Quatrième chapitre

Exécution des programmes

- Schémas d'exécution
- Interprétation
  Principe de fonctionnement d'un interpréteur
  Exemple d'interpréteur : le shell
- Compilation et édition de liens
  Principes de la compilation
  Liaison, éditeur de liens et définitions multiples en C
  Bibliothèques statiques et dynamiques
- Conclusion

Schémas d'exécution d'un programme

- Programme (impératif) : suite d'instructions, d'actions successives
- Exécution : faire réaliser ces actions par une machine dans un état initial pour l'amener à un état final
- Langage [de la] machine : suite de 0 et de 1, difficile pour humains
- Langues humaines ambigües et complexes, inaccessibles aux machines

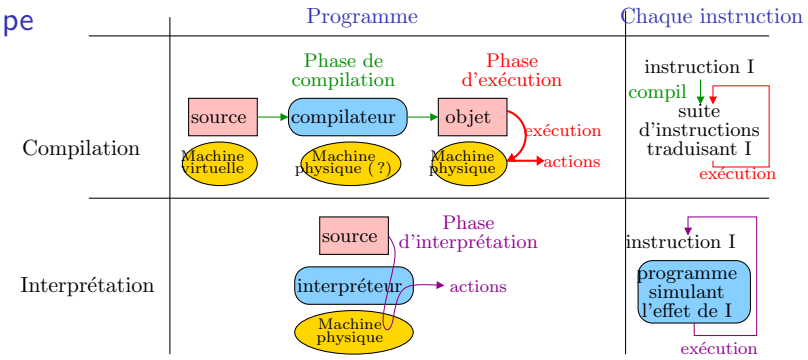
$\Rightarrow$ les humains utilisent des langages informatiques traduits en langage machine

Convertir les langages informatiques en langage machine

- Compilation : conversion à priori, génération d'un fichier *binaire exécutable* depuis un fichier *source* par un **compilateur**
- Interprétation : programme auxiliaire (**interpréteur**) traduit au fur et à mesure interpréteur $\approx$ simulateur de machine virtuelle ayant un autre langage machine
- Mixte : compilation pour une machine intermédiaire
  $+$ interprétation par une *machine virtuelle*

Compilation et interprétation

Principe



Exemples

- Compilation : C, C++, Fortran, Ada, assembleur
- Interprétation : shell Unix, Tcltk, PostScript, langage machine
- Autre : Lisp (les deux), Java/Scala (machine virtuelle), Python (interprétation ou machine virtuelle), Ocaml (interprétation, compilation ou machine virtuelle)
- On peut faire de la compilation croisée voire pire

Compilation et interprétation : comparaison

Compilation

☺ Efficacité
- Génère du code machine natif
- Ce code peut être optimisé (lien)

☹ Mise au point
- Lien erreur $\leftrightarrow$ source complexe

☹ Cycle de développement
- cycle complet à chaque modification : compilation, édition de liens, exécution

Interprétation

☹ Efficacité
- 10 à 100 fois plus lent
- appel de sous-programmes
- pas de gain sur les boucles

☺ Mise au point
- Lien instruction $\leftrightarrow$ exécution trivial
- Trace et observation simples

☺ Cycle de développement
- cycle très court : modifier et réexécuter

- L'interprétation regagne de l'intérêt avec la puissance des machines modernes
- On peut parfois (eclipse/Visual) recharger à chaud du code compilé

Schéma mixte d'exécution

Objectifs

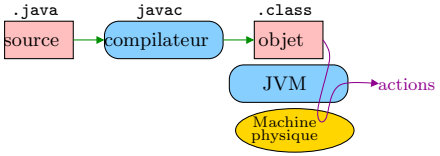
- Combiner les avantages de la compilation et de l'interprétation
- Gagner en portabilité sans trop perdre en performances

Principe

- Définir une machine virtuelle (qui n'existe donc pas)
- Écrire un simulateur de cette machine virtuelle
- Écrire un compilateur du langage source vers le langage machine virtuel

Exemple : Java inventé pour être (le langage d'internet)

- Programmes (applets) téléchargés doivent fonctionner sur toutes les machines
- Phase de compilation et objets indépendents de machine physique
- Portage sur une nouvelle machine : écrire une JVM pour elle



Quatrième chapitre

Exécution des programmes

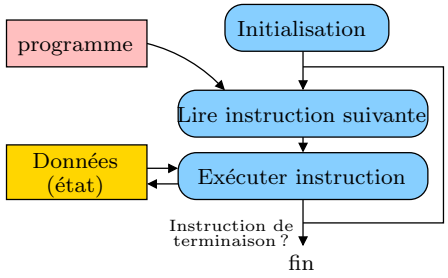
Principe de fonctionnement d'un interpréteur

Définition de la machine virtuelle

- Éléments du ≪pseudo-processeur≫ (analogie avec processeur physique)
  - pseudo-registres : zones de mémoire réservées
  - pseudo-instructions : réalisées par une bibliothèque de programmes
- Structures d'exécution
  - allocation des variables
  - pile d'exécution

Cycle d'interprétation

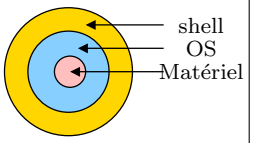
- Analogie avec cycle processeur
- Pseudo-compteur ordinal (PC)



Exemple d'interpréteur : le shell

Définition

- Programme interface entre OS et utilisateur interactif Interpréteur le langage commande (→ appels systèmes)
- Mot à mot, shell=coquille, car ça ≪englobe≫ l'OS
- Il existe plusieurs shells (sh, csh, tcsh, bash, zsh, *etc.*)



Fonctions principales d'un shell

- Interpréteur commandes des usagers ; accès aux fonctions de l'OS
  - Création et exécution de processus
  - Accès aux fichiers et entrées / sorties
  - Utilisation d'autres outils (éditeur, compilateur, navigateur, *etc.*)
- Gestionnaire de tâches : travaux en mode interactif ou en tâche de fond
- Personnaliser l'environnement de travail : variables d'environnement
- *Scripting :* programmation en langage de commande (if, while, *etc.*)

Quatrième chapitre

Exécution des programmes

Composition de programmes

Les programmes ne s'exécutent jamais «seuls»

- Applications modernes = assemblage de modules (conception et évolution ☺)
- Applications modernes utilisent des «bibliothèques» de fonctions
- *Cf.* programmation objet et prolongement «par composants» (en PAR, 3A)

Problème : la liaison

- Un programme *P* appelle une procédure `proc` définie dans *Q*
- Appel de routine en assembleur : `jump` à une adresse donnée
- Question : quelle adresse associer à `proc` dans le code machine de *P* ?
- Réponse : on ne sait pas tant que le code machine de Q est inconnu
- Solution : Dans *P*, liaison entre `proc` et son adresse faite après compilation
  Édition de liens

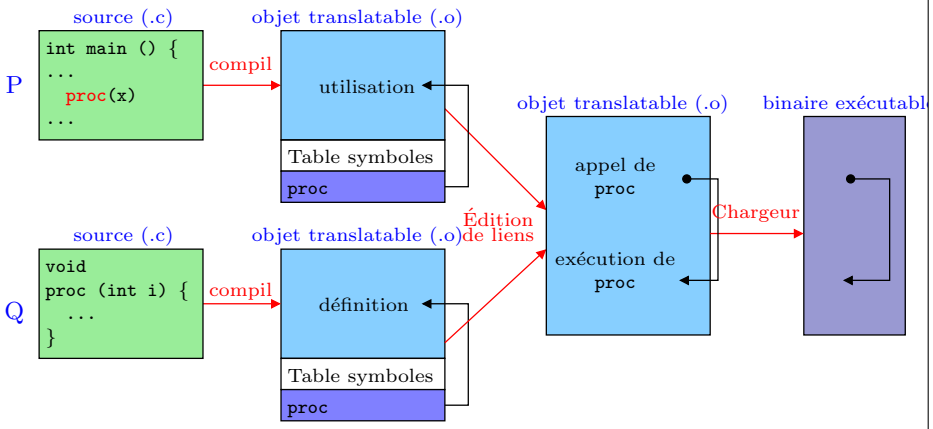
Cycle de vie d'un programme compilé

- Compilation en programme objet absolu
  - Adresses (des routines) en mémoire fixées

- Compilation en programme objet translatable
  - Adresses définies à une translation près
  - ☺ On peut donc regrouper plusieurs objets translatables dans un seul gros
  - ☹ Ce n'est pas exécutable (le CPU ne translate pas)
  - ⇒ chargeur convertit code translatable (combinable) en code absolu (exécutable)

- Exemples
  - `gcc -c prog.c` ⇒ `prog.o` = programme objet translatable
  - `gcc -o prog prog.c` ⇒ `prog` programme objet absolu (compilo + chargeur)

Édition de liens



- L'éditeur de lien et le chargeur sont souvent regroupé dans le même utilitaire : `ld`

Exemples de commandes de compilation

- La commande gcc invoque compilateur, éditeur de liens et chargeur
  `gcc prog.c` → `a.out` = binaire exécutable
  `gcc -o prog prog.c` → `prog` = binaire exécutable
  `gcc -c prog.c` → `prog.o` = binaire translatable

- Si un programme est composé `prog1.c` et `prog2.c`, alors :
  `gcc prog1.c prog2.c` → binaire exécutable complet dans `a.out`
  `gcc -c prog1.c prog2.c` → `prog1.o` et `prog2.o` = 2 objets translatables
  `gcc -o prog prog.o prog1.o` → `prog` depuis objets translatables

Quelques problèmes de l'édition de liens

Théorie relativement simple...

- Définition manquante

```
...
proc(x);
...
/* pas de définition de proc */
```

```
$ gcc -o prog prog1.c prog2.c prog3.c
/tmp/cckdgmLh.o(.text+0x19):
In function 'main':
undefined reference to 'proc'
collect2: ld returned 1 exit status
$
```

- Définitions multiples

```
...
proc(x);
...
int proc; /* déf. comme entier */
...
void proc(int x) {
... /* déf. comme fonction */
}
```

```
$ gcc -o prog prog1.c prog2.c prog3.c
$
```

- Pas de message d'erreur !
- Que se passe-t-il ?

... pratique souvent déroutante

Définitions multiples en C

Deux catégories de symboles externes

- Symboles «externes» : visible de l'éditeur de liens (hors de toute fonction)
- Symbole fort :
  - définition de procédures
  - variables globales initialisée
- Symbole faible :
  - déclaration de procédures en avance (sans le corps de fonction)
  - variables globales non-initialisée

Règles de l'éditeur de liens pour les définitions multiples

- deux symboles forts : interdit ! (erreur détectée)
- un symbole fort et plusieurs faibles : le fort est retenu
- plusieurs symboles faibles : choix aléatoire

Pièges des définitions multiples

Module A	Module B	
`int proc(int i) {`	`int proc(int i) {`	Deux symboles forts : interdit
`int x;` `int p1(int i) {`	`int x;` `int p2(int i) {`	Deux symboles faibles désignent le même objet

`int x; /* 4o */`
`int y; /* 4o */`
`int p1(int i) {`
	`double x; /* 8o */`
	`int p2(int i) {`
		Deux symboles faibles. Modifier B.x écrase A.y ! !

`int x=3;`
`int y;`
`int p1(int i) {`
	`double x;`
	`int p2(int i) {`
		A.x fort ; B.x faible ; Modifier B.x écrase encore A.y ! !

- Contrôle de types strict entre modules pas obligatoire en C

⇒ Déclaration explicite des références externes nécessaire

Exercice : que se passe-t-il dans l'exemple précédent (deux pages avant) ?

int proc = symbole faible ; void proc(int x) = symbole fort, c'est lui qui est choisi (mais comportement étrange quand on change int proc)

Déclarations des variables externes

- Règle 1 : utiliser des entête (.h) pour unifier les déclarations
- Règle 2 : éviter les variables globales autant que possible !
  - déclarer `static` toute variable hors des fonctions (visibilité = fichier courant)
- Règle 3 : bon usage des globales (si nécessaire)
  - chaque globale déclarée fortement dans un module M
  - `extern` dans tous les autres (avec son type)
  - Seulement consultation depuis l'extérieur, modification seulement depuis M
    Fonctions dans M pour la modifier depuis ailleurs, au besoin (*setters*)
- Règle 4 : bon usage des fonctions
  - déclaration explicite des fonctions externes (avec signature)
  - mot clé `extern` optionnel : la signature (ou prototype) suffit

Fichier un.c

```
int x;
extern double y;
static int z;
int f(int i) {... }
static int g(int i) {... }
/* x: écriture
   y: lecture
   z: écriture
   f: accessible
   g: accessible */
```

Fichier deux.c

```
extern int x;
double y;


/* x: lecture
   y: écriture
   z: non-référençable
   f: invisible
   g: non-référençable */
```

Fichier trois.c

```
extern double y;
int f(int i);


/* x: invisible
   y: lecture
   z: non-référençable
   f: accessible
   g: non-référençable */
```


Exemples

Module A

```
int f(int i) { ... }
```

Module B

```
static double f=4.5;
```

Que se passe-t-il ?

Pas de problème
f.B static ⇒ invisible d'ailleurs

```
void p2(void);
int main() {
  p2();
  return 0;
}
```

```
#include <stdio.h>

char main;

void p2() {
  printf("0x%x\n",
         main);
}
```

Ca marche (et affiche 0x55).
Link sans soucis : main.B est faible, il est écrasé
Execution : ref(main.B) = def(main.A), et 0x55 est l'adresse du main() à gauche

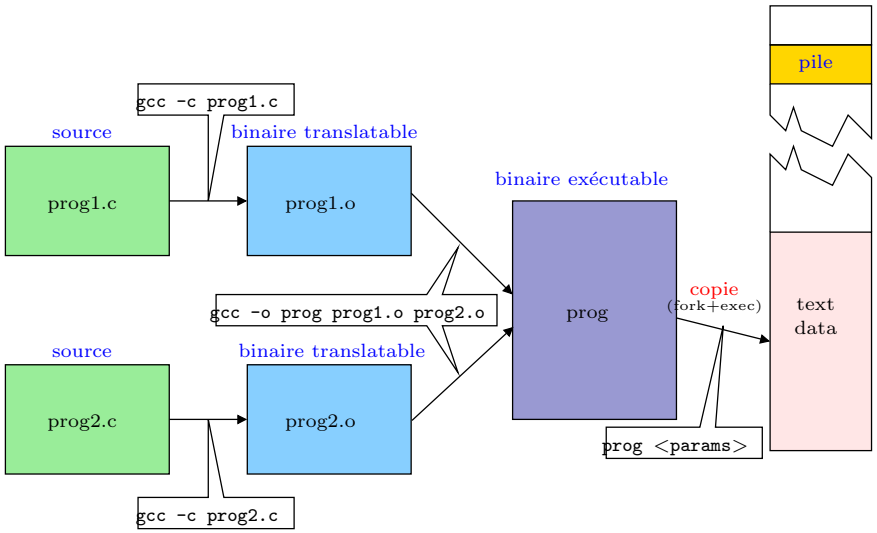
Exercice : pourquoi chaque programme doit contenir une fonction main() ?

car par convention, exec() passe le controle à une fonction de ce nom

Exercice : que se passe-t-il quand main() fait return ou exit()

return : la fonction qui a invoqué main() reprend le contrôle. Elle appelle _exit()
exit : _exit() aussi ; libc reprend le contrôle, termine le processus et prévient l'OS

Cycle de vie d'un programme : résumé



Quatrième chapitre

Exécution des programmes

Bibliothèques

- Bibliothèque = recueil de fonctions utilisées dans divers programmes
- Ne pas réinventer la roue ; réutilisation du code
- Exemples : `atoi`, `printf`, `malloc`, `random`, `strcmp`, `sin`, `cos`, `floor`, *etc.*

Divers moyens de rendre ce service :

- Réalisation par le compilateur :
  - Compilateur Pascal remplace appels fonctions standards par code correspondant
  - ☹ Changer le compilateur pour changer ce code
- Approche par binaire translatable :
  - Le code de toutes les fonctions standards placé dans un `/usr/lib/libc.o`
  - ☹ Plusieurs Mo à chaque fois, même si inutilisé
- Approche par collections de binaires translatables :
  - Code chaque fonction dans un binaire translatable différent
  - ☹ `gcc toto.c /usr/lib/printf.o /usr/lib/scanf.o ...` (un peu lourd)
- Approche par archives de binaires translatables (**bibliothèques statiques**) :
  - Concaténation de tous les .o dans un fichier, et l'éditeur de lien choisi

Bibliothèques statiques

- `/usr/lib/libc.a` : bibliothèque standard du langage C (printf, strcpy, *etc.*)
- `/usr/lib/libm.a` : bibliothèque mathématique (cos, sin, floor, *etc.*)

Utilisation :

- Passer bibliothèques utilisées à l'éditeur de lien (libc.a ajoutée par défaut)
  `gcc -o prog prog.c /usr/lib/libm.a`
- L'éditeur de liens ne copie que les ≪fonctions≫ effectivement utilisées
- Notation abrégée : -l<nom> équivalent à /usr/lib/lib<nom>.a
  Exemple : `gcc -o prog prog.c -lsocket` (inclut /usr/lib/libsocket.a)
- Chemin de recherche : Variable `LIBPATH`, ajout avec `gcc -L<rep>`

Format et création

- Archives de binaires translatables
- Manipulées par `ar`(1)
  `ar rcs libamoi.a fonct1.o fonct2.o fonct3.o`
- Remarque : historiquement, `tar` est une version particulière de `ar`

Dépendances entre bibliothèques statiques

- Difficulté lorsqu'une bibliothèque utilise une autre bibliothèque
- L'ordre des -ltoto lors de l'appel à l'éditeur de liens devient important car :
  - Éditeur de liens ne copie que les objets nécessaires, pas toute l'archive
  - Il ne parcourt ses arguments qu'une seule fois
- Règle : déclaration de fonction doit être placée après son premier usage

Exercice : quelle(s) commande(s) fonctionne(nt)/échoue(nt) ? Pourquoi ?

prog.c utilise machin() de libmachin.a, et machin() utilise truc() de libtruc.a

- `gcc -o prog prog.c -ltruc -lmachin` : référence à truc() indéfinie
- `gcc -o prog prog.c -lmachin -ltruc` : fonctionne

Exercice : que faire en cas de dépendances circulaires ?

faire figurer une bibliothèque deux fois pour casser le cycle

Bibliothèques dynamiques

- Défauts des bibliothèques statiques :
  - Code dupliqué dans chaque processus les utilisant
  - Liaison à la compilation (nouvelle version de bibliothèque ⇒ recompilation)
- Solution : Bibliothèques dynamiques :
  Partage du code entre applications et chargement dynamique
- Exemples : Windows : **DLL** (dynamically linkable library) ; Unix : **.so** (shared object)
- Bibliothèques partagées à plus d'un titre :
  sur disque (un seul .so) et en mémoire (physique, du moins)
- Chargement dynamique :
  - ☹ Impose une édition de lien au lancement (`ldd`(1) montre les dépendances)
  - ☺ Mise à jour des bibliothèques simplifiée (mais attention au DLHell)
    Versionner les bibliothèques (et même les symboles) n'est pas trivial
  - ☺ Mécanisme de base pour les greffons (*plugins*)
  - ☺ Même possible d'exécuter du code au chargement/déchargement !

```
void chargement(void) __attribute__((constructor)) {...}
void alafin(void) __attribute__((destructor)) {...}
```

Bibliothèques dynamiques

Construction

- `gcc -shared -fPIC -o libpart.so fonct1.c fonct2.c fonct3.c`
- `-fPIC` (compil.) : demande code repositionnable (Position Independent Code)
- `-shared` (éd. liens) : demande objet dynamique

Outils (voir les pages de man)

- ar : construire des archives/bibliothèques
- strings : voir les chaines affichables
- strip : supprimer la table des symboles
- nm : lister les symboles
- size : taille de chaque section d'un fichier elf
- readelf : afficher la structure complète et tous les entêtes d'un elf (nm+size)
- objdump : tout montrer (même le code desassemblé)
- ldd : les bibliothèques dynamiques dont l'objet dépend, et où elles sont prises

Chargement dynamique de greffons sous linux

Greffon *(plugin)* :

- Bout de code chargeable dans une application pour l'améliorer

→ Choisir l'implémentation d'une fonctionnalité donnée (affichage, encodage)

→ Ajouter des fonctionnalités (mais bien plus dur, nécessite API dynamique)

Compiler du code utilisant des greffons :

- `gcc -rdynamic -ldl` *autres options*

Exercice : Pourquoi ce -ldl ?

Pour charger une bibliothèque nommée dl (dynamic library)

Interface de programmation sous UNIX modernes (Linux et Mac OSX)

```
#include <dlfcn.h>
void *dlopen(const char *filename, int flag);                    /* charge un greffon */
void *dlsym(void *handle, const char *symbole); /* retourne pointeur vers ≪symbole≫ */
int   dlclose(void *handle);                                     /* ferme un greffon */
char *dlerror(void);            /* affiche la cause de la dernière erreur rencontrée */
```


Exemple de greffon sous linux

chargeur.c

```
#include <unistd.h>
#include <stdio.h>
#include <errno.h>
#include <dlfcn.h>
int main(int argc, char * argv[]) {
  char path[256], *erreur = NULL;
  int (*mon_main)();
  void *module;
  /* Charge le module */
  module = dlopen(argv[1], RTLD_NOW);
  if (!module) {
    fprintf (stderr, "%s\n", dlerror());
    exit(1);
  }
  /* Retrouve la fonction d'entrée */
  mon_main = dlsym(module, "mon_main");
  erreur = dlerror();
  if (erreur != NULL) {
    perror(erreur);
    exit(1);
  }
  /* Appelle cette fonction */
  (*mon_main)();
  /* Ferme tout */
  dlclose(module);
  return 0;
}
```

module_un.c

```
int mon_main() {
  printf("Je suis le module UN.\n");
}
```

module_deux.c

```
int mon_main() {
  printf("Je suis le module DEUX.\n");
}
```

```
$ gcc -shared -fPIC -o un.so module_un.c
$ gcc -shared -fPIC -o deux.so module_deux.c
$ gcc -o chargeur chargeur.c -rdynamic -ldl
$ ./chargeur ./un.so
Je suis le module UN.
$ ./chargeur ./deux.so
Je suis le module DEUX.
$ ldd chargeur
  libdl.so.2 => /lib/i686/cmov/libdl.so.2 (0xb7f
  libc.so.6 => /lib/i686/cmov/libc.so.6 (0xb7e7
  /lib/ld-linux.so.2 (0xb7fd1000)
$ nm chargeur | grep mon_main
$
```


Bibliothèques dynamiques et portabilité

Chaque système a sa propre interface

- Solaris, Linux, MacOSX et BSD : dlopen (celle qu'on a vu, par SUN)
- HP-UX : shl_load
- Win{16,32,64} : LoadLibrary
- BeOS : load_add_on

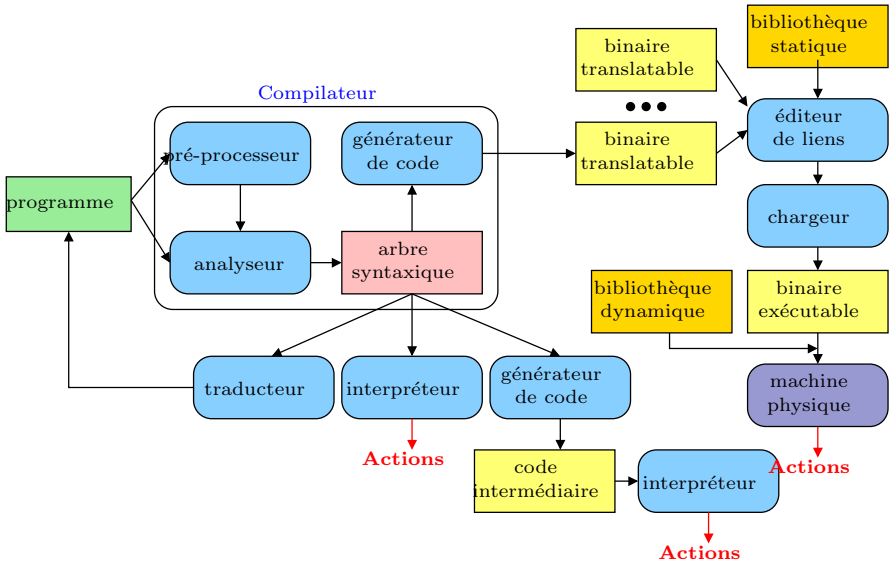
`libtool` offre une interface portable

- nommé libltdl (LibTool Dynamic Loading library)
- Il permet également de compiler une bibliothèque dynamique de façon portable
- Associé à autoconf (usage peu aisé ; compilation depuis UNIX principalement)

Interface (fonctions de base : similaires à dlopen)

```
#include <ltdl.h>
lt_dlhandle lt_dlopen(const char *filename);
lt_ptr_t lt_dlsym(lt_dlhandle handle, const char *name);
int lt_dlclose(lt_dlhandle handle);
const char *lt_dlerror(void);
int lt_dlinit(void);
int lt_dlexit(void);
```

Schéma général d'exécution de programmes



Résumé du quatrième chapitre

Schémas d'exécution. Problème :

- Interprétation : peu efficace, mais pratique
- Compilation : efficace, mais lors de la mise au point : cycle complet à chaque modif
- Autres approches : machine virtuelle (Java)

Bibliothèques et liaison. Pourquoi :

- Éditeur de lien : assembler les "modules"
- Définitions multiples en C
- Bibliothèques statiques
  - Pourquoi : collection de fonctions
  - Comment : archive ar
  - Avantages et défaut : simple, mais duplique le code dans les binaires
- Bibliothèques dynamiques
  - Pourquoi : partage du code entre applications
  - Comment : edition de liens au lancement