

桥接边缘到云连续体中的 OT 和 PaaS

Carlos J. BARRIOS H. (1,2,3) and Yves DENNEULIN (1,2)

LIG/INRIA, Datamove Team, Grenoble, France

Université Grenoble-Alpes, Grenoble-INP, Grenoble, France

Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

carlos-jaime.barrios-hernandez@inria.fr, Yves.Denneulin@grenoble-inp.fr

Résumé

运营技术平台即服务 (OTPaaS) 倡议为数据的有效管理和存储提供了结构化的框架。它确保了出色的响应时间,同时提高了安全性、可靠性、数据和技术主权、稳健性和能源效率,这些都是工业转型和数据主权的关键因素。本文展示了成功的部署、可适应的应用程序管理以及各种集成组件,以满足边缘和云环境的需求。它利用了平台即服务模型的优势,并强调了已解决的特定用例的关键挑战。

Mots-clés : Platform as a Service, Edge-To-Cloud Continuum, Internet of Things.

1. 介绍

数字化转型推动组织通过在层级结构中集成技术来提升效率和降低成本。这种集成对于适应数字变化至关重要,使公司能够抓住机会 [1]。在工业 4.0 中,它通过大数据、自动化和云计算 [2] 将物理世界与数字世界融合在一起。识别运营技术 (OT) 问题对于有效的监控至关重要。关键挑战包括漏洞、对数据驱动决策的需求以及整合多样化的标准。

将计算元素与工业自动化集成面临着挑战。尽管存在各种技术方法,但成功实施或广泛适用的很少 [3] [4]。这一驱动促使了支持物联网倡议的呼声,这些倡议与边缘和云计算相一致,用于工业应用 [5] [6] [7]。一个作为服务的平台 (PaaS) 针对边缘到云计算增强了框架和可扩展性,整合自动化 [8]。然而,数据安全、合规性和主权问题依然存在。OTPaaS 倡议建议在边缘到云连续体中的 PaaS 内有效管理数据的框架,提出一个开发和管理应用程序的平台,同时确保安全性和信任度。标准的作为服务的平台 (PaaS) 包括基础设施、云端应用以及图形用户界面 (GUI),类似于无服务器计算或功能即服务 (FaaS) 模型 [9],其中云提供商管理基础设施。图 1 展示了 PaaS 工作流程操作和边缘到云端架构。在此场景中,开发人员通过特定的网络连接访问各种资源,这使得应用程序可以为用户提供服务。用户访问应用程序,在某些情况下,他们会同时进行访问。在这个背景下,有几个关键组件值得注意:集成开发环境 (IDE)、中间件 (由虚线表示的一个不可见实体)、操作系统 (OS)、软件 (SW)、数据库 (包括数据安全和数据备份),以及数据和应用程序托管。PaaS 供应商负责管理服务器、存储和物理数据中心,或者从第三方提供商处获取这些资源。这种安排使开发团队能够专注于应用程序开发,而不是担心与基础设施相关的问题。

图 1 的左侧显示了关键点:为快速开发和部署而预先配置环境的必要性,分布式用户易于访问协作,

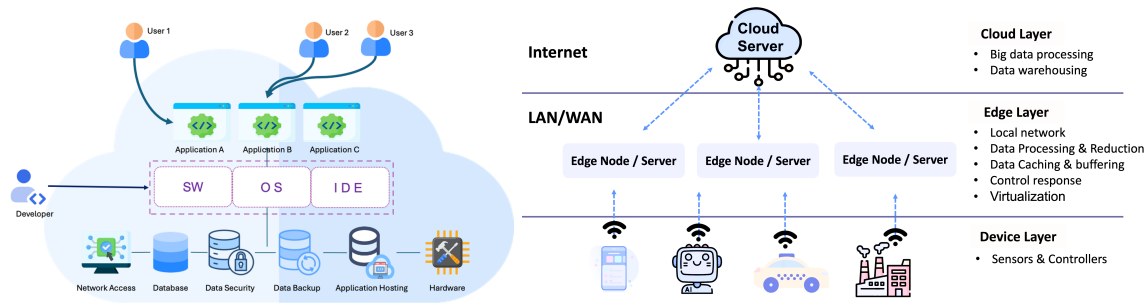


FIGURE 1 – 平台即服务 workflow 模型与边缘到云架构

以及运营支持系统。为了缓解数字主权方面的担忧，OTPaaS 在边缘与云端之间引入了一个连续体，摆脱了孤立的数据处理方式，转向原生盖亚-X 平台。由欧盟推出的 GAIA-X，通过其规范、规则、政策和验证框架¹ 设定了联邦化可信数据和基础设施生态系统的事实标准。

边缘到云计算连续体标志着数据管理在各种计算环境中的重要转变 [10]。它将边缘计算（即处理接近物联网设备等源头的的数据）与集中的云计算整合起来。这种框架支持可扩展、分布式的操作，以满足特定需求，使应用程序能够在嵌入式设备到大型基础设施 [11], [12] [13] 上运行。其集成对于实时应用至关重要，例如智能制造。边缘到云架构结合了两模型的优势，增强了资源分配和性能。边缘层促进即时处理，而云则根据可扩展性需求提供存储和计算能力。图的右侧 1 描述了一个在分布式环境中的一般边缘到云架构，将处理分布在多个边缘节点上用于数据收集和分析，并连接至云端以处理工作负载 [14]。边缘节点扩展了本地网络之外的能力，支持数据处理、缓存、控制和虚拟化。在网络的最底层，物联网设备生成数据。设计特性包括数据复制、同步、缓存、预取、负载均衡、可伸缩性和安全性。在边缘到云部署中，识别模式带来了挑战。灵活性、存储共享和访问，并支持服务等级协议，增强了集成并促进了操作自动化 [15] [16]。

本文讨论了如何通过整合 OT 和 PaaS 成功实现边缘到云计算连续体愿景，结合了两模型的具体特性。

2. 从特异性到开放云解决方案：OTPAAS 概念

开放云的使用并不是最近才出现的发展；它已经存在了十多年。通过各种经验，包括在视频游戏领域的经验，这一策略得到了发展和演变，如前所述的研究 [17] [18] 所示。灵活性、成本效益以及绕过供应商锁定的能力 [19] 推动了这种演变。基于开源技术的解决方案整合促进了多样化的云服务，这些服务针对运营技术进行了定制，涵盖了平台即服务 (PaaS)，从而能够创建一个实施和部署的概念模型，称为 OTPaaS。

图 2 说明了 OTPaaS 的开放云概念，通过将现场数据处理转换为由专业应用程序管理的结构化存储桶，在多云环境中提供定制解决方案。实现 OTPaaS 技术堆栈提高了专业化，并与图 1 中的服务平台即服务模型保持一致。分布式、多租户基础设施允许应用实例服务于多个租户，提高资源效率。挑战包括开发接口、数据治理、成本和节能。GAIA-X 保证了 OTPaaS 的安全性、主权、效率以及对遗留系统的支持，并在开源多云框架中推动成本节约和灵活的互操作性。OTPaaS 培育了一个集成

1. 更多信息请参见：<https://gaia-x.eu>。

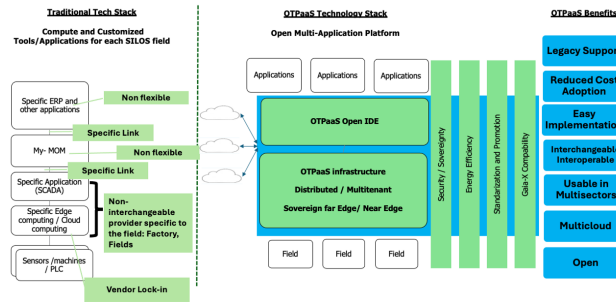


FIGURE 2 – OTPaaS 概念

容器即服务（CaaS）用于应用开发的生态系统，为所有组织建立了一个框架。量身定制的战略对于灵活性和安全至关重要，导致混合实施模型。

3. 集成 PaaS 中的 CaaS 的高效运营技术

编排需要通过本地或虚拟环境进行部署、监控和计算卸载。图 3表明，尽管使用场景不同，它们都共享由 OTPaaS 架构解决的编排需求，该架构采用模块化方法将 CaaS 与特定容器化相结合。单一架构不足以支持 OTPaaS，需要灵活的混合多云策略。为了确保可扩展性、自主性和隐私，服务使用 Kubernetes²。微服务允许定制开发，并且容器独立执行任务。这促进了更广泛部署前的快速原型制作和反馈。OTPaaS 中的多云策略简化了对容器化应用程序的管理，增强了 OT 和 PaaS 的可移植性和无缝操作。

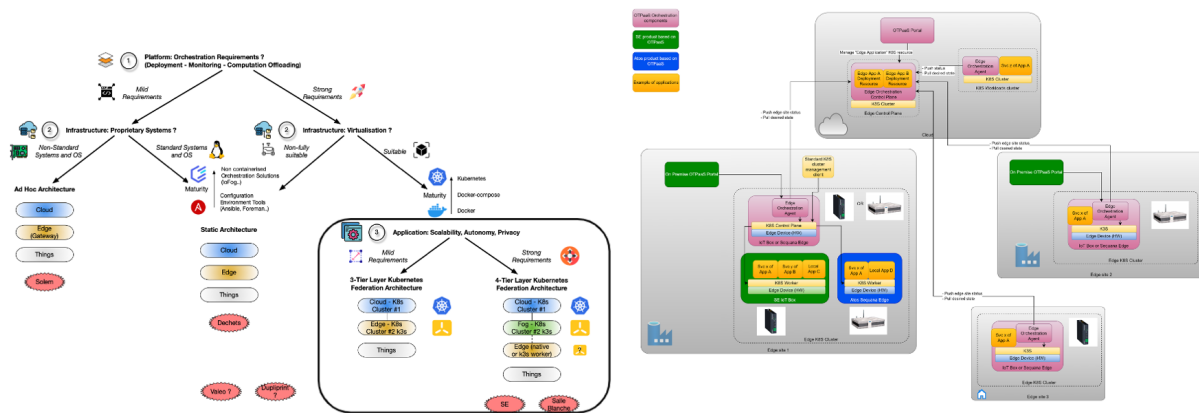


FIGURE 3 – PaaS 使用要求和 OTPaaS 架构

OTPaaS 架构包括编排、产品（面向组织）和应用程序。每个模块都有特定的容器化需求。两个需要本地 OTPaaS 门户，而一个不需要。它们通过连接到 OTPaaS Cloud 门户网站的边缘编排代理共享资源池进行工作。该代理使用预定义的状态在边缘站点高效部署资源。OTPaaS 集成使应用程

2. <https://kubernetes.io/>

序能够适应波动的工作负载和资源需求，确保最佳性能。OTPaaS 将应用程序打包到容器中，在本地环境和云环境中保持一致的性能。CaaS 平台提供基础设施，通过 API 或 GUI 部署、管理和扩展应用程序。开发人员利用 PaaS 工具构建带有数据库、中间件和服务的应用程序。OTPaaS 自动化 CaaS 平台上的 PaaS 操作编排和缩放，确保高可用性。下一节将通过三个定制的用例展示 OTPaaS 的机制，适用于不同组织和规模。

4. OTPaaS 部署和用例

测试规模在各种组织中显示了有效性，包括大型工业物联网用户、中型科研机构 and 小型专业公司。OTPaaS 提供可靠、可扩展且安全的托管应用程序。本文讨论了诸如服务集成、自动化配置和资源分配等挑战。

4.1. 物联网和数据的安全与可靠

大型组织优先考虑数据安全。一个使用混合多云策略的健壮物联网系统结合了本地、私有和混合云，以实现工作负载的最佳部署，同时管理成本和合规性。OTPaaS 计划需要一种灵活、可扩展且具有韧性的架构，并具备强大的灾难恢复系统，确保平稳的数据交换和不间断操作。

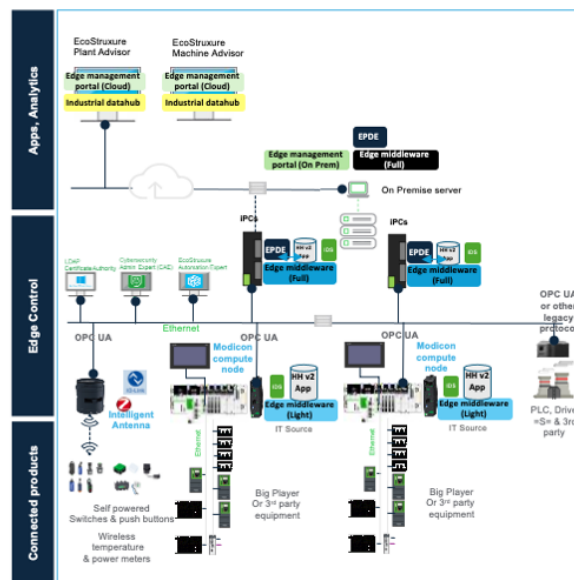


FIGURE 4 – 用例 1：操作架构覆盖 OP CUA

图 4展示了第一个用例的操作框架，阐释了来自图 2的 OTPaaS 概念和图 ??中的架构。该框架有三层：上层专注于分析，中层管理边缘控制，下层包括设备产品。施耐德电气的 EcoStruxure 技术平台整合了物联网和数据安全服务³。SE 物联网平台能够实现连接设备的云管理。应用包可以通过使用 Edge 运行时的容器进行部署。在 OTPaaS 中，改进的边缘节点与 Kubernetes 协同工作，允许定制化同时管理资源集成、自动负载均衡和操作调整。运营平台（OPC-UA）的统一架构使自动化系统

3. <https://www.se.com/ww/fr/work/campaign/innovation/overview.jsp>

能够安全地通信和交换数据 [20]。其层级节点地址空间包括机器、传感器和控制器的数据变量、对象、方法和组件。OPC UA 还通过面向对象建模支持多种数据类型，包括复杂结构和数组。基于图 4 所示的架构抽象，我们提出一个包含 3 个节点的 50 秒模拟，针对特定工业使用变量。每个节点将随着时间模拟客户端读取的值（信号、请求和消息传输），如图 5 所示。

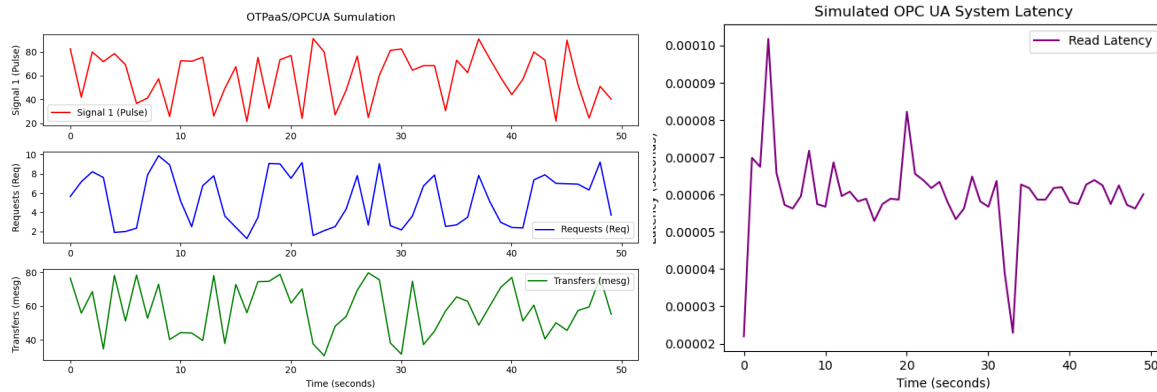


FIGURE 5 – OPCUA 上的 OTPaaS 仿真

我们通过测量客户端读取服务器值的时间来评估三节点模拟中的延迟。图 5 显示了每轮数据检索的结果。延迟衡量发送读请求和接收响应所需的时间。客户端连接到服务器并跟踪跨节点请求。在模拟中，由于网络延迟和服务器处理的原因，延迟会有所不同。OPCUA 提供跨平台通信和可扩展性。OTPAAS 建议的实现优势如下用例所示。

4.2. OTPaaS 高效编排

自动化、协调和资源供应对平台即服务（PaaS）的效率至关重要。PaaS 将云任务转移到网络边缘，使计算资源更接近数据生产者。这需要灵活且动态的服务编排，无论采用什么样的部署方法，如函数即服务（FaaS）[21] 或基础架构即代码（IaC）[22]。实现云编排对于管理多样化的云环境、自动化 workflows、集成服务和优化资源至关重要。OTPaaS 平台具备一个集中式的界面——OTPaaS 门户，提供了构建、部署和管理环境的工具。在平台上自动并简化任务以监督服务和应用程序的部署、扩展及生命周期管理。

图 6 展示了用于编排的 OTPaaS 架构。管理集群包括自助服务组件、软件目录、生命周期管理（根据 Continuum Cloud2Edge [23]）、认证、授权和编排。管理和云及边缘集群各自拥有一个编排代理，负责管理本地代理，促进应用程序部署并与主编排器同步。

此用例侧重于自动化应用程序部署、生成 DNS 条目和 TLS 证书、应用自定义设置以及管理升级和移除。诸如 RabbitMQ⁴ 等消息软件通过为应用程序创建队列来发送消息，从而实现这一目标。图 6 展示了 Eviden 公司使用由 Eviden⁵ 开发的用例部署 OTPaaS 架构的情况。此架构支持在边缘服务器和云中创建 Kubernetes 集群。如图 6 所示，一个代理与 OTPaaS 管理门户同步。代理与云平台之

4. <https://www.rabbitmq.com/>

5. <https://eviden.com/>

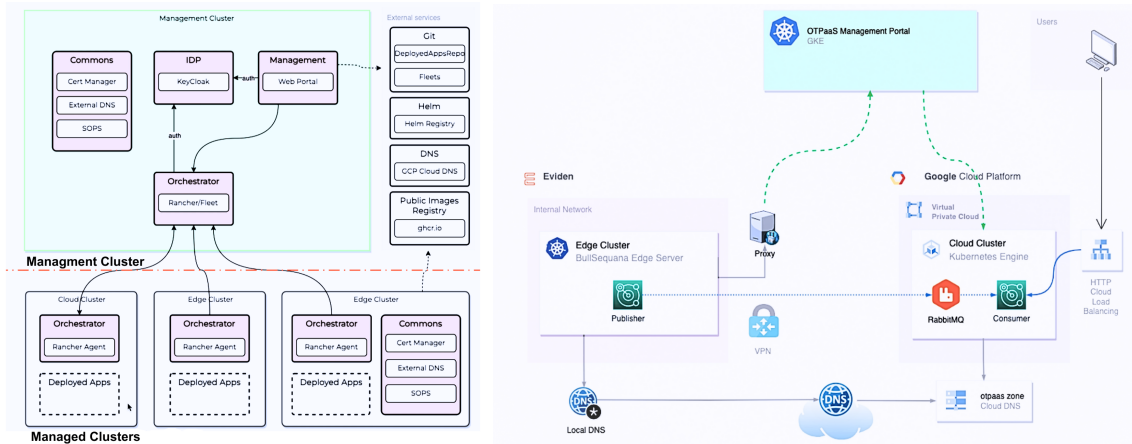


FIGURE 6 – 用例 2: OTPaaS 编排和通用架构

间的通信通过公共访问建立，而边缘集群代理也可以与门户同步。根据任务的不同，操作的支持可能来自外部或本地服务，例如本地或云 DNS。

该平台作为监测利用率增长的基础，重点关注其平台即服务特性。图 7 展示了用例的模拟情况，显示了基线使用量（红色）和随时间增加的利用率（以单位为计量），期间有周期性的下降。

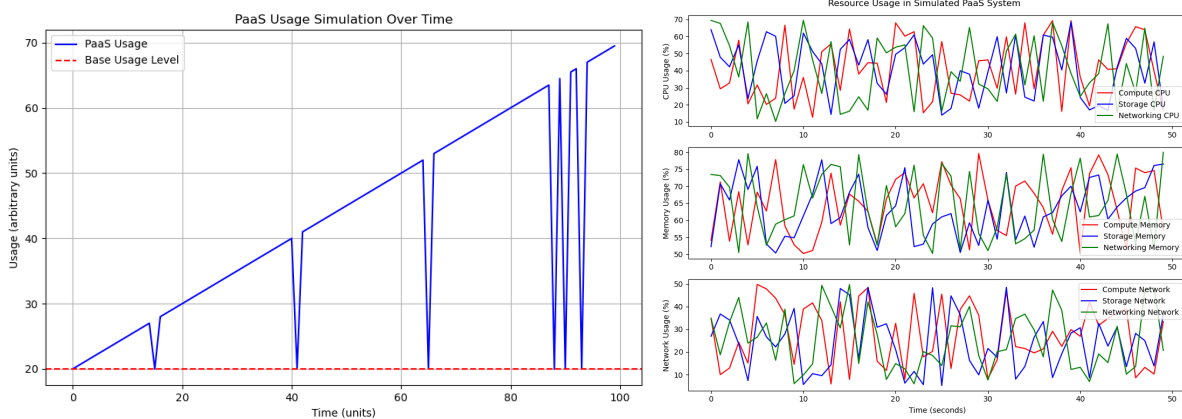


FIGURE 7 – OTTPaaS 模拟和编排使用

模拟显示平台的最小利用率为 20%。尽管存在独特的案例特征和一些停机时间，使用量显著增加。只有 5%到 10%的平台经历停机时间，但使用量仍在继续增长。

OTTPaaS 编排仿真是一个服务（节点）相互协调的系统。这些节点可能代表诸如以下的服务：

- 计算节点：运行计算任务。
- 存储节点：管理数据存储和检索。
- 网络节点：管理与其他节点之间的通信。

此模拟建模了服务随时间的通信，代表节点间任务协调的同时监控资源利用率（CPU、内存、网络

负载)的变化。图 7显示了仿真结果。

将生成三个子图,如图 7所示:

- CPU 使用情况: 显示计算、存储和网络节点随时间的 CPU 利用率。
- 使用内存: 显示节点的内存使用情况。
- 网络使用情况: 显示节点的网络使用情况。

OTPaaS 编排是高效的,并确保了最优的资源分配、灵活部署和无缝的工作负载管理。开发的测试展示了随着工作负载需求扩展的能力。自动缩放会根据 CPU 或请求负载调整资源,增强编排并减少运营开销。

4.3. 高效能源和资源分配

OTPaaS 概念通过动态扩展、工作负载优化和能源预测提升能源意识和效率。它旨在优化资源使用并实现节能调度,利用分析方法揭示电力低效问题。该模型通过反馈控制回路处理复杂性,以提高效率、可扩展性和容错能力,有利于多云和自主计算环境。云计算中的多环架构利用反馈回路来优化云系统管理。这对于自主计算至关重要,在这种情况下,系统监控并适应变化,确保服务质量 (QoS) 并符合服务级别协议 (SLA) [24]。

在边缘到云连续模型中各层收敛后,OTPaaS 被设计为提供能源即服务 (EaaS) 支持,从而允许从指定的能源资源向专业服务提供商访问与能源相关的服务,这取决于这些资源的可用性,如图 8所示。

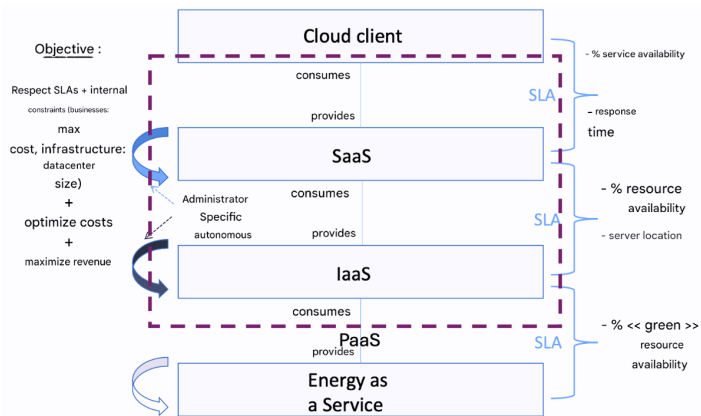


FIGURE 8 – 作为服务的能源模型在 OTPaaS 背景下的应用

在 OTPaaS 中,每个控制回路都有特定的目的,例如资源分配或工作负载平衡。多控制回路架构同步这些回路以增强云性能和稳定性。每个控制回路独特运行:一个反馈回路优化基础设施,而其他回路管理应用程序性能。这种有效性源自分层方法以及边缘设备、中间件、平台和应用程序之间的协作,并且有明确的角色分工。反馈回路确保各层级间的高效操作与协调。

[25] 中提出的模型表明,OTPaaS 使用带有 MAPE-K 控制循环 [26] 的多个自治管理器 (AM) 框架来允许云应用和基础设施的自我适应。如图 9所示,每个应用程序都有一个指定的应用程序 AM (AAM),以管理架构性和资源容量的弹性。识别出最优的架构配置和最小所需的计算资源 (VM),以在特定工作负载下最大化服务质量 (QoS)。在基础设施层面,基础设施 AM (IAM) 以节能的方式监督资源 (边缘设备和 VM),优化 VM 的位置分布以在其最少数量的边缘设备上最大化其数量。

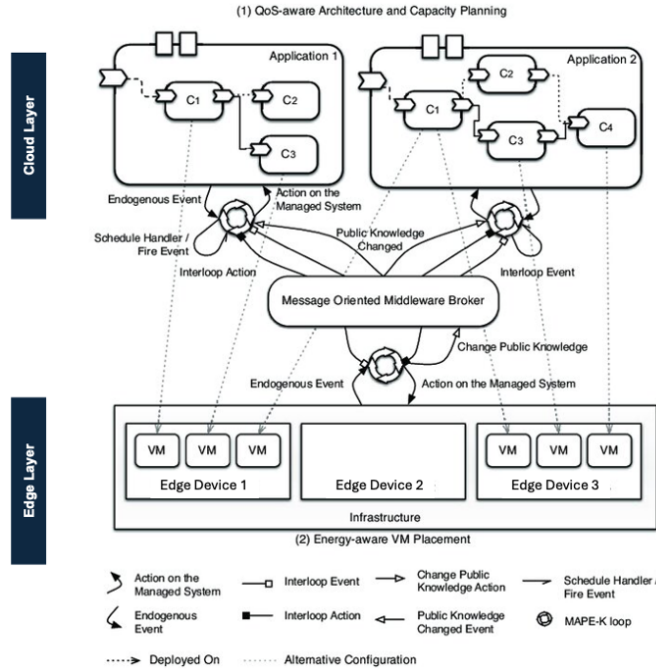


FIGURE 9 – 用例 3：在基于 [25] 的 OTPaaS 中实现的自适应框架的架构概述

图 10显示了 OTPaaS 中用于执行 AI 任务的边缘设备的节能策略，采用多个自主管理器。我们通过管理器改进来评估每项任务的能量消耗。随着任务的进行，由于这些增强功能，能量消耗下降。分析这些数据使我们可以生成遵循正态分布的随机任务完成时间，研究性能的变化。

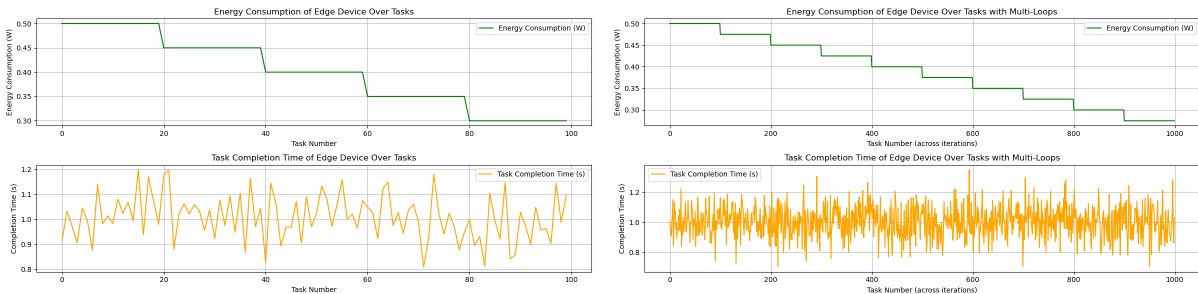


FIGURE 10 – OTPaaS 能耗行为

研究结果突出了针对具有自主管理器的设备的一种节能型 OTPaaS 策略，重点在于能源消耗和 AI 任务完成时间。这些管理器协调边缘与云资源，根据能源使用和延迟情况确定是在能耗受限的边缘设备上执行任务还是将其卸载到云端，并适应工作负载和能源可用性。多循环分析评估了在 AI 任务期间边缘设备上的能源消耗和性能，如图 10所示。由于效率提高，每项任务的能量使用量在迭代过程中减少。多次循环的性能变化揭示了上述条件下的能量消耗和任务完成时间。

5. 背景

云平台即服务正在工业环境中不断发展。二十多年来，行业一直利用基于云计算的技术，物联网、网络物理系统、大数据和人工智能等创新推动了生产环境的趋势 [27]。为了充分利用 PaaS，目标是实现互操作性，并整合混合组件以管理公共云和私有云上的应用程序，如 Cloud4SOA [28] [29] 所示。该模型支持为处理边缘设备数据的云流程提供资源，扩展技术采用进入一个新的边缘到云端连续体模型。它引入了智能分布式应用，并提出了关于系统能力、复杂环境中的自我适应性、安全、安全性、稳健性和可持续性的 [30] 问题。

在工业环境中，运营技术 (OT) 和平台即服务 (PaaS) 沿边缘到云计算连续体是数字化转型的关键要素，特别是在数据控制和合规性方面。虽然本文不讨论法律问题，但数据主权至关重要。它涉及数据位置、合规性和互操作性。为此，OTPaaS 合作伙伴正在与 GAIA-X 合作，旨在创建一个安全的欧洲数据基础设施，促进主权和透明度。该项目促进了数据共享的数字生态系统，并减少了对非欧洲云服务提供商 [31] 的依赖。由欧洲资金支持的 GAIA-X 项目展示了在各种组织中有效实施的原则。例如，EuProGigant⁶ 计划是 GAIA-X 的一个灯塔项目，推广工业 4.0 和数字化转型。像 NextCloud⁷ 这样的欧洲组织已经加入了 GAIA-X 协会，以满足业务需求的同时确保透明度和互操作性。GAIA-X 为欧洲建立了一个联邦制和安全的数据基础设施。类似的全球倡议包括国际数据空间 (IDS)⁸、欧洲开放科学云 (EOSC) [32] 以及以其作为基础设施即服务 (IaaS) 能力著称的 OpenStack⁹，支持公共和私有云开发。

6. 结论

OTPaaS 提供了众多优势，计算连续体在数字化转型中具有巨大潜力，但产学研合作面临挑战。操作技术 (OT) 和平台即服务 (PaaS) 在现代 IT 和云计算中是不同的却又相互关联的。它们的交汇涉及管理平台运营以实现高可用性、性能、一致性和韧性。这三个场景展示了 CaaS 如何自动化 OTPaaS 中的操作。在这里，编排是主要挑战，有助于数据管理、应用程序和物理系统。各种实验突出了 OT 流程自动化、数据洞察力和可扩展性。然而，该解决方案引发了对服务模式的疑问，特别是边缘到云共享问题和能源效率问题，这些问题可能会改变操作技术向云计算连续体中 EaaS 的视角。

7. 讨论与进一步工作

OTTPaaS 项目对于在法国和欧洲实施数字转型和技术解决方案至关重要。它方法论地促进了生产性和科学生态系统各领域的互动，增强 DevOps 任务和用户体验。然而，它也提出了关于引导未来工作和数字化转型方法的结论方面的挑战。这需要定义广泛使用的概念，如计算连续体、计算效率和可持续性。

将操作技术 (OT) 与边缘到云计算作为平台即服务 (PaaS) 集成，不仅涉及自动化，主要关注计算连续体中的数据安全和隐私。虽然资源分配有所改善，但必须解决管理数据共享和隐私的立法的影响，这标志着新 SLA [34] [35] 实施的重要变化。关于数据主权的问题尤为突出，这在欧洲尤其明显，但也具有全球性影响。GAIA-X 为此提供了一个框架，而 OTPaaS 旨在与其原则保持一致，这也适用

6. <https://euprogigant.com>

7. <https://nextcloud.com/>

8. <https://internationaldataspaces.org/>

9. <https://www.openstack.org/>

于其他全球框架，表明研究和生产领域均有重要发展。

关键方面包括网络可靠性和延迟。像传感器这样的边缘设备经常由于不稳定而与 OTPaaS 平台断开连接。尽管它具有潜力,但这种模型面临着需要解决的挑战,以提高弹性和通过本地数据处理 [36] [37] 减少延迟。边缘-云集成会导致大规模聚合中的延迟。有效的可扩展性和管理对于分布式网络中的边缘设备和云资源至关重要,这需要工具来保证一致的性能。计算连续系统中多样化的架构与 OTPaaS 给研究和实施带来了挑战,缺乏标准化使边缘到云端的部署变得复杂。本文强调了好处并解决了未解决的问题,将生态系统视为碎片化或建议进行细分以增强灵活性和互操作性 [38] [39]。资源限制在边缘设备上限制了现场计算能力,从而限制了应用程序部署并影响工作负载的能量效率。

致谢

OTPaaS 项目将最终用户与技术供应商连接起来,包括 Atos/Bull、施耐德电气和法雷奥等大型公司以及 Agileo Automation、Mydatamodels、Dupliprint、Solem、Prosyst 和 TwinsHel (由 Soben 提供) 等中小企业。法国领先的科研机构,如 CEA、INRIA 和 IMT,通过 Captronic 联盟的参与支持该项目。这一举措由法国经济、财政及数字工业主权部管理的 France Relance 计划资助,并得到欧盟的支持。

Bibliographie

1. P. Faraboschi, E. Frachtenberg, P. Laplante, D. Milojicic and R. Saracco, Digital Transformation : Lights and Shadows, in Computer, vol. 56, no. 4, pp. 123-130, April 2023. <https://doi.org/10.1109/MC.2023.3241726>.
2. Zamora Iribarren, M., Garay-Rondero, C. L., Lemus-Aguilar, I., and Peimbert-García, R. E. (2024). A Review of Industry 4.0 Assessment Instruments for Digital Transformation. Applied Sciences, 14(5), 1693. <https://doi.org/10.3390/app14051693>.
3. Matt, C., Hess, T. and Benlian, A. Digital Transformation Strategies. Bus Inf Syst Eng 57, 339 – 343 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12599-015-0401-5>.
4. S. Mittal, N. Negi and R. Chauhan, Integration of Edge computing with Cloud computing, 2017 International Conference on Emerging Trends in Computing and Communication Technologies (ICETCCT), Dehradun, India, 2017, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICETCCT.2017.8280340>.
5. K. Cao, Y. Liu, G. Meng and Q. Sun, An Overview on Edge Computing Research, in IEEE Access, vol. 8, pp. 85714-85728, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991734>.
6. K. Cao, S. Hu, Y. Shi, A. W. Colombo, S. Karnouskos and X. Li, A Survey on Edge and Edge-Cloud Computing Assisted Cyber-Physical Systems, in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 17, no. 11, pp. 7806-7819, Nov. 2021. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3073066>.
7. M. N. Jamil, O. Schelén, A. Afif Monrat and K. Andersson, Enabling Industrial Internet of Things by Leveraging Distributed Edge-to-Cloud Computing : Challenges and Opportunities, in IEEE Access, vol. 12, pp. 127294-127308, 2024. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3454812>.
8. Li, L., Tang, C. Design and implementation of an intelligent digital manufacturing system based

- on PaaS and virtual reality technology. *Int J Adv Manuf Technol* (2024). <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14287-z>.
9. Grogan, J., Mulready, C., McDermott, J., Urbanavicius, M., Yilmaz, M., Abgaz, Y., McCarren, A., Togneri MacMahon, S., Garousi, V., Elger, P., and Clarke, P. (2020). A multivocal literature review of function-as-a-service (faas) infrastructures and implications for software developers. In *Systems, Software and Services Process Improvement : 27th European Conference, EuroSPI 2020, Düsseldorf, Germany, September 9 – 11, 2020, Proceedings 27* (pp. 58-75). Springer International Publishing.
 10. Moreschini, S., Pecorelli, F., Li, X., Naz, S., Hästbacka, D., and Taibi, D. (2022). Cloud Continuum : The definition. *IEEE Access*, 10, 131876-131886.
 11. Milojevic, D. (2020). The Edge-to-Cloud Continuum. *Computer*, 53(11), 16-25.
 12. Rosendo, D., Costan, A., Valduriez, P., and Antoniu, G. (2022). Distributed intelligence on the Edge-to-Cloud Continuum : A systematic literature review. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 166, 71-94.
 13. Gkonis, P., Giannopoulos, A., Trakadas, P., Masip-Bruin, X., and D' Andria, F. (2023). A survey on IoT-Edge-Cloud Continuum systems : status, challenges, use cases, and open issues. *Future Internet*, 15(12), 383.
 14. C. Pahl and B. Lee, Containers and Clusters for Edge Cloud Architectures – A Technology Review, 2015 3rd International Conference on Future Internet of Things and Cloud, Rome, Italy, 2015, pp. 379-386. <https://doi.org/10.1109/FiCloud.2015.35>.
 15. Tong, L., Li, Y., and Gao, W. (2016, April). A hierarchical Edge Cloud architecture for mobile computing. In *IEEE INFOCOM 2016-The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications* (pp. 1-9). IEEE.
 16. Bhandari, G. P. and Gupta, R. (2021). An Overview of Cloud and Edge Computing Architecture and Its Current Issues and Challenges. In I. Management Association (Ed.), *Research Anthology on Architectures, Frameworks, and Integration Strategies for Distributed and Cloud Computing* (pp. 2340-2370). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-5339-8.ch114>.
 17. Chun-Ying Huang, Cheng-Hsin Hsu, Yu-Chun Chang, and Kuan-Ta Chen. 2013. GamingAnywhere : an open Cloud gaming system. In *Proceedings of the 4th ACM Multimedia Systems Conference (MMSys '13)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 36 – 47. <https://doi.org/10.1145/2483977.2483981>.
 18. A. Edmonds, T. Metsch, A. Papaspyrou and A. Richardson, Toward an Open Cloud Standard, in *IEEE Internet Computing*, vol. 16, no. 4, pp. 15-25, July-Aug. 2012. <https://doi.org/10.1109/MIC.2012.65>.
 19. Soni, P. K., and Dhurwe, H. (2024). Challenges and Open Issues in Cloud Computing Services. In *Advanced Computing Techniques for Optimization in Cloud* (pp. 19-37). Chapman and Hall/CRC.
 20. Busboom, A. (2024). Automated generation of OPC UA information models—A review and outlook. *Journal of Industrial Information Integration*, 100602. ISSN 2452-414X. <https://doi.org/10.1016/j.jiis.2024.100602>.

org/10.1016/j.jii.2024.100602.

21. Giovanni Merlino, Giuseppe Tricomi, Luca D' Agati, Zakaria Benomar, Francesco Longo, Antonio Puliafito. FaaS for IoT : Evolving Serverless towards Deviceless in I/OCLOUDS, Future Generation Computer Systems, Volume 154, 2024, Pages 189-205, ISSN 0167-739X. <https://doi.org/10.1016/j.future.2023.12.029>.
22. Akond Rahman, Rezvan Mahdavi-Hezaveh, Laurie Williams. A systematic mapping study of infrastructure as code research. Information and Software Technology, Volume 108, 2019, Pages 65-77, ISSN 0950-5849. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2018.12.004>.
23. Yousif, M. (2022, December). The Edge, the Cloud, and the Continuum. In 2022 Cloud Continuum (pp. 1-2). IEEE.
24. Alvares, Frederico, Sharrock, Rémi, and Ledoux, Thomas. (2012). Synchronization of Multiple Autonomic Control Loops : Application to Cloud Computing. 7274. 29-43. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30829-1_3.
25. Alvares, Frederico, Ledoux, Thomas, Sharrock, Rémi. (2013). A Framework for the Coordination of Multiple Autonomic Managers in Cloud Environments. International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, SASO. 179-188. <https://doi.org/10.1109/SASO.2013.27>.
26. Kephart, Jeffrey, and Chess, D.M.. (2003). The Vision Of Autonomic Computing. Computer. 36. 41 - 50. <https://doi.org/10.1109/MC.2003.1160055>.
27. Gharibvand, V., Kolamroudi, M.K., Zeeshan, Q. et al. Cloud based manufacturing : A review of recent developments in architectures, technologies, infrastructures, platforms and associated challenges. Int J Adv Manuf Technol 131, 93 – 123 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00170-024-12989-y>
28. Zeginis, Dimitris ; D' Andria, Francesco ; Bocconi, Stefano ; Gorroñoigoitia, Jesús ; Martin, Oriol, Gouvas ; Panagiotis, Ledakis, Giannis ; and Tarabanis, Konstantinos. (2013). A user-centric multi-PaaS application management solution for hybrid multi-Cloud scenarios. Scalable Computing : Practice and Experience. 14. <https://doi.org/10.12694/scpe.v14i1.824>.
29. F. DAndria, S. Bocconi, J. G. Cruz, J. Ahtes, and D. Zeginis. Cloud4SOA : Multi-Cloud Application Management Across PaaS Offerings. 2012 14th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing, Timisoara, Romania, 2012, pp. 407-414. <https://doi.org/10.1109/SYNASC.2012.65>.
30. Khalyeyev, D., Bureš, T., Hnětynka, P. (2023). Towards Characterization of Edge-Cloud Continuum. In : Batista, T., Bureš, T., Raibulet, C., Muccini, H. (eds) Software Architecture. ECSA 2022 Tracks and Workshops. ECSA 2022. Lecture Notes in Computer Science, vol 13928. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36889-9_16.
31. Adler-Nissen, R., and Eggeling, K. A. (2024) The Discursive Struggle for Digital Sovereignty : Security, Economy, Rights and the Cloud Project Gaia-X. JCMS : Journal of Common Market Studies, 62 : 993 – 1011. <https://doi.org/10.1111/jcms.13594>..
32. Bertelli, A., Acciai, M., and Rossi, G. (2025). The European Open Science Cloud as a common good Potentials and limitations of this endeavour. Open Research Europe, 5(19), 19.

33. Leksono, E., Mardiatna, I., Setijadi, A., Budiyo, A., Joelianto, E., and Sunaryo, A. F. (2023). Energy as A Service (EaaS) : A Paradigm Shift in Energy Management. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14590808>
34. V. Karagiannis, "Data Sovereignty and Compliance in the Computing Continuum," 2024 11th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud), Vienna, Austria, 2024, pp. 123-130, <https://10.1109/FiCloud62933.2024.00027>.
35. K. Bocianiak, T. Pawlikowski, A. Podlasek, J. -P. Wary and J. Wierzbowski, "Challenges for Continuous, Provable Security Service Level Agreement Management in Computing Continuum," in IEEE Access, vol. 12, pp. 152097-152107, 2024, <https://10.1109/ACCESS.2024.3480688>.
36. Donta, P. K., Murturi, I., Casamayor Pujol, V., Sedlak, B., and Dustdar, S. (2023). Exploring the Potential of Distributed Computing Continuum Systems. Computers, 12(10), 198. <https://doi.org/10.3390/computers12100198>.
37. Christian Berger, Philipp Eichhammer, Hans P. Reiser, Jörg Domaschka, Franz J. Hauck, and Gerhard Habiger. 2021. A Survey on Resilience in the IoT : Taxonomy, Classification, and Discussion of Resilience Mechanisms. ACM Comput. Surv. 54, 7, Article 147 (September 2022). <https://doi.org/10.1145/3462513>.
38. Stocker, Volker and Stocker, Volker and Knieps, Guenter and Dietzel, Christoph, The Rise and Evolution of Clouds and Private Networks – Internet Interconnection, Ecosystem Fragmentation (August 23, 2021). TPRC49 : The 49th Research Conference on Communication, Information and Internet Policy, Available at SSRN : <https://ssrn.com/abstract=3910108> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3910108>
39. L. Chao, X. Peng, Z. Xu and L. Zhang, "Ecosystem of Things : Hardware, Software, and Architecture," in Proceedings of the IEEE, vol. 107, no. 8, pp. 1563-1583, Aug. 2019, doi : 10.1109/JPROC.2019.2925526.