People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Ferhat Abbas University Setif 1
Faculty of Sciences
Department of Computer Science



Theme:

Design and evaluation of an Energy-Aware scheduling plugin for Kubernetes clusters

---

Presented by:

Boubegra Lydia & Zermani Chaima

As a requirement to obtain the degree of Master in Networks and Distributed Systems

Jury Composition

Name	Grade	Role
Dr.BETTAYEB Sami	Associate Professor	Supervisor
Dr.AISSAOUI Mohammed	MCB at UFAS1	President
Dr.KANFOUD Mohamed Raouf	MCB at UFAS1	Examiner

Academic Year: 2025/2026

Abstract

The rapid proliferation of cloud-native orchestration via Kubernetes has led to significant escalations in data center energy consumption and carbon footprints. While traditional scheduling frameworks prioritize resource utilization, they often neglect the environmental impact of workload distribution. This dissertation proposes **CARMEN**, a novel energy-aware scheduling plugin for **Kubernetes** (K3s) that integrates carbon-aware computing principles into the orchestration layer. CARMEN implements a simple, deterministic ARM-priority rule that systematically places pods on ARM nodes (8W) over x86 nodes (35W), using real-time metrics from the **Kubernetes Metrics Server**.

The CARMEN framework consists of five components: an external scheduler for ARM-first placement, a proactive rescheduler that migrates pods when energy gain exceeds 15%, a failure descheduler that automatically detects node failures and recovers affected pods within 5 seconds, a real-time Streamlit dashboard, and the Kubernetes Metrics Server.

Evaluated through **30 consecutive tests** on a **simulated 3-node heterogeneous cluster** (one ARM worker, one x86 worker, one x86 master), CARMEN achieves a **mean energy gain of 38.86%** compared to random placement, reducing power consumption from 35.96W to 22.00W, with gains ranging from 32.93% to 49.54% and perfect reproducibility (zero variance). Carbon emissions are reduced by the same percentage using the IPCC global average factor of 475 gCO_2/kWh.

Our findings demonstrate that CARMEN effectively balances operational performance with ecological sustainability, providing a scalable framework for green cloud-native computing.

Keywords: Kubernetes, energy-aware scheduling, carbon-aware computing, ARMpriority, deterministic scheduler, K3s, green computing.

Résumé

La prolifération rapide de l'orchestration cloud-native via Kubernetes a entraîné une augmentation considérable de la consommation énergétique et de l'empreinte carbone des centres de données. Alors que les mécanismes d'ordonnancement traditionnels privilégient l'optimisation des ressources, ils négligent souvent l'impact environnemental lié à la répartition des charges de travail. Ce mémoire propose **CARMEN**, une extension logicielle pour l'ordonnancement énergétique dans **Kubernetes** (K3s), intégrant les principes de l'informatique sensible au carbone au sein de la couche d'orchestration. CARMEN met en œuvre une règle simple et déterministe donnant la priorité aux nœuds ARM (8W) plutôt qu'aux nœuds x86 (35W), en s'appuyant sur des métriques temps réel fournies par le **Metrics Server** de Kubernetes.

L'architecture de CARMEN repose sur cinq composants principaux : un ordonnanceur externe pour le placement prioritaire sur ARM, un réordonnanceur proactif qui déclenche une migration des pods lorsque le gain énergétique dépasse 15%, un mécanisme de tolérance aux pannes qui détecte automatiquement les défaillances des nœuds et restaure les pods affectés en moins de 5 secondes, un tableau de bord interactif développé avec Streamlit, ainsi que le Metrics Server de Kubernetes.

Évalué à travers **30 tests consécutifs** sur un **cluster hétérogène simulé de 3 nœuds** (un worker ARM, un worker x86 et un master x86), CARMEN atteint un **gain énergétique moyen de 38,86%** par rapport à un placement aléatoire. La consommation moyenne est ainsi réduite de 35,96W à 22,00W, avec des gains individuels variant entre 32,93% et 49,54%, et une reproductibilité parfaite (variance nulle). Les émissions de carbone sont réduites dans les mêmes proportions, en utilisant le facteur moyen global recommandé par le GIEC, soit 475 gCO_2/kWh.

Nos résultats démontrent que CARMEN parvient à concilier performances opérationnelles et durabilité écologique, offrant ainsi une solution légère, reproductible et évolutive pour un cloud computing plus vert.

Mots-clés : Kubernetes, ordonnancement énergétique, informatique sensible au carbone, priorité ARM, ordonnancement déterministe, K3s, informatique verte.

ملخص

أدى التوسع السريع في استخدام أنظمة التنسيق السحابية، ولا سيما نظام كوبرنيتس، إلى ارتفاع ملحوظ في استهلاك الطاقة وانبعاثات الكربون بمراكز البيانات. ورغم أن آليات الجدولة التقليدية تركّز على تحسين استغلال الموارد، فإنها غالباً ما تهمل البعد البيئي المرتبط بتوزيع أحمال العمل. يقدّم هذا البحث نظام CARMEN، وهو مكمّل برمجي مبتكر لجدولة المهام داخل Kubernetes (نسخة K3s)، يدمج مبادئ الحوسبة المراعية للكربون في طبقة التنسيق. يعتمد CARMEN على قاعدة بسيطة وحتمية تمنح الأولوية المطلقة للعقد المزودة بمعمارية ARM (قدرتها 8 واط) على حساب العقد ذات المعمارية x86 (قدرتها 35 واط)، مستعيناً بمقاييس فورية يجمعها خادم المقاييس الخاص بكوبرنيتس.

تتألف بنية CARMEN من خمسة مكونات أساسية: جدول خارجي يطبّق أولوية ARM في وضع المهام، وجدول استباقي يعيد ترتيب المهام كل 30 ثانية ولا ينقلها إلا إذا تجاوز الربح الطاقي نسبة 15٪، وجدول لمعالجة الأعطال يكتشف تلقائياً تعطل العقد ويعيد استعادة المهام المتضررة في أقل من 5 ثوانٍ، بالإضافة إلى لوحة تحكم تفاعلية (Streamlit) تعرض المقاييس بشكل لحظي، وخادم المقاييس نفسه.

خضع الحل للتقييم عبر 30 اختباراً متتالياً على مجموعة محاكاة غير متجانسة مؤلفة من 3 عقد (عامل ARM، وعامل x86، وعقدة رئيسية x86). يحقق CARMEN ربحاً طاقياً وسطياً مقداره نسبة 38.86 بالمئة مقارنة بالتوزيع العشوائي، إذ ينخفض متوسط الاستهلاك الكهربائي من 35.96 واط إلى 22.00 واط، وتتراوح نسب الربح بين 32.93 بالمئة و49.54 بالمئة، مع إمكانية تكرار كاملة للنتائج (تباين معدوم). كما تنخفض انبعاثات الكربون بالنسبة نفسها، بالاعتماد على عامل الكثافة الكربونية الوسطي العالمي الذي أوصت به الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC) والقدره 475 غرام CO_2/كيلوواط/ساعي.

تؤكد نتائجنا أن CARMEN يوفق بين الأداء التشغيلي والاستدامة البيئية، مقدماً إطاراً خفيف الوزن، قابلًا للتكرار، وقابلاً للتوسع، يُساهم في بناء حوسبة سحابية أكثر خضرة.

الكلمات المفتاحية: كوبرنيتس، جدولة مراعية للطاقة، حوسبة مراعية للكربون، أولوية ARM، جدولة حتمية، K3s، حوسبة خضراء.

Contents

Abstract i

Résumé ii

ملخص iii

Acknowledgments IV

Dedication v

Dedication VI

Table of Contents vii

List of Figures xii

List of Tables xiii

List of Abbreviations xiv

General Introduction 1

1 Related work 2

1.1 Introduction 2

1.2 Kubernetes scheduling mechanisms 2

1.2.1 Kubernetes Architecture Overview 2

1.2.2 Core Concepts: Pod, Node, and Cluster 3

1.2.3 Kubernetes Scheduler Framework and Workflow 4

1.2.4 Advanced Placement Constraints 5

1.2.5 Scheduler Extensibility and Plugins 5

1.2.6 Limitations of the Default Kubernetes Scheduler 6

1.3 State of the art 7

1.3.1 Energy-Aware Scheduling in Cloud and Kubernetes Systems.... 7

1.3.2 Carbon-Aware Scheduling and Green Cloud Computing 8

1.3.3 Multi-Energy and Multi-Objective Optimization Approaches . . . 9

1.3.4 Surveys and Taxonomies 10
1.4 Synthesis and problem statement 10
1.4.1 Comparative Analysis 10
1.4.2 Identification of Limitations 11
1.4.3 Problem Statement 12
1.5 Positioning 12
1.6 Conclusion 13
2 CARMEN framework: modeling and design 14
2.1 Introduction 14
2.2 Multi-Criteria Mathematical Modeling 14
2.2.1 Energy Consumption Model 14
2.2.2 Carbon Intensity Model 16
2.2.3 Total Cluster Estimation 16
2.3 Functional Architecture 17
2.3.1 Architecture Overview 17
2.3.2 Data Flow Between Components 18
2.4 Algorithm Design 19
2.4.1 Dashboard Monitoring Algorithm 19
2.4.2 External Scheduler Algorithm 20
2.4.3 Descheduler Algorithm for Failure Handling 22
2.4.4 Rescheduler Algorithm for Energy Optimization 23
2.5 Complexity Analysis 25
2.5.1 Time Complexity 25
2.5.2 Space Complexity 26
2.5.3 Summary 26
2.6 Conclusion 27

3 Implementation and experimental validation 28
3.1 Introduction 28
3.2 Implementation Details 28
3.2.1 Hardware and Software Stack 28
3.2.1.1 Host Machine Specifications……29
3.2.1.2 Simulated Heterogeneous Architecture ……...29
3.2.1.3 Software Stack Components…….30
3.2.1.4 Resource Allocation 30
3.2.2 Monitoring and Metrics Collection . . . . . ……..31
3.2.2.1 Metrics Server Installation: . . . . . ……...31
3.2.2.2 Node Metrics Retrieval: . . . . . ……..32
3.2.2.3 Container Status Verification 33
3.2.2.4 Docker Desktop Resource Monitoring ……..34
3.2.2.5 Docker-based Cluster Simulation . . . ……35
3.2.2.6 Real-time Metrics Flow 35
3.2.3 External Scheduler Architecture . . . . . ……...35
3.2.4 Failure Descheduler Implementation . . . . . ……36
3.2.5 Proactive Rescheduler Implementation . . ……37
3.2.6 Monitoring Dashboard 38
3.3 Experimental Protocol . . . . . ……...43
3.3.1 Baseline Selection 43
3.3.2 Workload Generation . . . . . ……...44
3.3.3 Test Scenarios and Procedure . . . . . ……44
3.3.4 Test Environment . . . . . ……...46
3.3.5 Evaluation Metrics . . . . . ……47
3.3.5.1 Energy Consumption . . . . . ……...47

3.3.5.2 Carbon Emissions 47
3.3.5.3 Energy Gain . . . . . ……...48
3.3.5.4 Statistical Metrics . . . . . ……48
3.4 Results and Comparative Analysis . . . . . ……48
3.4.1 Energy Consumption Comparison . . . . . ……48
3.4.2 Energy Gain Analysis . . . . . ……49
3.4.3 Statistical Analysis . . . . . ……49
3.4.4 CARMEN Consumption Variance . . . . ……50
3.4.5 Summary of Results . . . . . ……51
3.4.6 Comparative Analysis . . . . . ……51
3.5 Discussion and Limitations . . . . . ……...52
3.5.1 Advantages of CARMEN Compared to Existing Approaches . . 52
3.5.1.1 Perfect Reproducibility: . . . . . ……53
3.5.1.2 Combined Energy and Carbon Awareness……53
3.5.1.3 Proactive Rescheduling: . . . . . ……53
3.5.1.4 Automatic Failure Handling: . . . . . ……...53
3.5.1.5 Real-time Dashboard: . . . . . ……..53
3.5.1.6 Deterministic and Lightweight: . . ……53
3.5.2 Limitations of CARMEN . . . . . ……54
3.5.3 Future Work . . . . . ……...54
3.6 Conclusion . . . . . …….. 55
General Conclusion **56**
Bibliography **57**