Machines Virtuelles
Cours 2 : La machine virtuelle O'Caml

Pierre Letouzey [1]
pierre.letouzey@inria.fr

PPS - Université Denis Diderot – Paris 7

janvier 2012

1. Merci à Y. Régis-Gianas pour les transparents

À la découverte d'un fichier « CMO »

À la découverte d'un fichier « CMO »

- Observons le contenu du fichier `.cmo` produit par la commande « `ocamlc -c` » sur le programme O'CAML suivant :

```
let x = 1 + 2 + 3 * 4 / 5
```

⇒ Comment ? À l'aide de quelle commande (sous UNIX) ?

Représentation binaire d'un fichier « CMO »

- À l'aide de la commande `hexedit`, on peut retrouver quelques éléments de notre programme initial :

```
00000000   43 61 6D 6C  31 39 39 39  4F 30 30 37  00 00 00 58  Caml1999O007...X
00000010   67 00 00 00  05 00 00 00  6C 00 00 00  04 00 00 00  g.......l.......
00000020   6B 00 00 00  70 00 00 00  71 00 00 00  69 00 00 00  k...p...q...i...
00000030   7F 00 00 00  02 00 00 00  6E 00 00 00  0A 00 00 00  ........n.......
```

- On retrouve les entiers 5, 4 et 2.
- C'est tout de même assez cryptique...

Format d'un fichier « CMO »

- Il existe une spécification du format « CMO » que l'on peut trouver ici :

  `http://cadmium.x9c.fr/distrib/caml-formats.pdf`

- Il existe aussi des outils pour obtenir un affichage plus lisible de ces fichiers :
  - `ocamldumpobj` ou `ocamlc -dinstr` :
    Affiche les descriptions textuelles des instructions.
  - `objinfo` :
    Affiche des informations supplémentaires sur le code.

Retour sur l'exemple

- Voici la version lisible du code du fichier `.cmo` :

```
## start of ocaml dump of "test.cmo"
          0 CONSTINT 5
          2 PUSHCONSTINT 4
          4 PUSHCONST3
          5 MULINT
          6 DIVINT
          7 PUSHCONST1
          8 OFFSETINT 2
         10 ADDINT
         11 PUSHACC0
         12 MAKEBLOCK1 0
         14 POP 1
         16 SETGLOBAL Test
## end of ocaml dump of "test.cmo"
```

$\Rightarrow$ Il faut comprendre ces instructions et sur quel environnement elles agissent.

La machine virtuelle d'O'Caml

- Elle est réalisée par le programme exécutable `ocamlrun`.

⇒ (`man ocamlrun`)

- Elle est programmée en `C`.
- Dans les sources d'O'Caml, on la trouve dans le répertoire « `byterun` ».
- Le fichier principal est « `interp.c` ».

⇒ Un programme qui ressemble beaucoup à la machine virtuelle que vous avez programmée en TD . . . Toutes deux implémentent le cycle « Récupère-Décode-Exécute » (*Fetch-Decode-Execute*).

L'architecture des ordinateurs en 20 minutes

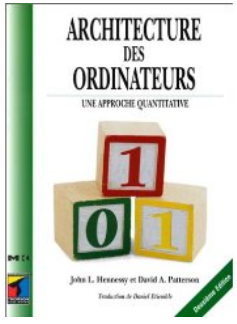
Architecture des ordinateurs

- Comprendre l'architecture des ordinateurs est essentiel.

$\Rightarrow$ Comment fonctionne un ordinateur ?

$\Rightarrow$ Qu'est-ce qui est effectivement réalisable ?

- Deux références à ce sujet :



- *Architecture des ordinateurs : une approche quantitative*
  John Hennessy, David Patterson
  Intern. Thomsom Publicat. (January 7, 1999)
  ISBN-10 : 2841800229
- *Cours d'Architecture des Ordinateurs*
  Emmanuel Viennet

  `http://www-gtr.iutv.univ-paris13.fr/Cours/Mat/Architecture/Cours/polyarch.pdf`

Composants principaux d'un ordinateur

- Processeur (*Central Processing Unit*) : exécute les instructions.
- Mémoire principale : stockage pour les programmes et les données traitées.
- Mémoire secondaire : stockage persistants des programmes et des données.
- Périphérique d'entrée : communication de l'utilisateur vers l'ordinateur.
- Périphérique de sortie : communication de l'ordinateur vers l'utilisateur.

Le processeur

- On distingue trois composantes à l'intérieur du processeur :
  - L'unité de contrôle coordonne l'avancée des calculs.
  - L'unité arithmétique effectue les calculs.
  - Les registres servent de mémoire à accès très rapide.
- On distingue différents types de registres, fonction de leur utilisation :
  - les registres d'adressage ;
  - les registres de données d'entrées ;
  - les registres de résultats.
- Il existe souvent des registres spéciaux :
  - `IR` : un registre qui stocke l'instruction courante.
  - `PC` : un registre qui stocke l'adressage de l'instruction courante dans le code.

Les ensembles d'instructions

- Les processeurs qui ont un ensemble réduit d'instructions généralistes sont de type RISC (*Reduced Instruction Set Computer*)
- Les processeurs qui ont un ensemble important d'instructions spécialisées sont de type CISC (*Complex Instruction Set Computer*)

$\Rightarrow$ Une frontière pas toujours très nette ...

La mémoire

- La mémoire est exclusivement formée de 0 et de 1, les bits.
- Nous choisissons une **interprétation** de cette mémoire.
- Pour faciliter la définition de leur interprétation et leur manipulation, on a choisi de grouper ces bits en paquets de 8 bits, appelés octets (*bytes*).
- Pour traiter plus rapidement les informations, un processeur groupe ces octets en mots. Aujourd'hui, les processeurs traitent les informations par paquet de 8 octets, c'est-à-dire 64 bits.
- La taille des mots varie d'un processeur à l'autre, mais il s'agit toujours d'un nombre paire d'octets.
- Les unités pour quantifier la taille d'une information sont des puissances de 1024 octets :

Kilo-octet	Ko/KB	1024 octets
Mega-octet	Mo/MB	$1024 * 1024$ octets
Giga-octet	Go/GB	$1024 * 1024 * 1024$ octets
Tera-octet	To/TB	$1024 * 1024 * 1024 * 1024$ octets

Les informations dans la mémoire

- Une information est localisée dans la mémoire par une adresse.
- La plupart du temps, chaque cellule mémoire contient un octet.
- Un mot doit donc être réparti sur plusieurs octets consécutifs.
- Il existe plusieurs façons d'agencer ces octets :
  - *little endian* (i386, . . .) :
    Des octets de poids faible vers les octets de poids fort.
  - *big endian* (SPARC, . . .) :
    Des octets de poids fort vers les octets de poids faible.
  - Il existe des agencements plus « exotiques ».
- Le processeur lit le contenu d'une adresse en le stockant dans un registre.
- Le processeur écrit dans une adresse en y stockant le contenu d'un registre. Dans cette situation, le précédent contenu est détruit !
- La mémoire primaire est rapide mais s'efface lorsque la machine est éteinte.
- La mémoire secondaire est lente mais persiste même si la machine est éteinte.

Les programmes dans la mémoire

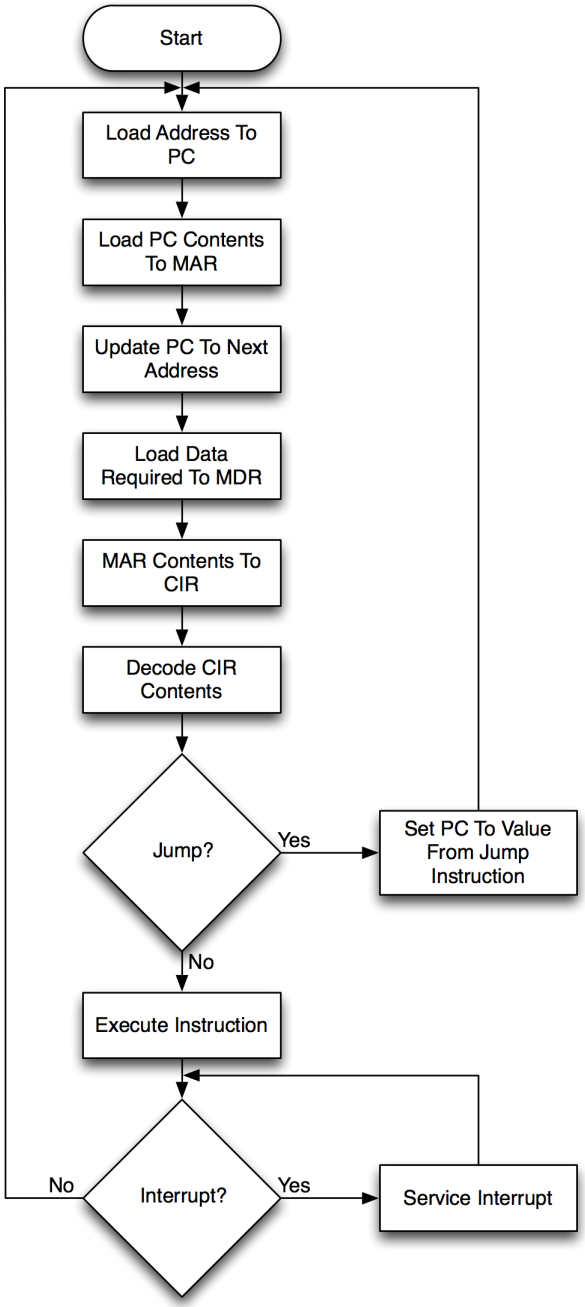
- Les programmes sont stockés dans la mémoire secondaire.
- Pour les exécuter (rapidement), ils sont chargés en mémoire primaire.
- Une instruction est représentée par une séquence de bits qui suit généralement l'organisation suivante :

- La taille d'une instruction est généralement proportionnelle à la taille des mots du processeur.
- Le code de l'opération (*opcode*) est un indice faisant référence à la table d'instructions du processeur (`add`, `mul`, `push`, ...).
- En fonction de ce code, la suite de l'instruction est décodée : ce sont des données réparties en deux catégories, les opérandes et les adresses.

Le cycle « Récupère-Décode-Exécute »

- Le cycle « Récupère-Décode-Exécute » (*Fetch-Decode-Execute*) est l'activité principale d'un processeur.
- On peut le décrire (naïvement) ainsi :
  1. Phase « Récupère » :
     Le processeur détermine la prochaine instruction à partir de l'adresse contenue dans le registre `PC` et la stocke dans le registre `IR`.
     - Quand l'exécution du programme débute, le registre `PC` est placé au début du programme.
     - Dès que `IR` est mis-à-jour, `PC` est incrémenté pour la prochaine itération.
  2. Phase « Décode » :
     Le processeur interprète la partie « données » de l'instruction en fonction du code de l'opération.
  3. Phase « Exécute » :
     Le processeur effectue l'opération.
  4. Retour en 1.
- La vitesse de l'horloge, la fréquence du processeur, correspond au nombre de cycles effectués par unité de temps.

Les machines modernes . . .



- Ce qui précède est encore très éloigné de la réalité.
- Vous devrez aborder de nombreuses questions pour comprendre réellement les machines sur lesquelles vous travaillez :
  - Comment traiter l'aspect asynchrone des entrées/sorties ?
  - Quels procédés ont été inventés pour exécuter plus d'une instruction en un cycle ou encore pour accéder plus rapidement à la partie de la mémoire la plus utile ?
  - . . .

Les entrailles de la machine virtuelle d'O'Caml

Éléments principaux de la machine virtuelle d'O'Caml

- un programme (liste de bytecodes)
- un registre pc : pointeur de code dans le programme
- un registre accu
- une pile
- accu+pile = a-pile
- un tas (heap) où placer les données **allouées**

Éléments qui nous intéresserons moins :

- un environnement global (pour les entités définies "à toplevel")
- un pointeur env vers une archive d'environnement
- un registre extra_args

Retour sur l'exemple

instruction	accu	pile
`CONSTINT 5`	5	...
`PUSHCONSTINT 4`	4	5 ...
`PUSHCONST3`	3	4 5 ...
`MULINT`	12	5 ...
`DIVINT`	2	...
`PUSHCONST1`	1	2 ...
`OFFSETINT 2`	3	2 ...
`ADDINT`	5	...

Les instructions de la machine virtuelle

Gestion de la pile

- PUSH :
  Empile accu
- POP n :
  Dépile n éléments du sommet de la pile
- ACC n :
  accu reçoit la valeur de la n-ième case de la pile
  ($n = 0$ pour le sommet de pile).
  Variantes :
  - ACC0 ... ACC7 : instructions spécialisées pour $n < 8$
  - PUSHACC n : on sauve accu via PUSH avant un ACC n
  - PUSHACC0 ... PUSHACC7 : cf. PUSHACC n
- ASSIGN n :
  Le n-ième élément de la pile est remplacé par le contenu de accu.
  Celui-ci vaut ensuite `()`.

Arithmétique

- CONSTINT n :
  L'entier n est placé dans accu.
  Variantes :
  - CONST0 ... CONST3 : cf CONSTINT pour $n < 4$
  - PUSHCONSTINT n : PUSH + CONSTINT n
  - PUSHCONST0...3 : cf. PUSHCONSTINT n
- OFFSETINT n :
  accu est incrémenté de n
- NEGINT :
  accu reçoit l'opposé de sa valeur.
- ADDINT :
  accu reçoit accu + sommet de la pile (qui est dépilé au passage).
  Cf. vision sous forme de a-pile.
- idem avec les autres opérateurs : SUBINT, MULINT, DIVINT, MODINT, ANDINT, ORINT, XORINT, LSLINT, LSRINT, ASRINT, (U)LTINT, LEINT, GTINT, (U)GEINT, (N)EQ.

Aiguillages

- BRANCH o :
  Saut obligatoire vers o instructions plus loin (ou en arrière selon le signe de o).
- BRANCHIF o :
  Saut de o instructions si accu représente true
- BRANCHIFNOT o :
  Saut de o instructions si accu représente false

(La description des valeurs true et false viendra un peu plus tard.)

Variantes :

- BEQ n o : compare n avec le contenu de accu et saute de o si le test est positif.
- Idem avec BNEQ, B(U)LTINT, BLEINT, BGTINT, B(U)GEINT.

Mémoire et données O'Caml

Toute donnée en O'Caml correspond à un mot machine (32/64 bits) :

- soit cet entier est une valeur immédiate (`int`, `bool`, ...) ;
- soit cet entier est un pointeur vers un bloc mémoire.

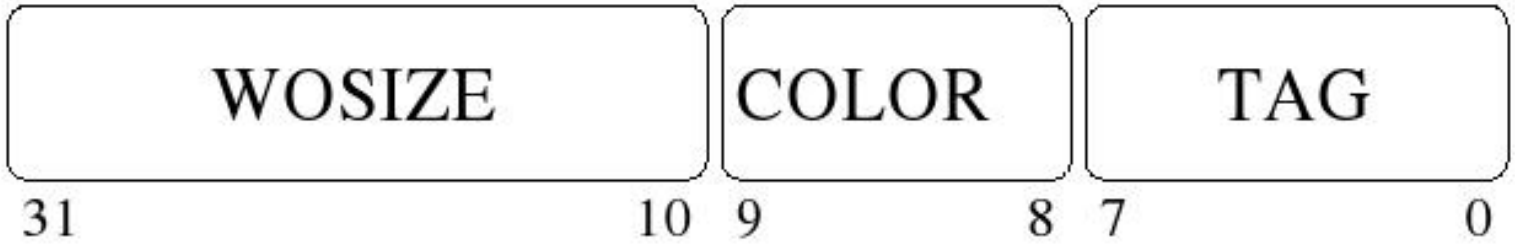
Données codés par des entiers

- `int` : entiers signés sur 31 ou 63 bits. (Nous reviendrons sur ce point.)
- `char` : codé par le code ASCII correspondant.
- `bool` : `false` (resp. `true`) est codé par 0 (resp. 1)
- `unit` : `()` est codé par 0
- Dans un type concret `type t = A | B of int | C`,
  les constructeurs constants `A`, `C` sont des numéros : 0 et 1.
- En particulier : `[]` est codé par `0`, tout comme `None`, ...

Données allouées par blocs : tout le reste !

- Un bloc en mémoire est une portion du tas (ou heap).
- L'entier référençant cette zone est son adresse (pointeur).
- Le bloc commence par un entier d'en-tête, suivi des données.

En-tête (sur une machine 32-bits) :



Exemple de *Tag* (cf `byterun/mlvalue.h`) :

- Pour un `float` : 253
- Pour une fonction (fermeture) : 247
- Tag $\in$ [0..245] : un constructeur non-constant

Exemples de blocs de données allouées

- Un tableau : `[|1;2|]`
  Wosize $= 2$
  Color $=$?? (initialement white, soit 0)
  Tag $= 0$ (1er "constructeur" du type `array`)
  En mémoire : $\boxed{2 * 2^{10}}\boxed{1}\boxed{2}$
  (en fait pas tout à fait exact, cf plus loin)
- Une paire : `(1,2)`
  Même représentation en mémoire ! !
- Une liste : `[1;2]`
  Deux blocs de taille 2 (Cf. dessin au tableau) :
  $\boxed{2 * 2^{10}}\boxed{1}\boxed{\text{addr\_2nd\_bloc}}$ $\boxed{2 * 2^{10}}\boxed{2}\boxed{0}$

La séparation entre entiers et pointeurs

- Tous les blocs alloués peuvent un jour devenir inutiles :
- Un ramasse-miette (*Garbage Collector (GC)*) fait régulièrement le ménage.

$\Rightarrow$ Besoin de parcourir les données (cf Color).

$\Rightarrow$ Besoin de savoir reconnaître rapidement les pointeurs.

- Convention O'Caml :
  Tout entier pair est un pointeur,
  Tout entier impair $2n+1$ représente l'entier n.
- C'est la raison du bit manquant dans la taille de `int` !
- Retour sur les exemples précédents :
  - 0 est codé en mémoire par 1.
  - 1 par 3, etc.

Instructions de la machine virtuelle pour les blocs

- MAKEBLOCK n k :
  Fabrique un bloc de tag k et de données n éléments retirés du haut de l'a-pile. accu reçoit ensuite le pointeur vers le bloc ainsi créé.
- GETFIELD n :
  accu doit contenir un pointeur vers un bloc. accu reçoit alors la n-ième donnée du bloc.
- SETFIELD n :
  accu doit contenir un pointeur vers un bloc. La n-ième donnée du bloc est alors remplacée par la valeur prise au somme de la pile. accu reçoit ensuite `()`.
- VECTLENGTH :
  accu reçoit le nombre de données du bloc pointé par accu.

Instructions de la V.M. pour les blocs : variantes

- MAKEBLOCK1,2,3, GET/SETFIELD0,1,2,3 :
  cf. ce qui précède.
- GETVECTITEM, SETVECTITEM :
  cf GETFIELD et SETFIELD, mais avec tous les arguments dans accu+pile.
- ATOM k :
  Remplace MAKEBLOCK 0 k dans le cas d'un bloc avec 0 données (essentiellement `[||]`). Il existe aussi : ATOM0, PUSHATOM k et PUSHATOM0.
- Les tableaux de `float` sont traités à part : MAKEFLOATBLOCK n, GET/SETFLOATFIELD n
- Les chaînes de caractères aussi : GET/SETSTRINGCHAR
- OFFSETREF n : ajoute n au premier champ d'un bloc.

Instructions de la machine virtuelle : switch

- Cette instruction permet de réaliser le `match` de O'Caml :

$$\text{switch } l_0^c \ldots l_n^c \ / \ l_0^{nc} \ldots l_m^{nc}$$

- On examine le contenu de accu :
  - S'il s'agit d'un nombre impair $2 * i + 1$, il représente en fait l'entier i, et plus précisément le i-ème constructeur constant. On effectue donc le déplacement indiqué par l_i^c
  - S'il s'agit au contraire d'un pointeur, on est en présence d'un constructeur non-constant. On accède au bloc via le pointeur. Si le tag présent dans l'entête du bloc est i, on effectue alors le déplacement l_i^{nc}.

O'Caml : points-clés concernant les fonctions

- Fonctions anonymes :

  fun x $\rightarrow$ 1 + x

- Fonctions en arguments et/ou en résultat :

  let funincr f = fun x $\rightarrow$ 1 + f x

- Accès hors des frontières de la fonction :

  let a = 10 in (fun x $\rightarrow$ a + x)

- Récursivité (éventuellement mutuelle)
- Application partielle :

  let add10 = (+) 10

- Une optimisation : les appels terminaux

Un exemple élémentaire de fonction

```
% ocaml -dinstr
   # let f x = 1 + x in (f 4) * 2 ; ;
```

```
closure L1, 0
push
const 2
push
const 4
push
acc 2
apply 1
mulint
return 2
```

```
L1 : acc 0
     push
     const 1
     addint
     return 1
```

Description informelle

- L1 est un label, ou position dans le code
- Le vrai bytecode contient plutôt des décalages (ou offsets)
- code avant L1 : code d'une sorte de fonction "main"
- code à partir de L1 : code de `f`
- CLOSURE L1, 0 :
  Fabrique un bloc contenant le label L1 et retourne un pointeur `ptr` vers ce bloc
- APPLY 1 :
  Lance l'exécution de `f` (car accu contient `ptr`) avec 1 argument dans la pile (valant 4).
- ACC 0 :
  `f` accède à son premier argument
- RETURN 1 :
  `f` rend la main, en nettoyant 1 case de pile.
  Le résultat 5 est contenu dans accu.

Sauvegardes/restaurations lors des appels/retours

- Magie noire : où repartir à la fin d'un appel de fonction ?

$\Rightarrow$ Besoin de mémoriser `pc` lors de l'appel.

- De plus, lors d'appels imbriqués, une case ne suffit pas.

$\Rightarrow$ Le `pc` de retour est sauvé dans la pile, juste après les arguments. APPLY1 ... APPLY3 le fait automatiquement, mais pas APPLY `n`, qui doit être précédé d'un PUSH_RETADDR.

- En fait, deux autres éléments sauvegardés en plus : env et extra_args, cf. plus tard.
- RETURN `n` enlève `n` éléments de la pile, puis espère trouver ensuite un triplet pc/env/extra_args à restaurer (+ saut à pc).

Environnements

- Une fonction peut utiliser des objets disparus lors de l'appel :

```
let f =
   let c = 10 in
   let g x = x × x in
   fun x → c + g x
in 1 + f 1
```

- Le bloc (ou fermeture) de `f` sera fait ici avec CLOSURE L1, 2.
- Il contient un environnement (de taille 2) après l'étiquette de `f` :

Header : size 3, tag 247	Lbl de f	Val de c	Ptr vers g

- Le registre env pointe vers la fermeture de la fonction courante.
  - Accès à c : ENVACC 1 (suit le registre `env`, case 1)
  - Accès à g : ENVACC 2

Récursivité

- Dans le cas d'une fonction récursive `f` non-mutuelle, un appel récursif se fait :
  - en chargeant dans `accu` un pointeur sur la fermeture de `f` : OFFSETCLOSURE0
  - en faisant un APPLY comme précédemment.
- Pour les fonctions récursives mutuelles, O'Caml utilise une même fermeture pour tout un paquet mutuel (cf. dessin au tableau).
- OFFSETCLOSURE `n` permet ensuite de retrouver un pointeur vers une fonction récursive "voisine".

Applications partielles

- Si une fonction attend deux arguments et n'en reçoit qu'un, l'exécution ne peut avoir lieu. En attendant l'argument manquant, on doit geler l'exécution, *via* une fermeture.
- Le registre `extra_args` vaut en permanence nb_args - 1
- Au lancement, toute fonction reçoit au moins 1 argument.
- GRAB `n` mis au début d'une fonction vérifie si les `n` arguments suivants sont présents.
  - OK : exécution normale.
  - KO : retourne immédiatement une fermeture avec les arguments présents :

- Un RESTART précède toujours le GRAB. Le jour où la fermeture est appliquée, il s'exécute, et restaure les arguments sauvés.

Appels terminaux

- Fréquemment, un appel *via* APPLY se trouve juste avant un RETURN. C'est une perte d'espace de pile et en temps :
  - le APPLY sauvegarde dans la pile pc/env/extra_args pour permettre le retour à l'instruction suivante
  - cette instruction suivante, le RETURN, restaure une autre zone pc/env/extra_args plus ancienne et saute à ce pc
- L'idée est alors de grouper APPLY n + RETURN m en une instruction APPTERM n, n + m qui évite la sauvegarde au milieu.
- Dans le cas de fonctions récursives terminales (tail-recursive), le calcul se fait en pile constante...

Description précise des instructions

- CLOSURE o, n :
  Crée une fermeture (bloc de tag 247) contenant le label correspondant à l'offset o suivi de
  n éléments d'environnement ôtés de accu+pile.
  Un pointeur vers cette fermeture est placé dans accu.
- CLOSUREREC o_1 ... o_k, n :
  Si un seul offset o_1, cf. CLOSURE+PUSH. Sinon, fabrique la fermeture suivante, en prenant n éléments d'environnement e_1 ... e_n dans accu+pile.

hdr	pc+o_1	hdr	pc+o_2	...	hdr	pc+o_k	e_1	...	e_n

  accu reçoit un pointeur vers cette fermeture, et on fait PUSH
- PUSH_RETADDR :
  Empile successivement les valeurs des registres `extra_args`, `env` et `pc`

Description précise des instructions

- APPLY n :
  accu doit contenir un pointeur vers une fermeture, et la pile doit contenir n arguments suivi d'une zone où sont sauvegardés les pc/env/extra_args courant.
  Le registre env reçoit accu.
  Le registre extra_args est positionné à n-1.
  Le point d'exécution pc saute au label dans la fermeture.
- APPLY1 ... APPLY3 :
  cf APPLY, sauf que ces variantes sauvent elles-mêmes pc/env/extra_args derrière les arguments : pas besoin de PUSH_RETADDR avant.

Description précise des instructions

- RETURN n :
  Dans tous les cas, on commence par enlever n éléments obsolètes de la pile.
  Deux cas viennent ensuite :
  - Si extra_args vaut 0 : c'est le cas usuel d'une fonction ayant reçu exactement assez d'arguments. On termine la fonction en enlevant de la pile trois éléments de plus, qui servent à restaurer respectivement les registres pc/env/extra_args (en particulier saut à pc).
  - Si extra_args $>$ 0, cela signifie que la fonction courante a retourné dans accu une fermeture, qu'il faut maintenant exécuter sur les arguments restants : on décroit extra_args de 1, env reçoit accu et on saute au code contenu dans cette fermeture (cf. APPLY).

Description précise des instructions

- ENVACC n :
  Accède au n-ième champs de la fermeture pointé par le registre env.
- ENVACC1...ENVACC4 :
  idem pour $n = 1..4$
- OFFSETCLOSURE n :
  Place dans accu le pointeur contenu dans le registre env, décalé de n cases.
- OFFSETCLOSURE0, OFFSETCLOSURE2, OFFSETCLOSUREM2 :
  cf précédent avec $n = 0, 2, -2$
- . . . et toutes les instructions de cette page ont des variantes PUSHXYZ

Description précise des instructions

- APPTERM n,m :
  Moralement APPLY n + RETURN (m-n). Plus précisément, la pile doit avoir la forme :
  - n arguments pour l'appel à effectuer
  - (m-n) cases inutiles
  - peut-être de vieux arguments (en nombre extra_args)
  - une zone de sauvegarde pc/env/extra_args pour sortir de la fonction courante

  Les cases inutiles sont supprimées, et on décale les arguments. extra_args est incrémenté de n-1. Comme pour APPLY, env reçoit accu et on saute au label dans la fermeture.
- APPTERM1 m ... APPTERM3 m :
  cf précédent.

Description précise des instructions

- GRAB n :
  si extra_args >= n, on continue avec extra_args décrémenté de n.
  Sinon on place les (extra_args+1) arguments présents sur la pile dans une fermeture de la forme :

Header	Lbl de RESTART	ptr env	arg_0	...	arg_k

  On retourne alors cette fermeture dans accu et on restaure pc/env/extra_args (cf. RETURN).
- RESTART :
  env doit pointer vers une fermeture de la forme précédente. On replace alors les arguments sur la pile, et on incrémente extra_args d'autant.

Synthèse

La Machine Virtuelle O'Caml

- Quelques aspects d'architecture des ordinateurs à compléter.
- La machine virtuelle d'O'Caml est une instance du modèle générale qui se distingue par :
  - l'utilisation d'une `a-pile`.
  - une représentation homogène des données.
  - des instructions spécialisées à des cas particuliers courants.
  - des instructions dédiées aux fonctions de première classe.
  - la gestion automatique de la mémoire.
- Nous n'avons pas abordé les exceptions et les objets.
- Une référence ancienne, plus tout à fait d'actualité, mais encore très instructive :
  The ZINC experimentation, Xavier Leroy
  `http://caml.inria.fr/pub/papers/xleroy-zinc.ps.gz`