

Défi Adaptation Continue

July 4, 2025

1 ADAPTATION CONTINUE

Nom proposé : ADDYCT (ADaptation DYnamique et ConTinue)

Porteur(s) : Jannik Laval (DISP, Université Lumière Lyon 2), Jolan Philippe (LIFO, Orléans)

Contributeurs : Eric Cariou (Lab-STICC, Université de Bretagne Occidentale), Rabea Ameer-Boulifa (Telecom Paris), Sylvain Guérin (IMT Atlantique, Brest), Olga Kouchnarenko (femto-st), Nawal Guermouche (LAAS-CNRS)

Titre complet : Adaptation continue

Titre anglais : Continuous adaptation

Acronyme : ADDYCT

1.1 Contexte

L'adaptabilité est un enjeu majeur des systèmes complexes dans des environnements dynamiques. Ces environnements regroupent les architectures distribuées composées de systèmes "component-based" et les infrastructures déployées sur des plate formes hétérogènes à différentes échelles : Cloud, Fog, Edge, ou IoT. Tous ces systèmes doivent être capables d'ajuster leur configuration de manière autonome pour répondre à des événements exogènes et/ou endogènes.

Les systèmes logiciels doivent être considérés dès leur conception comme des systèmes durables en termes de temporalité (Système temps long, Cycle de vie, Couplage), de scalabilité (Granularité, Interfaces, Gestion massive de données) et d'hétérogénéité (Intégration, Interopérabilité).

Ces challenges sont d'autant plus importants lorsque la taille du système est grande et couplée avec des artefacts matériels (IoT, CPS, Jumeaux numériques, Cloud...)

L'objectif de ce défi est de modéliser, analyser et d'implémenter des moyens et des politiques d'adaptation pour des systèmes logiciels complexes (distribués, componentisés etc.).

L'approche adoptée repose sur les boucles de contrôle MAPE-K, un modèle d'auto-adaptation autonome capable de s'ajuster dynamiquement à un environnement permettant de répondre à la nécessité d'intégrer les données collectées et leurs modèles de traitement, le système opérant et sa connexion avec son environnement, l'évolution dynamique et la nécessité de maintenir une représentation fidèle du comportement attendu.

1.2 Verrous scientifiques

Les systèmes logiciels sont amenés à évoluer continuellement, que ce soit de manière planifiée dans le cadre d'une maintenance, ou de façon réactive face à des événements imprévus affectant leur environnement ou leur système de référence. Cette capacité d'adaptation soulève des verrous scientifiques majeurs, tant sur le plan de la robustesse des décisions que sur celui de l'architecture logicielle et de la cohérence entre modèle et système.

- **Dynamisme des architectures logicielles et des infrastructures d'exécution:** Les systèmes visés doivent être capables d'évoluer dynamiquement à l'exécution, tant au niveau de l'architecture qu'au niveau des infrastructures sous-jacentes. Cela implique la conception d'architectures logicielles modulaires, flexibles et adaptables, permettant l'ajout, la suppression ou la modification de composants hétérogènes sans interruption de service ni dégradation des performances. D'autre part, les infrastructures d'exécution (cloud, edge, fog, systèmes embarqués, etc.) doivent offrir des mécanismes de supervision, de déploiement et de reconfiguration en temps réel, afin de soutenir cette adaptabilité. L'évolution continue du comportement logiciel, la gestion adaptative des ressources, la migration transparente de services, ainsi que la reconfiguration dynamique et autonome des configurations d'exécution constituent des axes majeurs à développer pour garantir la résilience, la performance et la continuité de service dans des environnements en évolution continue.
- **Validation incrémentale :** Le processus de validation incrémentale permet de considérer les écarts d'une spécification évolutive, pour répondre au mieux aux besoins de l'utilisateur, tout en préservant la stabilité du logiciel existant à mesure que de nouvelles fonctionnalités sont intégrées. L'intégration de techniques telles que Model-in-the-Loop (MiL), Software-in-the-Loop (SiL) ou Hardware-in-the-Loop (HiL) impose de résoudre des verrous de synchronisation, de validation distribuée et d'orchestration des configurations.
- **Prise en compte de l'incertitude dans la décision :** Les données disponibles peuvent être partielles, bruitées ou de granularité insuffisante pour une analyse fine. L'environnement d'exécution doit être considéré comme dynamique et non maîtrisable. Il s'agit de modéliser et quantifier ces incertitudes, puis de les intégrer de manière explicite dans les processus de décision et d'adaptation (analyse, plan). La difficulté est de garantir

le niveau de service malgré l'incertitude, tout en préservant un équilibre entre robustesse et sûreté, afin d'assurer que le système reste fiable et performant.

- **Résilience et service dégradé** : Il s'agit de fournir des garanties de fonctionnement même en cas de conditions dégradées, notamment lorsque l'environnement devient partiellement ou totalement imprévisible. La notion de service dégradé doit être formellement définie, et le processus de mise en œuvre des actions d'adaptation doit être explicité.

Plus particulièrement, lorsque nous étudions le jumeau numérique (JN) en tant qu'objet scientifique, la complexification de l'architecture et la précision des algorithmes sont augmentées. Les JNs sont des systèmes adaptables spécifiques. Les verrous suivants doivent être ajoutés pour répondre à leur besoin d'adaptation continue :

- **Relation bidirectionnelle entre modèle et système** : L'interaction continue entre le modèle et le système réel induit des phénomènes de dérive (en anglais, *drift*) ou de réajustement. Comprendre, détecter et gérer ces dynamiques est un enjeu clé pour maintenir la pertinence des représentations utilisées. Plus particulièrement, un jumeau numérique doit rester synchronisé avec son système de référence tout en minimisant les interruptions. Cela suppose de détecter les écarts significatifs, d'en analyser les causes, et de mettre en place des actions correctrices.
- **Fidélité et granularité adaptatives** : Les niveaux de fidélité et d'échelle doivent pouvoir être ajustés dynamiquement en fonction des objectifs, des contraintes de calcul, de la criticité ou de l'urgence. La notion de systèmes de systèmes ou d'écosystème aidera à considérer une adaptation par la composition. Par ailleurs, il est nécessaire de définir des métriques robustes pour guider ces ajustements, par exemple la distance entre le jumeau numérique et son système de référence ou encore l'intégration de probabilité sur les entrées. Cette adaptation doit intégrer le déploiement en plus de l'architecture.

1.3 Liens avec les GTs

Ce défi est directement relié aux groupes de travail EDT (Engineering Digital Twin), le GT SyLA (Systèmes Logiciels Adaptables), qui traitent respectivement de la représentation logicielle (modèle) des systèmes physiques, et de la capacité d'adaptation des logiciels face à des contextes changeants, et le GT IIDM (Industrialisation de l'ingénierie dirigée par les modèles) qui propose des solutions pour représenter avec des modèles l'état du système à adapter et les informations nécessaires à l'adaptation lors de l'implémentation des boucles d'adaptation (MAPE-K par exemple). Cela correspond au domaine de recherche dit des `models@run.time`.

Ce défi est également relié aux autres groupes de travail, sans pour autant qu'il soit un élément central.

1.4 Liens avec les autres défis

- Programmation et Analyse de systèmes Embarqués (Annexe ??);
- Confiance et traçabilité dans la production de logiciels (Annexe ??);
- Interopérabilité pour les preuves et les programmes (Annexe ??);
- Scénarios décroissants du numérique (Annexe ??)

1.5 Liens avec les autres GdRs

- RSD (Réseaux et Systèmes Distribués) <https://gdr-rsd.cnrs.fr/>
- MADICS (Masses de Données, Informations et Connaissances en Sciences) <https://www.madics.fr/>
- MACS (Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes dynamiques) <https://gdr-macs.fr/>
- SOC2 (SOC: Sûreté de Fonctionnement et Sécurité des Systèmes) <https://www.gdr-soc.cnrs.fr/>
- ROD (Recherche opérationnelle et décision) <http://gdrro.lip6.fr/>

1.6 Liens divers

1.6.1 Normes et certifications

- ISO/IEC 30173:2023 – Digital twin — Concepts and terminology
- IEC 63278-1:2023 – Asset Administration Shell for industrial applications
- ISO/IEC 25002:2024 – Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Quality model overview and usage

Certifications ?

1.6.2 Entreprises et institutions

??

1.6.3 Projets ANR ou Européens

- PEPR Cloud (<https://pepr-cloud.fr/>)
- ANR Taranis (<https://taranis-cloud.fr/>)
- ANR SeMaFoR (<https://anr.fr/Projet-ANR-20-CE25-0017>)
- ANR ADAPT (<https://project.inria.fr/adapt/fr/>)
- ANR For-Coala (<https://for-coala.github.io/jobs/>)

1.6.4 Sujets de thèses - Quelques travaux en cours ou réalisés

- Brell Sanwou. *Vers des systèmes logiciels complexes et auto-adaptatifs* (Taranis) – <http://theses.fr/s408144>
- Martin Molli. *Modèles de décisions pour les plateformes edge-cloud* (Taranis) – <https://theses.fr/s402238>
- Mouheb Jemai. *Orchestration intelligente et scalable pour garantir les performances et la fiabilité du système dans tous les écosystèmes Cloud Native* (Taranis) – <https://theses.fr/s409932>
- Olivia Proust. *Vers des langages de gestion de configuration formellement vérifiés* (For-Coala) – <https://for-coala.github.io/about/>
- Nathan Rabier. *Gestion des contraintes dynamiques et des délais dans les logiciels distribués* – <https://taranis-cloud.fr/>
- Simon Artus. *Reconfiguration intelligente et dynamique d'une infrastructure de services Cloud2IoT* – <https://theses.fr/s411527>
- Nathan Gallone. *Reconfiguration et contrôle de systèmes à composants structurés distribués* – <https://theses.fr/s400485>
- Ahmed Ouadie Kebbeb. *Modélisation formelle et analyse automatisée des langages de mise à disposition des ressources* – <https://theses.fr/s408987>
- Brice Arléon Zentsop Ndadji. *Reconfiguration dynamique sécurisée et optimisée des applications cloud* – <https://phd.cristal.univ-lille.fr/details.html?id=c7716a16907d4c60a059be524c6e8da0>
- Karima Khadir – *Vers une approche de découverte et de sélection distribuées des services IoT basées sur des avatars autonomes* – <https://theses.fr/2021ISAT0052>
- Nour EL Houda Boubaker – *Dynamic management of cyber-physical processes outsourced to Fog and Cloud Computing environments*
- Thouria Ben Haddi – *Système Décentralisé et Fédéré pour une Mobilité Intelligente et Inclusive considérant les troubles du spectre de l'autisme*
- Meriem Smati. *Améliorer la Résilience des Systèmes de Systèmes IoT par l'Intégration des Jumeaux Numériques*
- Samah Zebboudj. *Approche Stochastique pour le Maintien en Condition Opérationnelle des Jumeaux Numériques*
- Mouhamadou Ball. *Evaluation de sécurité des meutes de drones par emploi de jumeaux numériques*

1.6.5 International

??

1.7 Conférences et journaux

- Journaux : TAAS (Transaction on Autonomous and Adaptive Systems); SCP (Science of Computer Programming); JLAMP (Journal of Logical and Algebraic Methods) pour les modèles formalisés des moteurs de re-configuration, IEEE TSC (Transactions on Services Computing)
- Conférences : ASE, EDT, ICSE, ICSME, ICSOC, Models, SANER, SEAMS, WWW