

## **Contributions à la modélisation et la simulation de niveau système des architectures matérielles-logicielles des systèmes embarqués**

Résumé du mémoire présenté en vue de l'obtention d'une habilitation à diriger des recherches

Sébastien Le Nours (Nantes Université, UMR CNRS IETR)

Les travaux présentés dans ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches s'inscrivent dans le domaine de la conception des architectures matérielles et logicielles des systèmes embarqués. Ils se focalisent plus particulièrement sur les activités de conception au niveau dit système, c'est-à-dire situées au plus tôt du processus de conception, où les choix d'architectures sont initialement pris. Les enjeux associés à ce domaine de recherche viennent de la complexité de conception des architectures, complexité induite par l'accroissement constant de la densité et de la diversité des ressources matérielles et logicielles les constituant. Dès lors, l'objectif de ces travaux vise à l'amélioration des pratiques de conception par la proposition de méthodes utilisées pour le dimensionnement sous contraintes et la vérification des propriétés non-fonctionnelles des architectures étudiées (dans nos travaux, temps, consommation et coût). L'originalité de ces travaux réside dans la combinaison des aspects abordés : simulation, modélisation formelle, analyse statique et gestion en ligne, implantations et mesures sur cibles réelles. Egalement, ces travaux ont été inspirés par des études de cas issues de différents domaines d'application (radiocommunication mobile, automobile, traitement d'image).

Les travaux de recherche menés se sont organisés autour de trois axes complémentaires : la création de modèles de performance, l'amélioration de l'efficacité de simulation et l'étude de la gestion en ligne des ressources. Chacune des thèses co-encadrées fut l'occasion d'aborder de façon originale ces axes.

Le premier axe présenté concerne, l'amélioration de l'efficacité de simulation des architectures de systèmes embarqués. Une première contribution a porté sur la définition d'une approche de simulation visant à réduire les temps d'analyse requis tout en préservant la précision des estimations obtenues. Cette approche est de nature hybride : elle associe simulation et modèles formels. Cette approche vise à réduire le nombre d'appels au moteur de simulation et ce en faisant abstraction des nombreux processus engendrés par les approches traditionnelles de simulation au niveau système. Différents cas d'étude ont permis de quantifier l'apport de l'approche de simulation proposée. Ces cas d'étude portent sur différentes architectures matérielles-logicielles de systèmes embarqués. Deux cas d'étude de complexité significative sont abordés. Le premier cas d'étude présenté correspond à l'analyse d'une architecture distribuée de calculateurs embarqués pour le domaine automobile. Le second cas d'étude présenté porte sur l'analyse d'une architecture multiprocesseur construite autour du standard de bus ARM AXI4-Lite. En second lieu, nous nous sommes intéressés à l'adoption de méthodes de simulation de type model-checking statistique pour l'analyse des propriétés temporelles des architectures multiprocesseurs. L'intérêt de telles méthodes est de contrôler la couverture des simulations menées sur des modèles de performance. L'adoption de ces méthodes et le flot de modélisation associé sont présentés.

Le second axe présenté concerne la création de modèles de niveau système d'architectures matérielles-logicielles. En premier lieu, un modèle d'exécution générique a été proposé afin de servir de base pour la modélisation et la simulation au niveau système. L'objectif de ce modèle est de favoriser la création de modèles simulables utilisés pour l'évaluation des performances des architectures matérielles-logicielles. Le principe de ce modèle est présenté en lien avec l'approche de simulation proposée. Différents cas d'études ont permis de valider le modèle générique proposé. Un premier cas d'étude est présenté et porte sur la modélisation des ressources de communication pour des architectures multiprocesseurs. Un second cas d'étude porte sur la modélisation des ressources de calcul pour des systèmes du domaine des radiocommunications mobiles. En second lieu, nous nous sommes intéressés

à l'apport de modèles probabilistes et à leur création selon une approche basée sur la mesure (*measurement-based probabilistic timing analysis*) dans le cadre de l'étude de systèmes multiprocesseurs. L'objet de cette approche réside dans le fait d'obtenir des estimations fiables utilisées afin de correctement calibrer des modèles de performance. La précision et la rapidité des modèles créés sont évalués sur des cas d'étude du domaine du traitement d'images.

Le troisième axe concerne la gestion en ligne des architectures matérielles-logicielles. Un premier aspect de ce travail a porté sur la modélisation de systèmes pour lesquels la nature des fonctionnalités supportées, et donc les charges de travail induites, évoluent en cours de fonctionnement. Une première contribution a porté sur l'extension des possibilités de modélisation et de simulation de telles architectures au sein de l'environnement CoFluent Studio. Cet apport fut ensuite utilisé dans le contexte dit de la radio logicielle afin de permettre l'analyse des performances d'un terminal radiomobile selon différents cas d'usage. En second lieu, toujours en lien avec l'étude de systèmes dont les fonctionnalités supportées évoluent en cours de fonctionnement, différentes stratégies d'allocation et d'ordonnement ont été proposées afin d'optimiser l'efficacité énergétique de plates-formes multiprocesseurs. Ces stratégies furent appliquées au sein d'ensembles homogènes et hétérogènes de processeurs. Ce travail fut évalué par l'étude de différentes applications orientées flots de données du domaine multimédia. Egalement, une approche de simulation a été proposée afin de permettre la simulation de la gestion en ligne des ressources de calcul.

Ces travaux portaient donc sur la définition de méthodes favorisant le dimensionnement sous contraintes des architectures matérielles et logicielles des systèmes embarqués. A plus long terme, les enjeux environnementaux actuels tendent à considérer une digitalisation croissante de nos sociétés. La prolifération des systèmes embarqués devrait encore se poursuivre dans de nombreux domaines, avec des contraintes fortes en matière de puissance de calcul, consommation, sécurité et fiabilité. La maîtrise de la complexité des futures architectures matérielles-logicielles restera donc un enjeu essentiel. Egalement, il est essentiel d'envisager des solutions permettant de limiter l'empreinte carbone d'une telle transition numérique et ce pour l'ensemble des phases du cycle de vie d'un produit : la conception avec l'optimisation des ressources matérielles et logicielles requises, le fonctionnement opérationnel avec l'optimisation de la consommation énergétique et de la durée de vie des produits, le recyclage de ces systèmes. Le projet de recherche envisagé s'inscrit dans ce contexte en s'appuyant sur les travaux préalablement menés et en ouvrant de nouvelles orientations. Notamment, l'intégration sous contraintes des algorithmes d'intelligence artificielle au sein de systèmes embarqués et l'usage des méthodes de l'intelligence artificielle pour la conception au niveau système représentent des thèmes particulièrement porteurs.