

Résumé de la thèse :

**« Exécution anticipée des flots de condition:
une alternative à la prédiction de branchement »**

Alexandre Farcy

La performance des processeurs superscalaires actuels, c'est à dire leur capacité à exploiter le parallélisme d'instruction, est fortement dépendante de la précision des prédicteurs de branchement. En effet, l'un des principaux goulets d'étranglement dans les architectures modernes est la rupture dans la continuité du flot d'instructions qui alimente le pipeline d'exécution. Les instructions de branchement provoquent de telles ruptures et limitent considérablement la performance des processeurs actuels. Afin de limiter le coût de ces ruptures, l'on utilise des mécanismes permettant de prédire l'instruction qui suit une instruction de branchement.

Actuellement, ces mécanismes atteignent des taux moyens de bonne prédiction proches de 90 voire 95% en exploitant des relations de corrélation entre les branchements, mais un plafond semble atteint. De plus, l'augmentation de la longueur des pipelines dans les processeurs les plus récents, motivée par l'augmentation de la fréquence et de la densité d'intégration, accroît très sensiblement la pénalité en cas de mauvaise prédiction.

Dans cette thèse, nous voulons présenter une nouvelle approche pour réduire l'impact des branchements conditionnels sur la performance des processeurs modernes : au lieu d'essayer d'augmenter le taux de bonnes prédictions d'un prédicteur en augmentant sa complexité, nous proposons des mécanismes complémentaires pour aider le prédicteur à corriger au plus tôt ses erreurs. Nous proposons des mécanismes architecturaux permettant de calculer par *anticipation* la condition des branchements les plus difficiles à prédire et de corriger la prédiction afin de réduire, voire de supprimer, la pénalité de mauvaise prédiction.

Dans un premier temps, nous cherchons à comprendre le comportement des mécanismes de prédiction existants, exploitant la corrélation entre branchements. Nous présentons tout d'abord ces mécanismes de prédiction statique et dynamique, et les méthodes proposées jusqu'à présent pour améliorer leur efficacité, en particulier en réduisant les conflits sur les tables de prédiction. Ensuite, nous cherchons à mieux comprendre la performance des prédicteurs par corrélation. Pour les branchements les mieux prédits, nous étudions les relations de corrélation que les prédicteurs actuels sont capable d'extraire et d'exploiter et proposons une classification de ces relations. Nous montrons que ces relations sont souvent extrêmement complexes et qu'elles utilisent, outre des informations de contrôle, des propriétés de régularité des données mais aussi des structures de données. Grâce à cette classification, nous montrons les limites de la prédiction par corrélation.

Par la suite, nous montrons que les branchements statiques pour lesquels aucune corrélation ne peut être détectée ou exploitée par les prédicteurs actuels sont très peu nombreux mais sont aussi responsables du plus grand nombre de mauvaises prédictions dynamiques. Nous proposons pour traiter ces quelques branchements des mécanismes alternatifs à la prédiction.

Nous étudions ces quelques branchements les plus mal prédits par les mécanismes classiques, et montrons que la plupart d'entre eux sont dans des boucles et que l'expression de leur condition possède une propriété de régularité. Nous cherchons à exprimer le *flot de condition* de ces branchements sous la forme d'une fonction linéaire du numéro de l'itération dans la boucle, indépendante des itérations précédentes. Les paramètres de cette fonction sont le numéro d'itération et l'état de la machine (la valeur des registres) à l'entrée de la boucle. Lorsqu'une telle fonction peut être construite, nous proposons un mécanisme capable d'exécuter à l'avance cette fonction pour n'importe quelle itération de la boucle. Nous utilisons un prédicteur de valeur pour fournir la valeur des paramètres de la fonction.

Ce mécanisme d'*anticipation* permet donc de calculer une condition plusieurs itérations en avance sur le flot de programme. Le résultat de cette exécution anticipée, c'est à dire la valeur exacte de la condition du branchement, est fournie au prédicteur. Si cette instance du branchement n'a pas encore été prédite, l'on évite une mauvaise prédiction en utilisant la condition anticipée comme prédiction. Si cette instance du branchement est déjà dans le pipeline, l'exécution anticipée de sa condition réduit la pénalité en cas de mauvaise prédiction.

La limitation de ce mécanisme est qu'il est inefficace pour les branchements hors de boucles et pour ceux dont les expressions n'ont pas de propriété de régularité. C'est pourquoi nous proposons un autre mécanisme qui étend le concept d'*anticipation* à tous les branchements difficiles à prédire. En particulier, ce mécanisme prend en compte les branchements dont la condition ne peut pas se mettre sous la forme d'une fonction linéaire, comme les parcours de structures chaînées (listes et arbres), particulièrement difficiles à prédire.

Nous proposons une méthode de réordonnancement dynamique des instructions, basée sur l'utilisation d'un cache de traces. À l'intérieur de chaque trace, les instructions du *flot de condition* sont éloignées de l'instruction de branchement, ce qui permet d'émettre et donc d'exécuter au plus tôt le *flot de condition* et de réduire ainsi, voire de supprimer, la pénalité en cas de mauvaise prédiction. En effet, nous montrons que pour les branchements difficiles à prédire, le *flot de condition* représente une faible part des instructions exécutées. Cette faible densité des flots de condition permet en général d'obtenir la valeur anticipée de la condition suffisamment tôt pour réduire sensiblement la pénalité de mauvaise prédiction.

Cette étude nous permet d'envisager d'étendre les concepts initiaux de fonctions et d'*anticipation* au-delà des branchements, à toutes les instructions de forte latence (accès mémoire, opérations flottantes, ...).

Nous avons voulu montrer dans cette thèse qu'il existe un fort potentiel pour corriger les mauvaises prédictions en calculant au plus tôt les conditions des branchements les plus mal prédits par les prédicteurs «classiques». Notre premier mécanisme d'*anticipation* exploite une propriété de régularité des conditions de branchement pour supprimer 30 à 90% des mauvaises prédictions selon les codes, et notre second mécanisme profite de la faible densité des flots de condition pour réduire la pénalité de plus de 95% des branchements pour des traces de 32 instructions.

L'ensemble de ces travaux nous ont permis de mieux comprendre les limites des prédicteurs utilisant la corrélation entre branchements et ont ouvert une nouvelle voie de recherche vers l'intégration de mécanismes d'*anticipation* dans des architectures spécialisées de type multiflot ou dans des environnements d'optimisation comme rePLay.