Prédiction de branchements

On considère le pipeline d'instructions ci-dessous :

lit cache d'instructions
decode instruction
lit registres
execute/calcule adresse
acces cache de donnees
ecrit registre

Ce pipeline, dont le débit théorique maximum est de une instruction par cycle, comporte un mécanisme de bypass. Les branchements conditionnels (comme toutes les instructions qui ne sont pas des LOAD/STORE) sont exécutées au 4ème étage. Un branchement conditionnel mal prédit introduit 4 bulles de pénalité. On suppose que tous les accès mémoires réalisent des succès dans le cache et que les caches sont chauds.

1 Exercice 1

Soit le programme C suivant (on suppose $N \geq 2$ et M grand) et sa traduction dans le jeu d'instructions du TD (R3 vaut $4 \times N$ et R4 vaut $4 \times M$) :

```
for (i=0; i<M; i++) {
    for (j=0; j<N; j++) {
        a[i][j] = 0;
    }
}
```

```
_boucle:
  ADD R2, R2, #4
  ADD R8, R1, R2
  STORE R0, R8
  SUB R5, R2, R3
  BNZ R5, _boucle
  ADD R2, R2, R0
  ADD R1, R1, R3
  SUB R5, R1, R4
  BNZ R5, _boucle
```

On suppose un prédicteur de branchement conditionnel consistant en un BTB et une BHT contenant un compteur 2 bits par entrée. On suppose que chacun des 2 branchements conditionnels a sa propre entrée dans le BTB et dans la BHT.

1. Calculer la valeur du CPI en fonction de N, en supposant $N \geq 3$. (on rappelle que le CPI est le nombre moyen de cycles par instructions).
2. En particulier, quel est le CPI lorsque $N = 3$?
3. En général, quel est l'CPI lorsque $N = 2$?

On remplace la BHT par un prédicteur à historique global dont la PHT est suffisamment grande pour qu'il n'y ait pas d'interférences. Chaque entrée de la PHT contient un compteur 2 bits.

4. Si on devait choisir entre un historique global à $N-2$ bits et un historique global à $N-1$ bits quel serait le meilleur choix pour le programme en question ?
5. Quelle doit être, en fonction de N, la longueur minimum H de l'historique global (en bits) permettant d'avoir 100% de prédictions correctes ?

2 Exercice 2

On suppose que le prédicteur de branchement est idéal, ce qui veut dire qu'il prédit pour chaque branchement la direction ou l'adresse cible qui est la plus probable. Si tous les cas sont équiprobables, il prédit au hasard. On considère l'extrait de programme C suivant :

```
switch (n) {
case 0: traitement0... break;
case 1: traitement1... break;
case 2: traitement2... break;
case 3: traitement3... break;
}
```

```
// adresse tablesaut dans R1
// valeur de n dans R2
            R3 = R3 MUL 4
            R3 = R3 ADD R1
            JMP R3
tablesaut:  JMP traitement0
            JMP traitement1
            JMP traitement2
            JMP traitement3
```

FIG. 1 – Avec un branchement indirect et une table de saut

```
// valeur de n dans R2
               R3 = R2 SUB 2
               BGEZ R3,cas23   // saute si n>=2
cas01:         R3 = R3 ADD 1
               BGEZ R3,traitement1
traitement0:   ...
traitement1:   ...
cas23:         R3 = R3 SUB 1
               BGEZ R3,traitement3
traitement2:   ...
traitement3:   ...
```

FIG. 2 – Avec un arbre de branchements conditionnels

1. On suppose les 4 cas $n = 0, 1, 2, 3$ aléatoires et équiprobables. Pour chacune des versions des figures 1 et 2, donnez le nombre moyen de bulles dues aux branchements mal prédits.
2. On suppose que le cas $n = 0$ à une probabilité 70% et les cas $n = 1, 2, 3$ une probabilité 10% chacuns. Pour chacune des versions des figures 1 et 2, donnez le nombre moyen de bulles dues aux branchements mal prédits.

3 Exercice 3 (corrigé)

On considère un branchement conditionnel avec une probabilité 30% d'être pris (et donc une probabilité 70% d'être non pris). On suppose que ce branchement est exécuté un grand nombre de fois et qu'il est prédit à chaque fois par un seul et même compteur 2 bits, celui correspondant à l'entrée de la BHT dans laquelle ce branchement est projeté.

1. Quelle est la probabilité asymptotique de mauvaise prédiction ?

Soit $p = 0.3$ la probabilité que le branchement soit pris. Nous rappelons qu'un compteur 2 bits peut être dans 4 états possibles : 0,1,2 ou 3. Nous appelerons les états 0 et 1 les *états prédicteurs* N et les état 2 et 3 les états prédicteurs P.

Notons $P_0(n)$ la probabilité que le compteur soit dans un état N juste avant la n^{eme} exécution du branchement, et $P_1(n) = 1 - P_0(n)$ la probabilité qu'il soit dans un état P.

On remarquera que si on considère 2 exécutions consécutives du branchement, l'état prédicteur avant et après les 2 exécutions ne change que si les 2 exécutions ont la même direction (direction non-pris si l'état prédicteur est P, direction pris si l'état prédicteur est N).

$$\begin{aligned} P_1(n+2) &= P_0(n) \times p^2 + P_1(n) \times [1 - (1-p)^2] \\ &= P_1(n) \times 2p(1-p) + p^2 \end{aligned}$$

Comme $0 \leq 2p(1-p) < 1$, la suite $P_1(n)$ converge vers une valeur $P_1(\infty)$ indépendante de l'état initial du compteur. La valeur $P_1(\infty)$ est solution de

$$P_1(\infty) = 2p(1-p)P_1(\infty) + p^2$$

On obtient

$$P_1(\infty) = \frac{p^2}{1 - 2p(1-p)}$$

La probabilité asymptotique de mauvaise prédiction vaut

$$\begin{aligned} P_m &= P_1(\infty) \times (1-p) + (1 - P_1(\infty)) \times p \\ &= \frac{p(1-p)}{1 - 2p(1-p)} \end{aligned}$$

Dans le cas $p = 0.3$, on obtient $P_m \approx 0.36$.