

Appel à projets Digiteo-DigiCosme 2014

Description détaillée d'une action « allocation doctorale »

Acronyme (10 caractères maximum) : **E-CloViS**

Titre du projet : **Energy-aware resource allocation for Cloud Virtual Services**

Préciser ici si vous candidatez sur l'appel Digiteo, sur l'appel DigiCosme ou sur les deux :
les deux, Digiteo et DigiCosme

Thématique du projet :

Si vous candidatez que l'appel Digiteo préciser obligatoirement la rubrique du programme scientifique de Digiteo dont le projet relève principalement.

Si vous candidatez sur l'appel DigiCosme préciser obligatoirement l'axe de recherche : SciLex, ComEx ou DataSense.

Selon le programme scientifique Digiteo : **Future Networks, Optimisation**

L'axe de recherche DigiCosme : **ComEx**.

Nom du responsable du projet : **Joanna Tomasik, E3S, Supélec**

Joanna Tomasik a obtenu en 1988 et 1989 les diplômes de magistère de mathématiques appliquées et d'informatique à l'Université de Technologie à Gliwice, en Pologne. En 1998 elle a obtenu le titre de docteur en informatique à la même université. En janvier 2012 elle a soutenu son HDR à l'Université Paris Sud.

Joanna Tomasik a commencé à travailler en tant que chercheur à l'Institut d'Informatique Théorique et Appliquée de l'Académie des Sciences de Pologne à Gliwice en 1988. Depuis septembre 2002, elle est professeur à Supélec (L'Ecole Supérieure d'Electricité) dans le Département Informatique.

Ses domaines de recherche principaux concernent l'évaluation de performances de systèmes informatiques, particulièrement des réseaux de télécommunication. Elle se consacre aussi à l'algorithmique et l'évaluation de performances notamment pour la qualité de service dans le réseau inter-domaine, des réseaux tout-optiques, ad hoc et Private Mobile Radio (PMR). Elle propose des méthodes de validation des solutions approchées et heuristiques de problèmes NP-complets et NP-difficiles. Elle participait aux projets du Pôle de Compétitivité SYSTEMATIC (CARRIOCAS, RAF). Elle est responsable de la part de Supélec du projet SOAPS.2 (Pôle SYSTEMATIC 2011-2014). Elle a encadré une thèse du projet DOROthéE (2009-2012) financé par la région l'Ile de France dans le cadre du programme Digiteo-DIM.

Encadrement de thèses (trois thèses terminées, une en cours, au cours des cinq dernières années)

Joanna TOMASIK a encadré **trois** thèses de doctorat :

- **David POULAIN : Dimensionnement des réseaux optiques transparents à faible consommation d'énergie**, projet DOROthéE financé par la région l'Ile de France (Digiteo-DIM), début le 1er septembre 2009, retour des rapports en janvier 2013, soutenance le 10 avril 2013 ; taux d'encadrement 90% directeur de thèse : Dominique Barth, PRiSM, UVSQ ;
D. Poulain travaille comme chercheur depuis septembre 2013 chez Amarile, un éditeur de logiciels pour les ingénieurs pétroliers.
- **Stéphane POMPORTES : Mobilité et gestion de fréquences dans un réseau ad hoc à forte efficacité**, thèse faite dans le cadre du Pôle de Compétitivité SYSTEMATIC, projet RAF, début le 1er octobre 2008, soutenance le 12 décembre 2011 ; taux d'encadrement 50%, directeur de thèse : Véronique Vèque, LSS et IEF, Paris XI ;
S. Pomportes travaille depuis septembre 2012 comme enseignant-chercheur à ESIEE à Amiens.
- **Vincent REINHARD : Méthodes d'introduction de QoS dans un réseau optique à capacité surmultipliée**, thèse faite dans le cadre du Pôle de Compétitivité SYSTEMATIC, projet CARRIOCAS, début le 1er novembre 2006, soutenance le 25 juin 2012 ; taux d'encadrement 80%, directeur de thèse : Dominique Barth, PRiSM, UVSQ ;
V. Reinhard travaille comme ingénieur de recherche en CDD au PRiSM, UVSQ depuis décembre 2012.

Joanna TOMASIK encadre actuellement **une** thèse de doctorat :

- **Fan HUANG : Stratégies distribuées d'allocation des Resource Blocks dans un réseau OFDMA pour garantir un niveau de service donné**, thèse faite dans le cadre du Pôle de Compétitivité SYSTEMATIC, projet SOAPS, début le 1er octobre 2012, soutenance prévue en octobre 2015 ; directeur de thèse : Véronique Vèque, LSS et IEF, Paris XI ;

LISTE DES PUBLICATIONS DEPUIS 2010 :

- [1] A. Lamiable, J. Tomasik, Validation of spectrum management schemes for PMR networks based on LTE with interference detection, IFIP Wireless Days 2013, Valence, Espagne, novembre 2013,
- [2] A. Lamiable, J. Tomasik, Spatial Frequency Reuse in a Novel Generation of PMR Networks, IEEE WCNC, Shanghai, Chine, avril 2013,
- [3] D. Poulain, J. Tomasik, M.-A. Weisser, D. Barth, A packing problem approach to lightpath assignment in an optical ring, accepté par The Computer Journal, Oxford University Press, publication en 2013,
- [4] O. Boussaton, J. Cohen, J. Tomasik, D. Barth, On the distributed learning of Nash equilibria with minimal information, NetGCooP, Avignon, France, novembre 2012,
- [5] D. Poulain, J. Tomasik, M.-A. Weisser, D. Barth, Minimization of the receiver cost in an all-optical ring with a limited number of wavelengths, ISCIS, Paris, France, octobre 2012,
- [6] J. Tomasik, M.-A. Weisser, The inter-domain hierarchy in measured and randomly generated AS-level topologies, IEEE ICC, Ottawa, Canada, juin 2012
- [7] V. Reinhard, J. Cohen, J. Tomasik, D. Barth, M.-A. Weisser, Optimal configuration of an optical network providing predefined multicast transmissions, Computer Networks, vol. 56, no. 8, Elsevier, pages 2097-2106, 2012,
- [7] S. Pomportes, J. Tomasik, A. Busson, V. Vèque, Resource Allocation in Ad Hoc Networks with Two-Hop Interference Resolution, IEEE GLOBECOM, Houston, TX, USA, décembre 2011,
- [8] V. Reinhard, J. Cohen, J. Tomasik, D. Barth, M.-A. Weisser, Performance improvement of an optical network providing services based on multicast, ISCIS, Londres, UK, septembre 2011,
- [9] D. Poulain, J. Tomasik, M.-A. Weisser, D. Barth, Optimal receiver cost and wavelength number minimization in all-optical ring networks, ConTEL, Graz, Autriche, juin 2011,
- [10] J. Tomasik, M.-A. Weisser, Internet topology on AS-level: model, generation methods and tool, IEEE IPCCC, Albuquerque, NM, USA, décembre 2010,
- [11] J. Tomasik, M.-A. Weisser, aSHIIP: autonomous generator of random Internet-like topologies with inter-domain hierarchy, IEEE MASCOTS, Miami Beach, FL, USA, août 2010,
- [12] S. Pomportes, A. Busson, J. Tomasik, V. Vèque, Self-stabilizing algorithm of two-hop conflict resolution, SSS, LNCS 6366, Springer, New York, NY, USA, septembre 2010.

L'avis daté et signé du directeur du laboratoire E3S, Supélec est joint.

Pour chaque partenaire, préciser le nom du laboratoire et d'une personne impliquée.

Partenaires du projet : Johanne Cohen, LRI, Université Paris Sud.

Laboratoire LRI, Université Paris Sud : Le Laboratoire de Recherche en Informatique (LRI) est une unité mixte de recherche (UMR8623) de l'Université Paris-Sud et du CNRS. Pour le CNRS, il est rattaché à l'INS2I (sections 06 principale et 07 secondaire). Créé il y a plus de 35 ans, il accueille plus de 240 personnes dont environ 110 permanents et 90 doctorants, organisés en huit équipes de recherche, une équipe administrative et une équipe technique. Six des équipes de recherche sont tout ou partie communes avec Inria Saclay - Île-de-France qui est ainsi le partenaire privilégié du laboratoire.

Le LRI fait partie de DIGITEO, l'un des douze réseaux thématiques de recherche avancée créé par le gouvernement en 2007 et le seul en sciences et technologies de l'information et de la communication (STIC). Digiteo rassemble sur le Plateau de Saclay 2600 scientifiques de 23 laboratoires de six grands organismes et établissements fondateurs (CNRS, CEA, Inria, Université Paris-Sud, Ecole Polytechnique, Supélec) auxquels se sont ajoutés six membres associés (Ecole Centrale Paris, ENS Cachan, Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines, Institut Mines-Télécom, Mines ParisTech, ENSTA ParisTech). Le LRI est également

partenaire de System@tic Paris-Région, pôle de compétitivité d'envergure mondiale dans le domaine des logiciels et systèmes complexes.

Les thèmes de recherche du laboratoire couvrent un large spectre de l'informatique à dominante logicielle et incluent à la fois des aspects fondamentaux et des aspects appliqués : algorithmique, combinatoire, graphes, optimisation discrète et continue, programmation, génie logiciel, vérification et preuves, parallélisme, calcul à haute performance, grilles, architecture et compilation, réseaux, bases de données, représentation et traitement des connaissances, apprentissage, fouille de données, bio-informatique, interaction homme-machine, etc. Cette diversité est l'une des forces du laboratoire car elle favorise les recherches aux frontières, là où le potentiel d'innovation est le plus grand.

L'équipe de recherche GALAC « Algorithmes, Graphes et Combinatoire » du laboratoire LRI est centrée sur trois axes de recherches : la combinatoire, la théorie des graphes, et la conception d'algorithmes pour les réseaux et les systèmes distribués. Cette équipe a pour objectif de développer des outils pour concevoir des algorithmes efficaces (en appliquant des techniques issues de la combinatoire, de la théorie des graphes, de l'algorithme centralisé ou distribué).

Johanne Cohen, LRI, a soutenu sa thèse à l'université Paris-Sud en décembre 1998, puis elle a obtenu une habilitation à diriger les recherches en décembre 2009 à l'université de Versailles Saint-Quentin. Elle a été maître de conférences à l'Université de Nancy en 2000, puis chargée de recherche au LORIA de 2002-2008, au PRiSM de 2008-2013. Actuellement, elle est membre du laboratoire LRI et membre de l'équipe Graphes, Algorithmes et Combinatoire (GALAC). Son domaine de recherche concerne l'algorithmique, l'approximation, l'optimisation et la théorie algorithmique des jeux. Elle applique des méthodes liées à l'algorithmique dans les domaines de la bio-informatique (prédiction de la structure 3D de l'ARN), et des réseaux de télécommunication (calcul distribué de situation stable, optimisation de ressources). Elle a participé à plusieurs projets nationaux et européens (FP7, CELTIC, ANR). Actuellement, elle participe au projet DIGITEO JAPARIN 3D (correspondant la prédiction 3D de la structure de ARN). Elle est auteur environ de 20 articles dans les revues internationales et 40 articles dans des conférences ou workshops internationaux.

Encadrement de thèses (deux thèses terminées, deux en cours, au cours des cinq dernières années)

Johanne COHEN a encadré **deux** thèses de doctorat :

- **Octave Bousaton : Algorithmique de routage dans les réseaux à l'aide de la théorie des jeux, recherche d'équilibres**, thèse soutenue en février 2010 ;
O. Bousaton travaille depuis janvier 2013 en Suisse comme ingénieur.
- **Mariem Krichen : Algorithmique de gestion des ressources pour les FEMTOS**. Thèse faite dans le cadre du projet européen CELTIC AWARE, début le 1er janvier 2010, soutenance le 14 février 2014.
Mariem Krichen est actuellement ATER à l'université Paris X.

Johanne COHEN encadre actuellement **deux** thèses de doctorat :

- **Mélanie Boudard : Modèles de jeu et apprentissage stochastique pour la prédiction de la structure tridimensionnelle de grandes molécules d'ARN**. Thèse faite dans le cadre du projet DIGITEO 3D-Japarin, début le 1er septembre 2012, date prévue de soutenance fin 2015, taux d'encadrement 40% avec A. Denise et D. Barth,
- **Lise Rodier : Apprentissage d'équilibre de Nash dans les réseaux informatiques**. Thèse faite dans les contrats doctorants de l'Université de Versailles, début le 1er septembre 2012, date prévue de soutenance fin 2015, taux d'encadrement 60% avec D. Auger et J.-M. Fourneau.

LISTE DES PUBLICATIONS DEPUIS 2010 :

- [1] A. Adouane, L. Rodier, K. Khawam, J. Cohen, and S. Tohmé. Game theoretic framework for inter-cell interference coordination. IEEE WCNC, 2014.
- [2] D. Auger, J. Cohen, P. Couchney, and L. Rodier. Distributed selfish algorithms for the max-cut game. ISCIS, LNEE 264, Springer 2013.
- [3] M. Lamine Lamali, H. Pouyllau, J. Cohen, A. Bouillard, and D. Barth. Risk-aware SLA negotiation, VALUETOOLS, 2013.

- [4] K. Khawam, J. Cohen, P. Muhlethaler, S. Lahoucr, S. Tohme. AP association in a IEEE 802.11 WLAN. IEE PIMRC 2013.
- [5] Lise Rodier, Johanne Cohen, Hélia Pouyllau, and David Auger. SLA learning from past failures, a multi-armed bandit approach. ICQT, 2013.
- [6] O. Bournez, J. Chalopin, J. Cohen, X. Koeger, and M. Rabie. Population protocols that correspond to symmetric games. International Journal of Unconventional Computing, 2013
- [7] F. Ait Salaht, H. Castel, J. Cohen, J.-M. Fourneau, and Nihal Pekergin. Accuracy vs. complexity: the stochastic bound approach. WODES, 2012.
- [8] V. Boudet, J. Cohen, R. Giroudeau, and J.-C. König. Complexity results for scheduling problem with non trivial topology of processors. RAIRO- Operations Research, 46 :1–22, 2012.
- [9] O. Bournez and J. Cohen. Learning equilibria in games by stochastic distributed algorithms. ISCIS, 2012.
- [10] O. Boussaton, J. Cohen, J. Tomasik, and D. Barth. On the distributed learning of Nash equilibria with minimal information. IEEE NetGCooP, 2012.
- [11] J. Cohen, C. Dürr, and T. T. Nguyen. Smooth inequalities and equilibrium inefficiency in scheduling games. WINE 2012, LNCS 7695, Springer, 2012.
- [12] K. Khawam, J. Cohen, D. Marinca, S. Tohmé. Elastic game based radio resource management. In Proceedings of the 75th IEEE Vehicular Technology Conference, IEER VTC Spring, 2012.
- [13] K. Khawam, J. Cohen, D. Marinca, and S. Tohmé. Semi-distributed radio resource management for elastic traffic in a hybrid network. IEEE WCNC, 2012.
- [14] M. L. Lamali, D. Barth, and J. Cohen. Reputation-aware learning for SLA negotiation. Networking Workshops, LNCS 7291, Springer, 2012.
- [15] V. Reinhard, J. Cohen, J. Tomasik, D. Barth, and M.-A. Weisser. Optimal configuration of an optical network providing predefined multicast transmissions. Computer Networks, 56(8) :2097–2106, 2012.
- [16] D. Barth, J. Cohen, L. Echabbi, and H. Le Cadre. Coalition stability under QoS based-market segmentation. GAMENETS'11, volume 75 of Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, 2012.
- [17] D. Barth, J. Cohen, and M. Krichen. File transfer application for sharing femto access, ISCIS, Springer, 2011.
- [18] D. Barth, J. Cohen, and M. Krichen. File transfer application for sharing femto access. VALUETOOLS, 2011.
- [19] D. Barth, J. Cohen, P. Maillé, and Hélia Pouyllau. Competition among online-gaming service providers. IEEE NetGCooP, 2011..
- [20] O. Bournez, J. Chalopin, J. Cohen, Xavier Koeger, and M. Rabie. Asymmetric pavlovian populations, OPODIS 11, LNCS 7109, Springer, 2011.
- [21] J. Cohen, D. Cordeiro, D. Trystram, and F. Wagner. Coordination mechanisms for selfish multi-organization scheduling. IEEE HiPC, 2011.
- [22] J. Cohen, D. Cordeiro, D. Trystram, and F. Wagner. Multi-organization scheduling approximation algorithms. Concurrency and Computation : Practice and Experience, 23(17) :2220–2234, 2011.
- [23] J. Cohen, C. Dürr, and N. K. Thang. Non-clairvoyant scheduling games. Theory of Computing Systems, 49(1) :3–23, 2011.
- [24] K. Khawam, M. Ibrahim, J. Cohen, S. Lahoud, and S.Tohmé. Individual vs. global radio resource management in a hybrid broadband network. IEEE ICC, 2011.
- [25] P. Reichl, I. Gojmerac, D. Barth, M. Krichen, J. Cohen, and O. Marcé. Techno-economics of small cell networks : The AWARE project. IEEE NetGCooP, 2011.
- [26] J. Tomasik, V. Reinhard, J. Cohen, D. Barth, and M.- A. Weisser. Performance improvement of an optical network providing services based on multicast, ISCIS, Springer, 2011.
- [27] J. Cohen, D. Cordeiro, D. Trystram, and F. Wagner. Analysis of multi-organization scheduling algorithms. Euro-Par, LNCS 6272, Springer, 2010.

L'avis daté et signé du directeur du LRI, Université Paris Sud est joint

Laboratoire E3S, Supélec

Laboratoire E3S, Supélec, EA 4454 : Supélec, grande école d'ingénieurs française, est une référence dans le domaine des sciences de l'information, de l'énergie et des systèmes : informatiques, télécommunications, électroniques, traitement du signal, automatique, génie électrique. Toute la stratégie de recherche de Supélec vise à développer et à tirer le meilleur parti des synergies entre recherche industrielle et académique. Le

département informatique participe aux différentes missions de l'Ecole : formation continue, formation initiale et recherche. Supélec est membre fondateur de DIGITEO.

L'équipe de recherche E3S (Supélec Sciences des Systèmes) est transdisciplinaire. Étant au cœur d'une école d'ingénieurs, elle met l'accent sur les couplages entre les disciplines d'une part, entre les caractères académique et applicatif d'autre part. Ceux ont les Sciences des systèmes qui forment le lien entre les disciplines spécialisées, nécessaires à toute recherche de qualité, et développées dans les différentes composantes de l'équipe. E3S a ainsi un rôle de coordination scientifique, dans le but de profiter au mieux de la complémentarité des différentes recherches. Cette complémentarité est nécessaire pour répondre aux objectifs transverses (transport, santé, sécurité, production, environnement) qui sont ceux des ingénieurs de haut niveau.

L'équipe informatique d'E3S dispose de compétences en : modélisation de systèmes hétérogènes, méthodes d'évaluation de performances, modèles analytiques pour les réseaux optiques, algorithmique de graphes, classification et recherche d'information.

Curriculum vitae des membres de Supélec participants au projet

Le CV de **Joanna TOMASIK**, responsable du projet, sa liste des publications et la liste de ses doctorants, sont fournis plus haut, dans le paragraphe **Nom du responsable du projet**.

Arpad RIMMEL

Arpad Rimmel a soutenu une thèse en informatique à l'université de Paris Sud en 2009. Puis il a effectué 2 post-doctorats entre 2009 et 2011; le premier à l'université d'Alberta et le deuxième à l'université de Paris Dauphine. Après cela, il a travaillé un an dans l'entreprise AIRPX où il a effectué de la maintenance prédictive dans l'aéronautique. En 2012, il a rejoint le département informatique de Supélec en tant que professeur assistant.

Ses recherches portent sur la prise de décision dans un environnement incertain ainsi que sur l'optimisation. En particulier, il a travaillé sur l'exploration d'arbres à l'aide de l'algorithme Monte Carlo Tree Search. Cet algorithme a été appliqué à l'optimisation du temps de calcul pour la multiplication de matrices ainsi qu'à l'intelligence artificielle pour le jeu de Go. Il travaille également sur des problèmes de résolution de carrés latins à l'aide d'algorithmes génétiques.

LISTE DES PUBLICATIONS DEPUIS 2010 :

- [1] Rimmel A., Teytaud F., A Survey of Meta-Heuristics used for Computing Maximin Latin Hypercube, European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimisation, 2014.
- [2] Rimmel A., Teytaud F., Cazenave T. Optimization of the nested monte-carlo algorithm on the traveling salesman problem with time windows, Applications of Evolutionary Computation 2011.
- [3] Rimmel A., Teytaud F., Teytaud O. Biasing Monte-Carlo simulations through RAVE values, Computers and Games 2011.
- [4] Bourki A., Chaslot G., Coulm M., Danjean V., Doghmen H., Hoock J.B., Hérault T., Rimmel A., Teytaud F., Teytaud O, others. Scalability and parallelization of Monte-Carlo tree search, Computers and Games 2011.
- [5] Hoock J.B., Lee C.S., Rimmel A., Teytaud F., Wang M.H., Teytaud O. Intelligent agents for the game of Go. Computational Intelligence Magazine 2010.
- [6] Lee C.S., Rimmel A., Teytaud O., Tsai S.R., Wang M.H., Yen S.J. Current frontiers in computer Go. Transactions on Computational Intelligence and AI in Games, 2010.
- [7] Rimmel A., Teytaud F. Multiple overlapping tiles for contextual monte carlo tree search, Applications of Evolutionary Computation 2010.
- [8] Chaslot G., Fiter C., Hoock J.B., Rimmel A., Teytaud O. Adding expert knowledge and exploration in Monte-Carlo Tree Search, Advances in Computer Games 2010.

École doctorale de rattachement : L'École Doctorale "Sciences et Technologies de l'Information, des Télécommunications et des Systèmes" (ED STITS)

Nom du responsable de l'ED : Véronique VEQUE

Numéro de téléphone du responsable de l'ED : 01.69.15.40.53

Adresse électronique du responsable de l'ED : direction.ed-stits@u-psud.fr

L'avis motivé, daté et signé du responsable de l'école doctorale est joint.

Expertise :

Fournir ci-dessous les coordonnées (adresse postale, téléphone, mél et page web) d'au moins quatre référents hors Digiteo-DigiCosme compétents pour évaluer le projet dont au moins deux hors Île-de-France (français ou étrangers, n'ayant pas publié ou collaboré récemment avec les proposant(s)).

- **Eвриpidis Bampis**
LIP6, Université Pierre et Marie Curie, Case 169, 4 Place Jussieu, 75005 Paris
tél. : 01.44.27.48.08
e-mail : Evripidis.Bampis@lip6.fr
<http://www-desir.lip6.fr/~bampise/>
- **Jean-Marc Nicod**
FEMTO-ST/DISC UFR ST, 16 route de Gray, 25030 Besançon cedex
tél. : 03.81.66.20.68
e-mail : jean-marc.nicod@lifc.univ-fcomte.fr
http://lifc.univ-fcomte.fr/page_personnelle/accueil/45
- **Ralf Klasing**
LaBRI, Université Bordeaux 1, 351 cours de la Libération, 33405 Talence cedex
tél. : 05.40.00.35.24
e-mail : klasing@labri.fr
<http://www.labri.fr/perso/klasing/>
- **Yves Robert**
Laboratoire de l'Informatique du Parallélisme, ENS Lyon, 46 allée d'Italie, 69364 Lyon cedex 07
tél. : 04.72.72.85.86
e-mail : Yves.Robert@ens-lyon.fr
<http://graal.ens-lyon.fr/~yrobert/>

Description des travaux :

Résumé (10 lignes maximum) : Dans ce projet nous nous intéresserons à la distribution des demandes dans un réseau fournissant des services virtuels de calculs ayant comme but principal la minimisation de la consommation énergétique au niveau global en respectant les SLAs (*Service Level Agreements*) des utilisateurs concernant à la fois le service de connectivité et la puissance de calculs. Nous souhaitons proposer des solutions permettant la planification de l'exécution des demandes en termes du choix de centres de calculs tout en prenant en compte des contraintes des réseaux.

Sujet de la thèse (3 lignes maximum) : Allocation de ressources pour des services virtuels pour Cloud Computing du point de vue de la consommation d'énergie électrique dans des centres de calculs.

Encadrants de thèse :

Johanne COHEN, CR CNRS, HDR ; Joanna TOMASIK, professeur à Supélec, HDR

Laboratoire d'accueil : E3S Supélec

Le CV de **Johanne COHEN** est fourni plus haut, dans le paragraphe **Partenaires du projet correspondant au partenaire Université Paris Sud**.

Le CV de **Joanna TOMASIK**, responsable du projet, sa liste des publications et la liste de ses doctorants, sont fournis plus haut, dans le paragraphe **Nom du responsable du projet**.

Doctorant :

Y a-t-il un candidat connu ? **oui**

Alexandre DAMBREVILLE (étudiant de M2 Recherche M2R NSI de l'université Paris Sud)

Le CV du candidat et ses notes sont joints.

Description détaillée :

Le projet vise la conception des solutions pour la minimisation de consommation d'énergie électrique par des services virtuels basés sur le principe Cloud Computing.

Les modèles informatiques et les outils utilisés pour partager les ressources ont évolué. Ce principe est appelé le *Cloud Computing*. Le NIST (*National Institute of Standards and Technology*) [MG09] définit le *Cloud Computing* comme : "(...) a model for enabling convenient, on-demand network access to a shared pool of configurable computing resources that can be rapidly provisioned and released with minimal management effort or service provider interaction". Le Cloud Computing permet de combiner les ressources de différents organismes. Une ressource peut être dynamiquement acquise comme un service et les clients ne sont facturés que pour le temps qu'ils utilisent le service. Les fournisseurs du Cloud offrent leurs services sur la base de trois modèles: l'infrastructure en tant que service (IaaS), plate-forme en tant que service (PaaS), et le logiciel en tant que service (SaaS). En outre, les fournisseurs de services et les clients doivent négocier un accord (SLA) qui leur permet de s'entendre de façon contractuelle sur la qualité de service (QoS).

La réalisation d'un service virtuel consiste à orchestrer des services de stockage, de calculs et de connectivité. Cette concertation se fait sur le plan de la disponibilité de ressources (le volume d'espace de stockage demandé, la puissance de calculs demandée, la disponibilité de la bande passante) et sur le plan temporel (l'ordre d'exécution des tâches, le délai de transmission de données, la réalisation d'un service avant une date butoir).

En résumé, le Cloud Computing permet de mutualiser des ressources du réseau. Cependant, des problèmes liés à la mauvaise performance du réseau et à la surcharge induite par le système d'exploitation virtualisé soulèvent de nouveaux défis pour l'exécution des applications sur ce type de plates-formes informatiques [GM11]. Les problèmes ci-dessus peuvent être atténués si les ressources informatiques sont physiquement proches les uns des autres, ce qui conduit à la création des centres de calculs, composés de milliers de serveurs. Néanmoins, cette solution augmente considérablement les coûts liés à l'énergie. En 2012, il a été estimé [G12] que les centres de données à travers le monde consomment en électricité environ 30 GW (équivalent à la production de 30 centrales nucléaires). Les fournisseurs tentent de réduire en priorité la consommation d'énergie électrique plutôt que des serveurs [ML02]. Par exemple, Google est conscient de ce défi : *what matters most to the computer designers at Google is not speed but low power, because data centers can consume as much electricity as a city* [G12].

L'énergie est consommée dans les centres de stockage et de calculs, mais également dans des routeurs du réseau réalisant le service de connectivité et elle peut être considérée comme partie du coût du service. Le type d'une application détermine la proportion de coûts énergétiques dans les différents éléments d'infrastructure du *Cloud* car, comme cela a été démontré dans [BAHT11], à partir d'une certaine fréquence de transmissions des données (exemple de suite d'actions : des modifications dans un fichier, son envoi à des serveurs, récupération des résultats, répétée très souvent) le pourcentage de la consommation énergétique due aux routeurs dépasse considérablement celui dû au stockage et aux calculs. Néanmoins, le réseau de télécommunications doit respecter la QoS exprimée dans les contrats SLA des utilisateurs. Pour cette raison la consommation énergétique de l'infrastructure réseau est secondaire par rapport à la QoS requise par les transmissions.

Dans notre projet nous nous focaliserons sur l'utilisation des centres de calculs du point de vue de la consommation énergétique. Par conséquent, nous nous concentrerons sur des demandes massives de calculs qui influencent la dépense énergétique principalement dans les sites de calculs. Étant dans cette perspective, nous n'utiliserons pas la vision d'une demande «comme *workflow*» mais celle de quantité de calculs et la date butoir pour leur exécution.

Positionnement par rapport à l'état de l'art et à la concurrence nationale et internationale

Le développement des infrastructures du Cloud Computing est suffisamment avancé pour permettre de les analyser dans le but d'une meilleure utilisation de leurs ressources, y compris des ressources de réseaux. Cette approche émergente, *network-aware Cloud* [AL12, SGG12] consiste à minimiser le coût de services de connectivité, de calculs et de stockage en maximisant l'utilisation des centres de calculs/stockage tout en respectant la qualité de service (QoS) précisée dans des contrats d'utilisateurs. Par exemple, [SGG12] propose une approche pour allouer des ressources de calculs, de stockage et de réseau basée sur l'analyse à la volée de l'état du réseau obtenu grâce au monitoring. De plus, les aspects de diminution de la consommation énergétique deviennent importants à la fois pour baisser la facture énergétique des fournisseurs de services et pour minimiser l'impact sur l'environnement naturel. Pour l'instant, les travaux menés se concentrent principalement sur la minimisation du coût agrégé qui couvre aussi celui de l'énergie.

Dans le contexte d'alimentation du réseau de télécommunication, il existe des études [CSB08, MSB09] montrant que la dépense énergétique dans des routeurs de réseaux filaires ne dépend pas du volume de trafic les traversant. En revanche, comme cela est présenté dans [MSB09], la consommation d'énergie est une fonction croissante du nombre de ports actifs dans les routeurs. Cette observation a notamment engendré des études sur le problème de trouver un routage valide avec minimisation du nombre de liens utilisés pour acheminer le trafic [GMM10]. Cette approche peut néanmoins être critiquée pour sa difficulté de mise en œuvre en tenant compte des contraintes de la QoS strictes [BGD10]. À l'heure actuelle cette approche semble irréaliste à réaliser à cause de la consommation d'énergie importante en mode « veille » et du délai d'activation non négligeable. La même source bibliographique souligne que les réseaux dont le coût énergétique est élevé, mais qui peut être efficacement baissé, sont des réseaux d'accès radio.

L'autre facette étudiée concerne la consommation dans des centres de stockage et de calculs. Par exemple la réduction du coût d'une application astrophysique obtenue grâce à l'utilisation du stockage virtuel dans des Clouds, mais sans formalisation des problèmes sous-jacents a été présentée dans [YYL10]. L'article [SKZ08] présente l'idée de consolider des tâches de calculs sur des serveurs pour qu'une unité de calculs ait un coût énergétique plus faible. Dans cet article une solution proposée pour réaliser la consolidation est décrite intuitivement, sans offrir la formalisation mathématique du problème qu'elle est censée résoudre et sans donner d'évaluation solide de ses résultats.

Une autre source d'économies d'énergie électrique peut venir de la réduction de la consommation par la mise en mode « veille » de serveurs pendant des périodes de faible demande. Nous pouvons citer ici notamment :

- une approche par chaînes de Markov [YCN11],
- une approche par prédiction de la charge [VDS10],
- une approche par la théorie des files d'attente [MDD10,TSY12].

L'utilisation efficace des serveurs par ordonnancement permet de réduire le coût, en particulier le coût énergétique :

- une approche par distribution des machines virtuelles sur différents serveurs au sein d'un même centre de calculs [YLW10], cet article ne donne pas de définition formelle du problème, et se limite à proposer un algorithme de type « glouton » et évaluer sa performance,
- un essai d'approche formelle par modélisation du problème de la minimisation du coût global pour un seul workflow et sa solution par le biais d'un algorithme basé sur le principe PSO (*Particle Swarm Optimization*) [PWG10],

- une approche formelle bi-critère (deux modèles) [MMK01] et sa solution par algorithme génétique hybride.

Concepts, outils, défis et enjeux, pistes bibliographiques

Comme dit précédemment, nous nous intéressons à la distribution des demandes de calculs dans un réseau fournissant des services virtuels de calculs avec comme but principal la minimisation de la consommation énergétique au niveau global en respectant les SLAs (*Service Level Agreements*) des utilisateurs concernant la connectivité et la puissance de calcul. Nous souhaitons proposer des solutions permettant la planification de l'exécution des demandes en termes du choix des centres de calculs et des dates de lancement. Nous voulons assurer la quantité de calculs demandée avec minimisation de son coût énergétique en minimisant la quantité des ressources des réseaux de télécommunications.

Notre objectif est d'étudier la consommation de tous les centres et les serveurs de données connectés à un réseau donné. Nous allons proposer des algorithmes de placement des demandes qui est conditionné par

1. la disponibilité des ressources du réseau et la localisation des services ;
2. les besoins des utilisateurs (respect des SLAs) ;
3. la consommation d'énergie (totale ou locale) des serveurs.

Nous présentons les étapes planifiées du projet :

Le réseau est d'abord modélisé par un graphe non-orienté $G=(V,E)$ dont certains sommets C représentent des centres de calculs. Tout élément de l'ensemble C est valué par sa capacité de calculs disponible et le coût énergétique d'une unité de calculs.

Un travail concernant la distribution de la charge a récemment été effectué par les deux proposant dans [CHC14] : plusieurs algorithmes de placements des demandes ont été conçus. Les demandes de calculs ont été modélisées par un couple (*source de demande, volume de calculs*). Cette étude se situait aussi dans le contexte de demandes préemptives, et parallélisables et de la possibilité de migration des demandes (c'est-à-dire qu'une tâche peut être interrompue et qu'elle n'a pas besoin d'être effectuée sur un site unique ; par conséquent, elle peut être réalisée sur plusieurs serveurs de calculs). Les deux proposant ont étudié ce problème en le considérant comme une variante du *Bin Packing* [MT90, KP03, DOS07] et en mettant une limite sur le nombre de sites de calculs sur lesquels une demande peut être effectuée. Des sous-ensembles de centres de calculs ayant la capacité d'assurer la réalisation des demandes sont classés en fonction de leur consommation énergétique. Une fonction de coût d'énergie a été étudiée en considérant des coûts monotones dépendants de la puissance de calcul d'un serveur et de son état. Cette étude se plaçait en faisant abstraction de l'aspect temporaire.

Le travail de cette thèse sera de continuer ces travaux préliminaires en les enrichissant avec les aspects réseau et les aspects temporels.

Dans un premier temps, nous ajouterons une difficulté supplémentaire en considérant à la fois l'optimisation de ressources énergétiques et de la bande passante au niveau global (le paradigme du *network-aware Cloud* [SGG12]). Une demande de calculs est donc représentée comme (*source de demande, volume de calculs, volume de données à transmettre*). Il faut établir une connexion entre les émetteurs des demandes et les centres de calculs. Nous voulons proposer un placement des demandes et un arbre *multicast* assurant la connectivité des centres de calculs avec l'utilisation optimale de ressources du réseau. L'utilisation parcimonieuse des ressources du réseau se traduit dans ce contexte par la minimisation du nombre des liens constituant cette arborescence. La recherche d'un tel arbre peut être modélisée par le problème d'arbre de Steiner [DW71, GT73]. La

première approche pourrait donc concerner la caractérisation du front Pareto constitué des solutions des deux modèles.

Dans un deuxième temps, gardant le même modèle du réseau, nous proposerons la description d'une demande comme triplet (*source de demande, volume de calculs, date butoir*). Lors de cette étape nous incorporerons la notion de la qualité de service des utilisateurs de systèmes virtuels exprimée dans leurs SLAs (la date de terminaison de la demande). Dans le contexte de demandes préemptives en autorisant la migration, nous avons un degré de liberté de plus, car il nous faudra décider si, par exemple, il est plus avantageux d'effectuer une tâche dans deux centres de calculs rapides ou dans cinq centres plus lents, mais consommant peu d'énergie. Grâce à la connaissance de dates butoirs de demandes, nous proposerons une méthode d'ordonnancement de demandes qui, tout en respectant leurs exigences en termes de temps de calcul, permettra de minimiser la quantité d'énergie consommée au niveau global. Tout d'abord, nous considérons des centres de calculs avec des vitesses d'exécution fixes et ensuite nous considérons des centres de calculs avec des vitesses d'exécution variable en considérant le modèle d'énergies introduit dans [YDS95]. L'objectif est de combiner les résultats de [AI11, AA12, CHC14] et l'étape précédente en prenant en compte les contraintes de réseaux de télécommunications. Comme résultat de cette étape, nous attendons une planification de distribution de demandes en temps et en espace (centres de calculs).

Dans un troisième temps, nous envisagerons une demande composée de cinq éléments (*source de demande, volume de calculs, volume de données à transmettre, date de début, date butoir*). Ayant à notre disposition les retombées des étapes précédentes, nous serons en mesure de proposer « un agenda » de répartition spatio-temporelle de demandes, comme celui prévu à la fin de la deuxième étape, enrichi par le traitement beaucoup plus fin de la minimisation de la bande passante utilisée dans le réseau de télécommunications.

Pour toutes ces étapes précédentes, nous faisons l'hypothèse qu'il n'existe pas d'incertitude (panne de réseaux, mauvaise évaluation des demandes).

Naturellement, la quatrième étape de la thèse consistera à introduire le traitement d'incertitude au moment de l'élaboration d'ordonnancement. Nous envisagerons la modélisation de l'incertitude par des distributions probabilistes. Cette approche nous amènera ensuite à concevoir plusieurs métaheuristiques permettant de trouver un ordonnancement plus robuste. Nous pensons que des métaheuristiques évolutives, évaluant la qualité de possibles ordonnancements et choisissant le plus pertinent, seront les mieux adaptées.

Ces quatre étapes nous permettront de concevoir des algorithmes d'optimisations à trois critères liés à des ressources énergétiques, de réseau et de calculs. Nous précisons que le critère principal de l'optimisation est la consommation énergétique. Les deux autres critères seront traités comme contraintes que nous voulons amener proche de leur valeur optimale.

Résultats attendus, critères proposés pour juger du succès du projet

Le succès du projet sera bien sûr tout d'abord établi par la visibilité des résultats que nous obtiendrons au sein de la communauté internationale de recherche dans ce domaine (participation à des conférences, publications dans des journaux internationaux, collaborations établies), et par la validation expérimentale de nos méthodes.

L'un des critères de réussite du projet sera aussi sa capacité à susciter et intégrer des collaborations contractuelles futures au niveau national et européen.

Dans ce projet, nous voulons établir des modèles pour des problèmes théoriques de prise en compte de la disponibilité des ressources de réseau et de la dépense énergétique. Nous pouvons, en plus de la formalisation de ces problèmes et leur solution, apporter des méthodes de gestion pour les fournisseurs de connectivité et de services virtuels afin qu'ils puissent réduire le montant de leur

facture énergétique et améliorer leur bilan carbone. Il pourrait, selon les résultats, y avoir un dépôt de brevets concernant les méthodes heuristiques d'optimisation spécifiques développées.

Partenariat et travaux antérieurs des proposant

Les proposant, Johanne Cohen (LRI, Université Paris Sud) et Joanna Tomasik (E3S, Supélec) ont commencé le travail sur l'aspect énergétique du Cloud Computing en s'intéressant à la modélisation de la distribution de charge de calculs par une généralisation du problème *Bin Packing*. Le résultat de ce travail, disponible comme rapport technique sur arXiv:1403.0493, vient d'être soumis au numéro spécial Energy-Aware Resource Management and Scheduling (EARMS) du journal d'Elsevier Sustainable Computing: Informatics and Systems (SUSCOM) :

- Th. Carli, S. Henriot, J. Cohen, J. Tomasik: A packing problem approach to energy-aware load distribution in Clouds.

Ce travail a pu être réalisé grâce à la bourse Master 2, 2013-22 of PRES UniverSud Paris et un stage d'ingénieur d'un élève de spécialisation Informatique de Supélec.

Les proposant ont travaillé ensemble sur l'allocation de ressources de réseau pour des services virtuels dans le cadre du projet CARRIOCAS du Pôle de Compétitive SYSTEMATIC. Leurs travaux ont visé le dimensionnement d'un réseau optique maillé afin de minimiser la bande passante requise pour les transmissions *multicast* prévues par le cahier de charges. Les résultats de cette collaboration ont été publiés dans un journal international et une conférence internationale :

- V. Reinhard, J. Cohen, J. Tomasik, D. Barth, M.-A. Weisser, Optimal configuration of an optical network providing predefined multicast transmissions, *Computer Networks*, vol. 56, no. 8, Elsevier, pages 2097-2106, 2012,
- V. Reinhard, J. Cohen, J. Tomasik, D. Barth, M.-A. Weisser, Performance improvement of an optical network providing services based on multicast, *ISCIS (26th International Symposium on Computer and Information Sciences)*, Londres, UK, septembre 2011.

Les deux proposant s'intéressent aussi à des méthodes d'apprentissage stochastique distribuées et leurs applications pour trouver des solutions à des problèmes d'optimisation liés à l'allocation de ressources. Le premier résultat de leur travail, concernant l'apprentissage distribué basé sur le principe du schéma reward-inaction pour établir des routes optimales par rapport à la latence, a conduit à une publication dans une conférence internationale :

- O. Boussaton, J. Cohen, J. Tomasik, D. Barth, On the distributed learning of Nash equilibria with minimal information, *NetGCooP (6th International Conference on NETWORK Games, CONTROL and OPTimization)*, Avignon, France, novembre 2012.

Les deux proposant, J. Cohen et J. Tomasik, ont des compétences scientifiques complémentaires et ont l'habitude de collaborer depuis 2010, ce que la présentation des travaux antérieurs atteste. Cela garantit la cohérence du projet, un encadrement suivi du doctorant et, au final, le succès de sa réalisation.

Objectifs et intérêt pour Digiteo et/ou DigiCosme

Le projet E-CloViS fait intervenir deux partenaires, membres de Digiteo et DigiCosme dans l'axe ComEx de ce dernier. Nous avons identifié des acteurs potentiels au sein du consortium Digiteo et parmi les établissements de recherche installés sur le Plateau de Saclay.

Les problèmes d'équilibrage de charge ont des aspects économiques liés aux réseaux basés sur le principe Cloud visés par le projet E-CloViS et peuvent intéresser les chercheurs du CEA (membre fondateur de Digiteo), plus précisément de son Institut de Technico-Economie des Systèmes Énergétiques. La gestion de l'accès à des centres de calculs concerne le pôle TER@TEC auquel Digiteo est associé. La problématique d'approvisionnement des infrastructures de Cloud Computing

en énergie électrique intéresse EDF (R&D EDF va déménager sur le Plateau de Saclay) avec qui Supélec a des rapports privilégiés, notamment dans le cadre du laboratoire commun RISEGRID. J. Tomasik et A. Rimmel de Supélec collaborent d'une manière étroite avec le département MIRE, R&D EDF, sur l'aspect QoS. Enfin, l'aspect concernant l'utilisation de ressources de réseau, peut constituer une base de collaborations avec des industriels des télécommunications tels que Alcatel-Lucent, Bell-Labs avec qui les deux laboratoires ont eu occasion de travailler dans le cadre des nombreux projets.

Nous sommes aussi convaincus que les liens tissés entre les partenaires du projet E-CloViS ainsi que des contacts avec collaborateurs potentiels énumérés ci-dessous seront bénéfiques dans la perspective à plus long terme de la création de l'Université Paris Saclay.

Bibliographie/Bibliography:

- [A111] S. Albers: Algorithms for Dynamic Speed Scaling. Proc. of 28th International Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science (STACS'11), 1-11, 2011.
- [AA12] S. Albers and A. Antoniadis: Race to idle: new algorithms for speed scaling with a sleep state. Proc. of 23rd Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA'12), 1266-1285, 2012.
- [AL12] Mansoor Alicherry, T. V. Lakshman: Network aware resource allocation in distributed clouds. Proc. of IEEE INFOCOM 2012: 963-971.
- [BAHT11] Jayant Baliga, Robert Ayre, Kerry Hinton, Rodney S. Tucker: Green Cloud Computing: Balancing Energy in Processing, Storage, and Transport. Proc. of the IEEE 99(1): 149-167 (2011).
- [BGD10] Andreas Berl, Erol Gelenbe, Marco Di Girolamo, Giovanni Giuliani, Hermann de Meer, Dang Minh Quan, Kostas Pentikousis: Energy-Efficient Cloud Computing. Comput. J. 53(7): 1045-1051, 2010.
- [CCC98] Moses Charikar, Chandra Chekuri, To-Yat Cheung, Zuo Dai, Ashish Goel, Sudipto Guha, Ming Li: Approximation Algorithms for Directed Steiner Problems. Proc. of SODA, pages 192-200, 1998.
- [CHC14] Thomas Carli, Stéphane Henriot, Johanne Cohen, Joanna Tomasik: A packing problem approach to energy-aware load distribution in Clouds, (arXiv:1403.0493, <http://arxiv-web3.library.cornell.edu/abs/1403.0493>, soumis à SUSCOM, Elsevier).
- [CSB08] Joseph Chabarek, Joel Sommers, Paul Barford, Cristian Estan, David Tsiang, Stephen Wright: Power Awareness in Network Design and Routing. Proc. of IEEE INFOCOM, pages 457—465, 2008.
- [DOS07] G. Dösa, The Tight Bound of First Fit Decreasing Bin-Packing Algorithm Is $FFD(I) \leq 11/9 OPT(I) + 6/9$, Combinatorics, Algorithms, Probabilistic and Experimental Methodologies, LNCS 4614, Springer 2007.
- [DW71] S. E. Dreyfus, R. A. Wagner: The Steiner problem in graphs. Networks 1(3):195–207, 1971.
- [G12] J. Glanz. Power, pollution and the internet. The New York Times, 23:A1, 2012.
- [GM11] A. Gupta and D. Milojicic. Evaluation of HPC applications on cloud. Technical Report HPL-2011-132, HP Laboratories, 2011.
- [GMM10] Frédéric Giroire, Dorian Mazauric, Joanna Moulierac, Brice Onfroy: Minimizing Routing Energy Consumption: from Theoretical to Practical Results. Proc. of IEEE/ACM GreenCom, 2010.
- [GT93] E. N. Gordeev, O. G. Tarastsov: The Steiner problem: A survey. Diskr. Mat. 5(2): 3–28, 1993.
- [KP03] J. Kang and S. Park, Algorithms for the variable sized bin packing problem, European J. of 2003.
- [MDD10] Michele Mazzucco, Dmytro Dyachuk, Ralph Deters: Maximizing Cloud Providers' Revenues via Energy Aware Allocation Policies. Proc. of IEEE CLOUD, 131-138, 2010.
- [MG09] P. Mell and T. Grance. Draft NIST Working Definition of Cloud Computing. 14, 2009.

- [ML02] J. Markoff and S. Lohr. Intel's huge bet turns iffy. *The New York Times*, 2002.
- [MMK01] Mohand-Said Mezma, Nouredine Melab, Yacine Kessaci, Young Choon Lee, El-Ghazali Talbi, Albert Y. Zomaya, Daniel Tuytens: A parallel bi-objective hybrid metaheuristic for energy-aware scheduling for cloud computing systems. *J. Parallel Distrib. Comput.* 71(11), pages 1497-1508, 2001.
- [MSB09] Priya Mahadevan, Puneet Sharma, Sujata Banerjee, Parthasarathy Ranganathan: A Power Benchmarking Framework for Network Devices. *Proc. of IFIP Networking*, pages 795-808, 2009.
- [MT90] Silvano Martello, Paolo Toth, *Knapsack problems: Algorithms and computer interpretations*, Wiley-Interscience, 1990.
- [PWG10] S. Pandey, Linlin Wu, S.M. Guru, R. Buyya: A Particle Swarm Optimization-Based Heuristic for Scheduling Workflow Applications in Cloud Computing Environments. *Proc. of AINA*, pages 400 – 407, 2010.
- [SKZ08] S. Srikantiah, A. Kansal, F. Zhao, Energy aware consolidation for Cloud Computing, in: *Proc. of HotPower*, 2008
- [SGG12] Moritz Steiner, Bob Gaglianello, Vijay K. Gurbani, Volker Hilt, William D. Roome, Michael Scharf and Thomas Voith: Network-aware service placement in a distributed cloud environment. *Proc. of IEEE SIGCOMM*, 2012. [TSY12] Siva Theja Maguluri, R. Srikant, Lei Ying: Stochastic models of load balancing and scheduling in cloud computing clusters. *Proc. of IEEE INFOCOM 2012*: 702-710.
- [VDS10] Truong Vinh, Truong Duy, Yukinori Sato, Yasushi Inoguchi: Performance evaluation of a Green Scheduling Algorithm for energy savings in Cloud computing. *Proc. of IPDPS Workshops*, 2010.
- [YCN11] Zexi Yang, Meng-Hsi Chen, Zhisheng Niu, Dawei Huang: An Optimal Hysteretic Control Policy for Energy Saving in Cloud Computing. *Proc. of GLOBECOM*, 2011.
- [YDS95] F. Yao, A. Demers, S. Shenker: A scheduling model for reduced CPU energy. *Proceedings of IEEE FOCS, the 36th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, page 374, Washington, DC, USA, 1995.
- [YYL10] Dong Yuan, Yun Yang, Xiao Liu, Jinjun Chen: A cost-effective strategy for intermediate data storage in scientific cloud workflow systems. *Proc. of IEEE IPDPS*, pages 1-12, 2010.
- [YLW10] Andrew J. Younge, Gregor von Laszewski, Lizhe Wang, Sonia Lopez-Alarcon, Warren Carithers: Efficient resource management for Cloud computing environments. *Proc. of Green Computing, Conference*, pages 357-364, 2010.