

Compromis autonomie, efficacité et robustesse des services numériques basés sur des centres données distribués et communautaires

[English version below]

Encadrants :

Guillaume Urvoy-Keller, Pr, Université Côte d'Azur
Dino Lopez-Pacheco, MdC, Université Côte d'Azur
Ramon Aparicio-Pardo, MdC, HDR, Université Côte d'Azur

Contexte :

Créer et partager des documents, gérer un blog, héberger un service dans le cloud, rester connecter à "sa communauté" au travers des réseaux sociaux n'ont jamais été aussi simples. Le prix à payer pour cette simplicité est pourtant élevé. Pour le citoyen ou la citoyenne lambda, c'est celui d'une collecte des données personnelles et d'une manipulation du débat public [Chavalarias2023]. Pour les entreprises et l'état, c'est celui de la souveraineté tant en terme de données que de services [gouv2026].

C'est face à ce constat que de nombreuses initiatives communautaires ont émergé pour offrir des services que l'on pourrait qualifier de "dé-bigtechisés". On peut citer en France l'association Le Pic [LePic], Framasoft [Framasoft] ou DeuxFleurs [DF1, DF2]. Au fondement de ces démarches se pose la question de se réapproprier nos données à un cout financier abordable (puisque ici la manne publicitaire n'est plus de mise) ; mais d'autres objectifs sont également recherchés telles :

- La sobriété : DeuxFleurs délivre ses services avec des machines volontairement vieilles afin de limiter l'énergie grise (fabrication et fin de vie des équipements) du service. Le site Low-tech Magazine est hébergé sur un serveur alimenté par un panneau solaire et une batterie [LowTech] ;
- La robustesse : DeuxFleurs a développé Garage, un système de fichier distribué [Garage] capable de fonctionner sur Internet (et pas seulement au sein d'un centre de données à faible latence) ;
- La gouvernance : DeuxFleurs, toujours, a exploré dans quelle mesure leur modèle de gouvernance [Jonglez2026] faisait de leur infrastructure un commun numérique au sens d'Elinor Ostrom [Communs2026].

Objectifs :

Durant ce travail de thèse, nous souhaitons explorer **l'intersection entre autonomie, efficacité et robustesse** des centres de données distribués communautaires. Ce travail comprend deux phases :

- La phase 1 où le candidat ou la candidate travaillera sur la sélection de mécanismes pour les 3 dimensions (autonomie, efficacité et robustesse). Suivant le cas, soit nous développerons des mécanismes spécifiques (en nous appuyant sur les compétences de l'équipe d'accueil SigNet), soit nous sélectionnerons des mécanismes de la littérature pertinents pour le cas d'étude (centre de données communautaires distribués). Un banc de test sera également construit (idéalement à base de matériel de récupération pour la partie informatique, voire la partie alimentation), dans l'objectif de tester certaines des solutions proposées ;
- La phase 2 où sera développé un modèle de calcul d'empreinte environnementale permettant le dimensionnement de centres de données de communautaires distribués en fonction de la charge et des hypothèses faites sur le fonctionnement en mode dégradé : quels services deviennent prioritaires,

quels services sont déportés sur d'autres segments, avec un coût de migration (et donc de qualité d'expérience pour les utilisateurs et utilisatrices).

Phase 1 :

Dans le domaine du numérique comme dans beaucoup d'autres, l'amélioration de l'efficacité énergétique se traduit souvent par un effet rebond [Coroama2019], c'est-à-dire une augmentation de la consommation totale d'énergie car les gains d'efficacité stimulent la demande. Néanmoins, dans un contexte d'infrastructures communautaires, l'effet rebond doit pouvoir être maîtrisé par des mécanismes explicites de contrôle de la demande et la taille volontairement finie et réduite de l'infrastructure physique.

Un piste intéressante est celle de travailler sur l'empreinte mémoire des services hébergés -- un axe de recherche déjà investigué dans l'équipe SigNet -- que l'on peut voir comme une technique d'augmentation de l'**efficacité énergétique** (augmentation de la densité de serveurs virtuels par serveurs physiques). En effet, si les processeurs et les cartes réseaux peuvent être multiplexés temporellement, la RAM est partagée spatialement. La mémoire est ainsi bien souvent la ressource limitante lors du dimensionnement et de l'exploitation des centres de données [Baldassin2026]. Le candidat ou la candidate devra proposer des mécanismes les plus génériques et adaptatifs possibles, c'est-à-dire qui ne nécessitent pas une connaissance précise de la sémantique de l'application hébergée et s'adaptent à ses variations de charge dans le temps.

Un second axe est celui de la **robustesse** que l'on peut définir comme la capacité du système à fonctionner en dépit d'évènements internes (pannes d'un composant) ou externes (panne réseau ou panne électrique). La robustesse s'appuie sur un certain niveau de redondance qui induit a minima un coût en énergie grise. Ce coût peut être variable suivant les choix de designs initiaux. Ainsi DeuxFleurs n'utilise que de vieilles machines, certes en plus grand nombre que strictement nécessaire a priori, mais dont l'énergie grise est minimale au vu de l'âge des équipements. L'énergie liée à l'usage peut, quant à elle, s'en trouver augmentée.

Un dernier axe de cette thèse sera l'étude du niveau d'**autonomie énergétique** (typiquement à l'aide de sources renouvelables locales et de batteries) des centres de données communautaires. On peut aborder leur problème sous deux angles :

1. Minimiser l'empreinte (carbone, financière) du système d'alimentation local. C'est une tâche complexe si l'on souhaite minimiser l'empreinte environnementale complète puisqu'un compromis existe entre disponibilité du service et taille du système d'alimentation autonome [Chancerel2025,Gnibga2024]. Il faudra notamment étudier l'impact de la taille du système et du niveau de service attendu. A noter que l'équipe SigNet dispose d'une expertise sur les 'green data centers' [Vandi2026]
2. Optimiser la consommation énergétique des serveurs et de la partie réseau, si, par exemple, un des nœuds du centre de données distribué comprend plus serveurs reliés par un switch. On pourra s'appuyer sur des approches côté serveurs basées sur RAPL par exemple [Ostapenco2024]. Côté réseau, nous pourrions étudier l'utilisation de switch logiciels [Niccolini2012] combinés à des techniques modernes de transferts de données haute performance dans les noyaux Linux comme eBPF [Castillon2026] (ce dernier travail est une étude récente de SigNet).

Phase 2 :

Une fois les 3 propriétés étudiées séparément, dans l'objectif soit de concevoir des approches nouvelles

(comme par exemple pour la minimisation de l'empreinte mémoire), soit de lister un certain nombre de mécanismes existants qui offrent des degrés de liberté dans le design, la dernière partie de la thèse consistera à mettre ensemble les pièces du puzzle dans un **modèle qui permettent d'étudier les compromis entre autonomie, efficacité et robustesse**. Afin d'évaluer le coût d'un choix de paramètres, des approches de type analyse de cycle de vie [Coroama2020] seront considérées, qui elles devront être mises en regard de scénarios d'usage. En effet, dans certains cas, on peut envisager de minimiser par exemple le niveau d'autonomie du système en priorisant les usages, comme cela a pu être proposé dans le cadre des réseaux mobiles [Courtillat2025].

Programme de recherche prévisionnel :

- T0-T6 : étude bibliographique, design d'un banc de test (couches matérielles et logicielles et alimentation en énergie) et des scénarios d'usages (quels services sont offerts) ;
- T6-T24 : proposition et tests de mécanismes pour les 3 niveaux : autonomie, efficacité et robustesse ;
- T18-36 : conception d'une méthode d'étude des compromis autonomie, efficacité et robustesse au travers d'outils type Analyse de Cycle de Vie (ACV) combinés à une analyse des usages ;
- T33-T36 : finalisation des propositions et rédaction du manuscrit.

Bibliographie :

- [Baldassin2026] David Baldassin, Dino Lopez-Pacheco, Guillaume Urvoy-Keller, Practical Memory Reclaim with Ballooning and Cgroups. In IEEE International Conference on Communications (ICC), 2026
- [Castillon2026] Killian Castillon du Perron et al. Performance Comparison of Modern CNI Technologies for Microservice Architectures. In IEEE International Conference on Communications (ICC), 2026
- [Chavalarias2023] Chavalarias, David. *Toxic Data. Comment les réseaux manipulent nos opinions*. Flammarion, 2023.
- [Communs2026] <https://theconversation.com/en-quoi-les-communs-peuvent-ils-repondre-aux-enjeux-de-la-transition-ecologique-262989>, 2026
- [Courtillat2025] Ludmila Courtillat-Piazza, Marceau Coupechoux, Sophie Quinton: Multi-Techno-Band Cellular Network Resilience to Shocks and Aging: a Stochastic Geometry Approach. INFOCOM WKSHPS 2025: 1-6
- [Coroama2020] Vlad C. Coroama, Pernilla Bergmark, Mattias Höjer, Jens Malmödin: A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services: Part I: Single Services. ICT4S 2020: 36-45
- [Coroama2019] Vlad C. Coroama, Friedemann Mattern: Digital Rebound - Why Digitalization Will not Redeem us our Environmental Sins. ICT4S 2019
- [Chancerel2025] Matteo Chancerel, Anne-Cécile Orgerie: Life-cycle carbon assessment of intermittent Fog services fully powered by renewable energy sources. UCC 2025: 24:1-24:10
- [DF1] <https://deuxfleurs.fr/>
- [DF2] Alex Auvolat, Tom Goldoin, Adrien Luxey-Bitri. Du concept d'entr'hébergement à Garage, solution technique pour le stockage réparti. 1024 : Bulletin de la Société Informatique de France, 2023
- [Framasoft] <https://framasoftware.org/fr/>

- [Garage] <https://garagehq.deuxfleurs.fr/>
- [Gnibga2024] Wedan Emmanuel Gnibga, Anne Blavette, Anne-Cécile Orgerie: Renewable Energy in Data Centers: The Dilemma of Electrical Grid Dependency and Autonomy Costs. *IEEE Trans. Sustain. Comput.* 9(3): 315-328 (2024)
- [gouv2026] <https://www.numerique.gouv.fr/sinformer/espace-presse/souverainete-numerique-reduction-dependances-extra-europe>
- [Jonglez2026] Baptiste Jonglez and Lucien Astié. From research to Deuxfleurs and back again: towards digital service infrastructure as commons, *Undone Computer Science 2026*[Le
- [LowTech] Abbing, Roel Roscam. "This is a solar-powered website, which means it sometimes goes offline': a design inquiry into degrowth and ICT." *Workshop on Computing within Limits*. Vol. 6. 2021.
- [Niccolini2012] Luca Niccolini, Gianluca Iannaccone, Sylvia Ratnasamy, Jaideep Chandrashekar, Luigi Rizzo: Building a Power-Proportional Software Router. *USENIX ATC 2012*: 89-100
- [Ostapenco2024] Vladimir Ostapenco, Laurent Lefèvre, Anne-Cécile Orgerie, Benjamin Fichel: Exploring RAPL as a Power Capping Leverage for Power-Constrained Infrastructures. *ICA3PP (3) 2024*: 323-333
- [Pic] <https://www.le-pic.org/>
- [Vandi2026] Anna Vandi, Ramon Aparicio-Pardo Guillaume Urvoy-Keller, Green Data Centers as Grid-Forming Support Assets. In *IEEE International Conference on Communications (ICC), 2026*

Study of the autonomy, efficiency, and robustness trade-off of distributed community-based data centers

Supervisors:

Guillaume Urvoy-Keller, Professor, Université Côte d'Azur

Dino Lopez-Pacheco, Associate Professor, Université Côte d'Azur

Ramon Aparicio-Pardo, Associate Professor, Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), Université Côte d'Azur

Context:

Creating and sharing documents, managing a blog, hosting a service in the cloud, and staying connected to "one's community" through social networks have never been easier. However, the price to pay for this simplicity is high. For the citizen, it is his or her personal data and the manipulation of the public debate [Chavalarias2023]. For companies and states, it is its sovereignty in terms of both data and services [gouv2026].

As a response to this issue, numerous community initiatives have emerged to offer services that respect the user privacy. Examples in France include Le Pic [LePic], Framasoft [Framasoft], and DeuxFleurs [DF1,

DF2] associations. At the heart of these initiatives lies the question of reclaiming our data at an affordable cost (since the advertising revenue is no longer the primary source of income); but other objectives might also be considered, such as:

- * Sufficiency: DeuxFleurs delivers its services using intentionally older machines to limit the embodied energy (manufacturing and end-of-life of the equipment). The Low-tech Magazine website is hosted on a server powered by a solar panel and a battery [LowTech];

- * Robustness: DeuxFleurs has developed Garage, a distributed file system [Garage] capable of operating on the Internet (and not only in a low-latency data center);

- * Governance: DeuxFleurs has explored the extent to which its governance model [Jonglez2026] qualifies its infrastructure as a digital commons in the sense of Elinor Ostrom [Communs2026].

Objectives:

During this PhD thesis, we aim to explore the intersection between autonomy, efficiency, and robustness in community-based distributed data centers. This work comprises two phases:

- * Phase 1, where the candidate will select mechanisms for the three dimensions (autonomy, efficiency, and robustness). Depending on the case, we will either develop specific mechanisms (drawing on the expertise of the SigNet host team) or select mechanisms from the literature that are relevant to the case study (community-based distributed data centers). A testbed will also be built (ideally using recycled hardware for the computing components, and possibly the power supply), with the aim of testing some of the proposed solutions;

- * Phase 2 will develop an environmental footprint assessment model to enable sizing distributed community data centers based on the anticipated load and assumptions made about degraded operating mode: which services become priorities, which services are migrated to other segments, with a migration cost (and therefore impact on user experience).

Phase 1:

In the digital sector, as in many others, improvements in energy efficiency often result in a rebound effect [Coroama2019], i.e., an increase in total energy consumption because efficiency gains stimulate demand. However, in the context of community infrastructure, the rebound effect must be managed through explicit demand control mechanisms and a deliberately finite and reduced size of the physical infrastructure.

One promising avenue is to work on the memory footprint of hosted services—a research area already investigated by the SigNet team—which can be seen as a technique for increasing energy efficiency (increasing the density of virtual servers per physical server). Indeed, while processors and network cards can be time-multiplexed, RAM is shared spatially. Memory is thus often the bottleneck when sizing and operating data centers [Baldassin2026]. The candidate will need to propose the most generic and adaptive mechanisms possible, meaning mechanisms that do not require precise knowledge of the semantics of the hosted application and that adapt to its load variations over time.

A second focus is robustness, which can be defined as the system ability to function despite internal events

(component failures) or external events (network or power outages). Robustness entails a certain level of redundancy, which at a minimum entails a cost in embodied energy. This cost can vary depending on the initial design choices. For example, DeuxFleurs uses only old machines, admittedly in greater numbers than strictly necessary, but whose embodied energy is minimal given the age of the equipment. The energy consumption associated with their use, however, may be increased.

A final focus of this thesis will be the study of the level of energy autonomy (typically using local renewable sources and batteries) of community data centers. This problem can be approached from two angles:

1- Minimizing the footprint (carbon, financial) of the local power system. This is a complex task if the goal is to minimize the overall environmental footprint, since a trade-off exists between service availability and the size of the autonomous power system [Chancerel2025, Gnibga2024]. It will be necessary, in particular, to study the impact of the system size and the expected level of service. Note that the SigNet team has expertise in 'green data centers' [Vandi2026].

2- Optimizing the energy consumption of servers and the network infrastructure is crucial, especially if, for example, one of the nodes in a distributed data center includes multiple servers connected by a switch. Server-side approaches based on RAPL, for instance, could be used [Ostapenco2024]. On the network side, we could explore the use of software switches [Niccolini2012] combined with modern high-performance data transfer techniques in Linux kernels, such as eBPF [Castillon2026] (this latter work is a recent study by SigNet).

Phase 2:

Once the three properties have been studied separately, with the aim of either designing new approaches (such as for minimizing the memory footprint) or listing a number of existing mechanisms that offer degrees of freedom in the design, the final part of the thesis will consist in assembling the pieces of the puzzle into a model that allows us to study the trade-offs between autonomy, efficiency, and robustness. To evaluate the cost of a choice of parameters, life cycle analysis approaches [Coroama2020] will be considered, which will then be compared with usage scenarios. Indeed, in some cases, it is possible to minimize the system's autonomy level by prioritizing uses, as has been proposed in the context of mobile networks [Courtilat2025].

Planned Research Program:

T0-T6: Literature review, design of a test bench (hardware and software layers and power supply) and usage scenarios (what services are offered);

T6-T24: Proposal and testing of mechanisms for the 3 levels: autonomy, efficiency, and robustness;

T18-T36: Design of a method for studying the trade-offs between autonomy, efficiency, and robustness using Life Cycle Assessment (LCA) tools combined with a usage analysis;

T33-T36: Finalization of proposals and drafting of the manuscript.

Bibliography :

- [Baldassin2026] David Baldassin, Dino Lopez-Pacheco, Guillaume Urvoy-Keller, Practical Memory

- Reclaim with Ballooning and Cgroups. In IEEE International Conference on Communications (ICC), 2026
- [Castillon2026] Killian Castillon du Perron et al. Performance Comparison of Modern CNI Technologies for Microservice Architectures. In IEEE International Conference on Communications (ICC), 2026
 - [Chavalarias2023] Chavalarias, David. *Toxic Data. Comment les réseaux manipulent nos opinions*. Flammarion, 2023.
 - [Communs2026] <https://theconversation.com/en-quoi-les-communs-peuvent-ils-repondre-aux-enjeux-de-la-transition-ecologique-262989>, 2026
 - [Courtilat2025] Ludmila Courtilat-Piazza, Marceau Coupechoux, Sophie Quinton: Multi-Techno-Band Cellular Network Resilience to Shocks and Aging: a Stochastic Geometry Approach. INFOCOM WKSHPs 2025: 1-6
 - [Coroama2020] Vlad C. Coroama, Pernilla Bergmark, Mattias Höjer, Jens Malmödin: A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services: Part I: Single Services. ICT4S 2020: 36-45
 - [Coroama2019] Vlad C. Coroama, Friedemann Mattern: Digital Rebound - Why Digitalization Will not Redeem us our Environmental Sins. ICT4S 2019
 - [Chancerel2025] Matteo Chancerel, Anne-Cécile Orgerie: Life-cycle carbon assessment of intermittent Fog services fully powered by renewable energy sources. UCC 2025: 24:1-24:10
 - [DF1] <https://deuxfleurs.fr/>
 - [DF2] Alex Auvolat, Tom Goldoin, Adrien Luxey-Bitri. Du concept d'entr'hébergement à Garage, solution technique pour le stockage réparti. 1024 : Bulletin de la Société Informatique de France, 2023
 - [Framasoft] <https://framsoft.org/fr/>
 - [Garage] <https://garagehq.deuxfleurs.fr/>
 - [Gnibga2024] Wedan Emmanuel Gnibga, Anne Blavette, Anne-Cécile Orgerie: Renewable Energy in Data Centers: The Dilemma of Electrical Grid Dependency and Autonomy Costs. IEEE Trans. Sustain. Comput. 9(3): 315-328 (2024)
 - [gouv2026] <https://www.numerique.gouv.fr/sinformer/espace-presse/souverainete-numerique-reduction-dependances-extra-europe>
 - [Jonglez2026] Baptiste Jonglez and Lucien Astié. From research to Deuxfleurs and back again: towards digital service infrastructure as commons, Undone Computer Science 2026[Le
 - [LowTech] Abbing, Roel Roscam. "This is a solar-powered website, which means it sometimes goes offline": a design inquiry into degrowth and ICT." *Workshop on Computing within Limits*. Vol. 6. 2021.
 - [Niccolini2012] Luca Niccolini, Gianluca Iannaccone, Sylvia Ratnasamy, Jaideep Chandrashekar, Luigi Rizzo: Building a Power-Proportional Software Router. USENIX ATC 2012: 89-100
 - [Ostapenco2024] Vladimir Ostapenco, Laurent Lefèvre, Anne-Cécile Orgerie, Benjamin Fichel: Exploring RAPL as a Power Capping Leverage for Power-Constrained Infrastructures. ICA3PP (3) 2024: 323-333
 - [Pic] <https://www.le-pic.org/>
 - [Vandi2026] Anna Vandi, Ramon Aparicio-Pardo Guillaume Urvoy-Keller, Green Data Centers as Grid-Forming Support Assets. In IEEE International Conference on Communications (ICC), 2026
