

Proposition thèse PEPR eNSEMBLE

Résilience des infrastructures numériques de services gérées en commun

2025-2028

1 Contexte de la thèse

Encadrants :

- Hélène Coullon (HDR), IMT Atlantique
- Théo Le Calvar, IMT Atlantique
- Erwan Bousse, Nantes Université
- Baptiste Jonglez, Inria

Laboratoire d'accueil : LS2N, sur le site d'IMT Atlantique à Nantes.

École doctorale : SPIN

Contexte de la thèse : Cette thèse sera co-encadrée sur les équipes STACK (IMT Atlantique, Inria, Nantes Université) et NAOMOD (IMT Atlantique, Nantes Université). L'équipe STACK est une équipe spécialisée dans la gestion d'infrastructures de services centralisées (Cloud) et décentralisées (continuum entre l'Edge et le Cloud). L'équipe aborde des thèmes variés comme la gestion des ressources (matériel et énergie), les middleware, les langages et applications, etc. L'équipe Naomod est une équipe spécialisée dans la modélisation de logiciels et de systèmes. L'équipe aborde des thèmes comme la gestion de modèles, la génération de code, l'exécution de modèles et DSL (Domain Specific Language), le test ou l'architecture des systèmes. Enfin, l'association Deuxfleurs¹ est partenaire de cette thèse, en fournissant notamment un terrain d'étude et des cas d'usage.

Résumé court : Cette proposition de thèse dans le PEPR eNSEMBLE vise à étudier la résilience des infrastructures numériques de services organisées autour d'un collectif ou d'un associatif, tel que CHATONS (Collectif des Hébergeurs Alternatifs, Transparents, Ouverts, Neutres et Solidaires). La thèse vise à identifier comment modéliser et mesurer la résilience des infrastructures, d'identifier les mécanismes les plus adaptés, et d'évaluer ces mécanismes par simulation ou expérimentation réelle.

1. <https://deuxfleurs.fr/>

2 Description détaillée

2.1 Contexte et scénarios

Dans cette thèse, nous nous intéressons principalement aux infrastructures permettant de fournir des services numériques en ligne : matériel informatique de type serveur, centres d'hébergement (par exemple les *datacenters* [9]), réseaux de communication, logiciels. Nous prenons aussi en compte les personnes qui construisent et entretiennent ces infrastructures.

Ces infrastructures numériques font de plus en plus face à de nombreuses crises comme par exemple :

Crises climatiques vagues de chaleur, inondations, catastrophes climatiques. La fréquence et l'amplitude de ces événements met en difficulté les infrastructures de type datacentre, en rendant le refroidissement plus difficile, l'approvisionnement électrique moins fiable, le partitionnement réseau plus probable, etc. Par ailleurs, ces crises poussent à réduire l'empreinte environnementale des infrastructures et à remettre en cause des usages particulièrement consommateurs de ressources.

Crises d'approvisionnement en matériaux il pourrait être de plus en plus difficile de produire du matériel informatique neuf. En conséquences il faudrait être en mesure d'opérer du matériel hétérogène et vieillissant avec des capacités techniques limitées en calcul, stockage, réseau, etc.

Crises géo-politiques les dépendances (logicielles, techniques, matérielles) pourraient devenir plus problématiques et constituer des leviers de pression géo-politique en cas de conflits. Cela induit une fragilité accrue de nos systèmes qui pourraient ne plus fonctionner correctement de façon abrupte.

Le modèle dominant du *cloud* repose sur une délégation complète de la gestion du matériel et des logiciels d'infrastructure à des acteurs spécialisés. Dans ce modèle, les ressources informatiques fournies sont fiables, performantes, et surtout abondantes voire "infinies". Un modèle qui sera de plus en plus difficile à maintenir avec de l'incertitude sur les conditions pour les opérer, et une limite subie ou choisie des ressources disponibles.

L'approche Fog et Edge computing répond partiellement au problème : elle distribue une partie de l'infrastructure, prend en compte les possibles défaillances du réseau, et fournit des ressources matérielles limitées qui poussent les clients à adapter leurs usages. Cependant, cette architecture est davantage hiérarchique que décentralisée : elle conserve généralement un composant d'infrastructure centralisé de type *cloud*.

A l'autre bout du spectre, des alternatives collectives, associatives, ou encore citoyennes, et volontairement à petite échelle voient le jour pour fournir du service informatique de façon limitée (par la communauté, par le matériel, par les coûts, etc.). CHATONS (Collectif des Hébergeurs Alternatifs, Transparents, Ouverts, Neutres et Solidaires) est un exemple de collectif d'hébergeurs de services numériques en France. Nous nous intéresserons tout particulièrement à ces infrastructures décentralisées de petite taille gérées par des collectifs de type CHATONS : ces infrastructures ont le potentiel de pouvoir faire face aux crises identifiées.

2.2 Problématique et objectif

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la **résilience** des infrastructures numériques d'hébergement de services face à des crises sociétales, mondiales, et de limites planétaires telles que citées précédemment. En particulier CHATONS, qui semblent offrir de bonnes propriétés de résilience sera notre objet d'étude. Nous aborderons principalement les aspects informatiques de la résilience, mais nous ouvrirons également la réflexion sur les modes d'organisation des collectifs qui maintiennent ces infrastructures, en collaboration avec d'autres champs disciplinaires (en particulier en sciences humaines et sociales).

L'objectif est triple : comprendre quelles organisations techniques et humaines offrent de bonnes propriétés de résilience face à un ensemble de crises, mettre en œuvre des moyens expérimentaux techniques pour évaluer la résilience des infrastructures et systèmes face à des scénarios variés, et élaborer, par l'expérimentation, des stratégies pour tendre vers plus de résilience.

Dans cette thèse nous envisageons d'étudier les questions de recherche suivantes :

- Sur quels critères qualitatifs et quantitatifs peut être évaluée la résilience d'une offre de services numériques ?
- Quels critères sont comparables ou combinables (et comment), pour construire des critères de plus haut niveau permettant de faciliter l'analyse des solutions ?
- Comment peuvent être mesurés les critères de résilience, quelles solutions expérimentales peuvent être mise en œuvre ?
- Comment coupler des critères techniques de résilience à des critères humains ?

2.3 Bref état de l'art et fondements théoriques

Pour commencer, il n'existe pas, à notre connaissance, d'études de la résilience technique et humaines des collectifs d'hébergement de services numériques dans la littérature. Nous essayons toutefois de couvrir ici les sujets en lien avec notre proposition.

Nous pouvons tout d'abord noter qu'il existe des domaines de recherche dans lesquels peuvent s'inscrire les collectifs d'hébergement et également la résilience des infrastructures. Tout d'abord, "computing within limits" [13] est un domaine qui est apparu en 2018 et qui réunit tous les chercheurs et industriels soucieux de considérer des limites planétaires dans le numérique, et donc d'être résilient à ces limites. Nous pouvons également considérer le domaine appelé "crisis computing" ou "urgent computing" [3] qui focalise plus spécifiquement sur les situations de crises et d'urgence ou la sécurité des personnes peut être impactée, comme par exemple à la suite d'une catastrophe naturelle. Enfin, nous pouvons aussi mettre en avant l'approche "low-tech" qui doit être plutôt interprétée comme "lower-tech"^{2 3} qui prône des métriques intéressantes, bien que non quantitatives, qui permettent de remettre en cause les usages : l'utilité, l'accessibilité, et la durabilité. La question de la durabilité a en particulier été étudiée en informatique autour du matériel et du logiciel [10], mais aussi plus généralement sur la question de la maintenance des infrastructures [8].

2. <https://lowtechlab.org/fr/la-low-tech>

3. <https://lownum.fr/>

Pour proposer d'évaluer et étudier la résilience des infrastructures, il faut être en mesure de les modéliser. Les langages de description d'architectures (ADL) [11] ont été très largement adaptés et développés pour le domaine du Cloud [4]. L'un de ces langages en particulier connaît un succès notable, TOSCA [14] par sa flexibilité. Plus récemment des contributions ont vu le jour pour la modélisation d'architectures géo-décentralisées comme le Fog computing (ou Edge computing) [1, 2].

Enfin, la résilience dans le Cloud, et plus récemment dans le Fog et le Edge computing a été largement étudiée et les mécanismes mis en place pourront être analysés [15, 7, 12].

2.4 Approche, méthodes et évaluation

La thèse s'articulera en trois grandes parties. Tout d'abord un large travail d'étude et de prospection sera nécessaire. Ce travail consistera en particulier à recenser, comprendre et classer les mécanismes principaux de résilience (choix d'architecture, algorithmes, organisations humaines etc.) dans la littérature et dans CHATONS et lesquels sont en particulier intéressants face aux crises majeures considérées dans cette thèse. La compréhension passera également par des expérimentations techniques et des études de terrain. Ce travail pourra mener à la soumission d'un survey et faire ressortir des métriques intéressantes pour la résilience.

Une seconde partie, en lien avec la première, consistera à trouver et spécifier des outils de modélisation adaptés à l'évaluation de la résilience des infrastructures. La modélisation consistera d'abord à formaliser les différentes briques techniques d'un hébergeur (serveurs, réseau, orchestrateur, stockage, services), puis à identifier les risques et dépendances qui pèsent sur chaque brique. Notre langage de modélisation devra être suffisamment générique pour modéliser un spectre large d'infrastructures CHATONS. Sur la base de ce modèle, il s'agira d'identifier plus spécifiquement des métriques de résilience pertinentes.

Enfin, la troisième partie consistera à concevoir et développer des outils permettant l'évaluation de la résilience pour différentes métriques et différentes configurations d'infrastructures. Nous souhaiterions ici développer deux aspects : un outil de simulation (à l'image de SimGrid [5]) pour être capable d'évaluer la résilience sur des infrastructures à plus large échelle ou sur des spectres de temps longs, et un outillage pour l'expérimentation scientifique sur machines réelles à l'image de EnosLib [6]. Ces outils seront basés sur les parties précédemment mentionnées : la classification des mécanismes, les métriques, et le langage de modélisation.

L'évaluation des résultats de la modélisation sera réalisée de manière expérimentale selon deux axes. D'une part, le modèle sera testé expérimentalement sur l'infrastructure de recherche SLICES-FR / Grid'5000. Cela permettra de mettre en œuvre plusieurs scénarios de crise (déconnexion réseau, coupure électrique, surcharge du matériel ou du réseau) et d'améliorer la capacité du modèle à estimer la résilience d'une infrastructure cible. Dans ce cadre, il est envisagé une extension de SLICES-FR pour intégrer du matériel aux capacités limitées (matériel ancien ou reconditionné).

D'autre part, une approche de terrain consistera à étudier l'organisation et l'infrastructure de l'hébergeur Deuxfleurs. D'autres hébergeurs membres des CHATONS pourront être inclus dans le terrain pour offrir un point de comparaison. Il s'agira de recueillir des données sur

l'infrastructure et les pratiques de ces acteurs, de les analyser grâce au modèle sous l'angle de plusieurs scénarios de crise, et d'en déduire des propriétés de résilience ainsi que des stratégies possibles d'amélioration.

3 Nature de la collaboration numérique

Nous considérons deux types de collaboration. La première est une collaboration au sein de l'équipe d'administration, i.e. entre les personnes qui maintiennent l'infrastructure. On suppose qu'il s'agit d'une équipe distribuée qui va donc utiliser des outils numériques : visioconférence, chat, système de ticket, forge git pour le développement logiciel (services et Infrastructure as Code). Il s'agit principalement de coordination asynchrone dans le cas général : répartition de tâches, développement open source collaboratif et revue de code. Cependant, elle peut devenir synchrone (par exemple via de la visioconférence) dans quelques cas : lorsqu'il s'agit de prendre des décisions importantes, ou bien en cas de crise qui impacte l'infrastructure et qui demande une coordination rapide.

Le deuxième type de collaboration est une relation entre l'équipe d'administration et les usagers des services. Il s'agit d'une collaboration plus occasionnelle qui consiste à négocier autour des contraintes de l'infrastructure, du choix des services fournis, de la qualité de service attendue, et des coûts. Par exemple, certains services peuvent être difficiles à fournir de manière résiliente ; des quotas peuvent être mis en place pour assurer un bon partage des ressources ; la qualité de service peut être améliorée via des stratégies de résilience mais celles-ci peuvent avoir un coût infrastructurel élevé. Cette collaboration pourra utiliser des outils numériques de prise de décision collective.

4 Contribution à la collaboration numérique : Résultats attendus et impact

A travers l'objectif de résilience, une des contributions consistera à formaliser des modes de collaboration et à proposer des outils de collaboration qui sont adaptés à un hébergeur de type CHATONS.

La notion théorique centrale sur laquelle s'appuyer est celle d'un *commun numérique*. Dans le cas d'une infrastructure numérique, la *communauté* est constituée à la fois de personnes ayant les compétences techniques nécessaires à l'entretien de l'infrastructure, mais aussi de personnes qui souhaitent utiliser les services en conservant un contrôle sur leurs données. Cette communauté collabore autour des *ressources* que sont le matériel informatique, les logiciels d'infrastructure, les services et les données, afin de fournir un service qui répond bien aux attentes des usagers. Les règles de fonctionnement précises de gestion de ce commun font partie du travail de la thèse.

Penser une infrastructure numérique comme un commun ouvre des perspectives intéressantes sur la résilience. En effet, la résilience est impactée par des choix techniques mais ne se limite pas à cela : les choix de la communauté et les processus de décision ont également un impact fort. Ainsi, la communauté pourrait choisir de privilégier la stabilité des services plutôt que l'ajout rapide de nouvelles fonctionnalités. Par ailleurs, une gestion

communautaire protège des changements de gouvernance néfastes aux utilisateurs : rachat de l'entreprise, changement de stratégie des actionnaires, volonté d'extraction de valeur des données personnelles...

En pratique, la contribution pourra passer d'une part par une combinaison judicieuse d'outils existants (outils de revue de code, processus de coordination régulière par visioconférence). D'autre part, de nouveaux outils sont peut-être à inventer, notamment pour faciliter la prise de décision collective entre l'équipe d'administration et les usagers des services : outils de mesure de l'empreinte de chaque service pour assurer une bonne compréhension des enjeux associés aux décisions ; outil de mesure de qualité de service ; outil de questionnaire collaboratif adapté à la prise de décision collective...

5 Positionnement dans le programme eNSEMBLE

Le sujet de thèse est d'abord un sujet en informatique, mais avec une forte volonté d'ouverture vers d'autres domaines de recherche présents dans le PEPR eNSEMBLE, et notamment dans le PC4 CONGRATS.

Le point d'accroche principal est la notion de *commun numérique* développée dans la section précédente. En effet, elle met en relation des problématiques techniques – qui forment des contraintes et des ensembles de choix techniques possibles pour répondre au besoin de façon résiliente – avec des questions d'organisation humaine. Cette thèse pourra apporter une expertise technique sur la gestion d'infrastructures numériques au sein du PEPR eNSEMBLE, tout en s'appuyant sur l'expertise organisationnelle développée par les autres équipes du PEPR.

Références

- [1] Abdelghani Alidra, Hugo Bruneliere, and Thomas Ledoux. A feature-based survey of Fog modeling languages. *Future Generation Computer Systems*, 138 :104–119, January 2023.
- [2] Hiba Awad, Abdelghani Alidra, Hugo Bruneliere, Thomas Ledoux, and Jonathan Rivalan. VeriFog : A Generic Model-based Approach for Verifying Fog Systems at Design Time and Generating Deployment Configurations. *ACM SIGAPP applied computing review : a publication of the Special Interest Group on Applied Computing*, 24(3) :18 – 36, October 2024.
- [3] Daniel Balouek and Hélène Coullon. Dynamic Adaptation of Urgent Applications in the Edge-to-Cloud Continuum. In *Proceedings, Euro-Par 2023 : Parallel Processing Workshops, Revised Selected Papers, Part I*, pages 189–201, Limassol, Cyprus, August 2023.
- [4] Alexander Bergmayr, Uwe Breitenbücher, Nicolas Ferry, Alessandro Rossini, Arnor Solberg, Manuel Wimmer, Gerti Kappel, and Frank Leymann. A Systematic Review of Cloud Modeling Languages. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 51(1) :22, 2018.

- [5] Henri Casanova, Arnaud Legrand, and Martin Quinson. Simgrid : A generic framework for large-scale distributed experiments. In *Tenth International Conference on Computer Modeling and Simulation (uksim 2008)*, pages 126–131, 2008.
- [6] Ronan-Alexandre Cherrueau, Marie Delavergne, Alexandre van Kempen, Adrien Lebre, Dimitri Pertin, Javier Rojas Balderrama, Anthony Simonet, and Matthieu Simonin. Enoslib : A library for experiment-driven research in distributed computing. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 33(6) :1464–1477, 2022.
- [7] Carlos Colman-Meixner, Chris Develder, Massimo Tornatore, and Biswanath Mukherjee. A survey on resiliency techniques in cloud computing infrastructures and applications. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 18(3) :2244–2281, 2016.
- [8] Jérôme Denis and David Pontille. *Le soin des choses. Politiques de la maintenance*. La Découverte, October 2022.
- [9] Cécile Diguët, Fanny Lopez, and Laurent Lefèvre. L’impact spatial et énergétique des data centers sur les territoires. Research Report, ADEME, Direction Villes et territoires durables, 2019.
- [10] Esther Jang, Matthew Johnson, Edward Burnell, and Kurtis Heimerl. Unplanned Obsolescence : Hardware and Software After Collapse. In *Proceedings of the 2017 Workshop on Computing Within Limits, LIMITS ’17*, pages 93–101, New York, NY, USA, June 2017. Association for Computing Machinery.
- [11] Nenad Medvidovic and Richard N Taylor. A Classification and Comparison Framework for Software Architecture Description Languages. *IEEE Transactions on software engineering*, 26(1) :70–93, 2000.
- [12] Jose Moura and David Hutchison. Resilience enhancement at edge cloud systems. *IEEE Access*, 10 :45190–45206, 2022.
- [13] Bonnie Nardi, Bill Tomlinson, Donald J. Patterson, Jay Chen, Daniel Pargman, Barath Raghavan, and Birgit Penzenstadler. Computing within limits. *Commun. ACM*, 61(10) :86–93, September 2018.
- [14] OASIS. Topology and Orchestration Specification for Cloud Applications (TOSCA), November 2013.
- [15] Thomas Welsh and Elhadj Benkhelifa. On resilience in cloud computing : A survey of techniques across the cloud domain. *ACM Comput. Surv.*, 53(3), May 2020.