela ne peut pas fonctionner puisque `synch.h` a besoin de `thread.h` pour la déclaration de la classe Thread, qui lui-même a besoin de `addrspace.h` pour la déclaration de la classe AddrSpace, au final on ne peut rien déclarer avant l'autre... Plutôt qu'inclure `synch.h`, écrivez simplement une déclaration partielle de classe, par exemple :

```
class Semaphore;
```

Ainsi la compilation de `addrspace.h` passe, puisqu'il ne contient que des pointeurs vers des sémaphores, il a juste besoin de savoir que la classe `Semaphore` existe. Pour la compilation de l'appel à new dans `addrspace.cc` il aura par contre besoin de l'inclusion de `synch.h` en bonne et due forme.

Pour le moment, un programme ne peut appeller qu'une seule fois `ThreadCreate`, à cause de l'allocation de pile qui est trop simpliste. Il faut lever cette limitation.

Action II.3. *Que se passerait-il si le programme lançait plusieurs threads et non pas un seul ? Faites un essai pour voir. Avec de la chance, cela fonctionne peut-être, mais par exemple faites faire à vos threads une boucle `for` sur une variable locale (donc sur la pile) `volatile int i;` qui affiche un `a` à chaque tour, et comptez le nombre de `a`. Proposer une correction permettant de lancer quelques threads. Avant de désespérer de n'observer que des bugs plus que mystérieux, **vérifiez** bien que dans `AllocateUserStack` vous donnez aux threads vivants des piles différentes de taille au moins 256 octets par exemple, et qui ne débordent pas dans les données ou le code, et que vous tenez compte de la pile du thread principal, vous pouvez regarder le fichier `svg` pour voir quelles valeurs sont valides. Démontrez le fonctionnement par un programme de test.*

Action II.4. *Que se passe-t-il si un programme lance un grand nombre de threads ? Révisez éventuellement votre mécanisme d'allocation de piles (mais tout en gardant des slots de pile de taille constante égale à 256 octets pour simplifier), en utilisant par exemple un tableau de booléens (la classe `Bitmap` de `bitmap.cc` contient déjà tout ce qu'il faut), pour mémoriser quels slots de pile sont déjà utilisés. Faites attention à la pile du thread principal. Discutez avec précision les différents comportements en fonction de l'ordonnancement.*

1. Sauf exception, on n'utilisera plus l'appel système `Halt`.

Partie III. Terminaison automatique (bonus)

Pour le moment, un thread doit explicitement appeler `ThreadExit` pour se terminer. Ceci est évidemment peu élégant, et surtout très propice aux erreurs !

Action III.1. *Expliquez ce qui adviendrait dans le cas où un thread n'appellerait pas* `ThreadExit`. *Comment ce problème est-il résolu pour le thread principal (avec* `nachos -x`*) ? Regardez notamment dans le fichier* `test/start.S`. *Que faut-il mettre en place pour utiliser ce mécanisme dans le cas des threads créés avec* `ThreadCreate`*? NB : votre solution doit être indépendante de l'addresse* réelle *de chargement de la fonction et de* `ThreadExit`. *Il faudra donc passer cette adresse en paramètre lors de l'appel système... À vous de jouer !*

Partie IV. Sémaphores (bonus)

Action IV.1. *Remontez l'accès aux sémaphores (type* `sem_t`*, appels système* `P` *et* `V`*) au niveau des programmes utilisateurs. Démontrez leur fonctionnement par un exemple de producteurs-consommateurs au niveau* utilisateur *cette fois.*