



Optimisation de l'engagement des sources pour un Data Center approvisionné en énergie renouvelable

Marwa Haddad, Jean-Marc Nicod, Christophe Varnier, Marie-Cécile Péra

► To cite this version:

Marwa Haddad, Jean-Marc Nicod, Christophe Varnier, Marie-Cécile Péra. Optimisation de l'engagement des sources pour un Data Center approvisionné en énergie renouvelable. Conférence d'informatique en Parallélisme, Architecture et Système, Jul 2018, Toulouse, France. ⟨hal-02131032⟩

HAL Id: hal-02131032

<https://hal.science/hal-02131032v1>

Submitted on 16 May 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Optimisation de l'engagement des sources pour un Data Center approvisionné en énergie renouvelable

Marwa Haddad^{ab}, Jean-Marc Nicod^{ab}, Christophe Varnier^{ab} et Marie-Cécile Péra^{ab}

^aInstitut FEMTO-ST, Université Bourgogne Franche-Comté, CNRS, ENSMM
F-25000 Besançon, FRANCE

^cFCLAB, FR 3538, Université Bourgogne Franche-Comté, CNRS,
rue Thierry Mieg, F-90010 Belfort, FRANCE,

Résumé

De nombreux chercheurs se sont intéressés récemment à la problématique de la sauvegarde d'énergie dans les data centers. La plupart des travaux s'intéressent à des problèmes d'ordonnement et d'allocation de ressources pour minimiser l'énergie consommée par le data center. Quelques initiatives s'intéressent à la mise en œuvre de sources d'énergie verte afin de minimiser la consommation des énergies fossiles et leur émission de CO₂.

Dans le cadre du projet de recherche Datazero, plusieurs équipes cherchent à définir les concepts d'un data center qui ne serait alimenté que par des énergies renouvelables. Pour parvenir à ce but, il est nécessaire de s'intéresser à la gestion efficace d'un système d'alimentation hybride autonome composé de panneaux solaires, d'éoliennes, de batteries et de systèmes piles à combustible. Nous proposons dans cet article un modèle basé sur la programmation linéaire mixte pour optimiser l'engagement des sources d'énergie. L'approche tient compte de la saison et des prévisions météorologiques au moment de l'optimisation.

1. Introduction

L'énorme croissance d'internet et l'augmentation du nombre de services en ligne accessibles au public ont mis en évidence le coût imposé par le Cloud en général et par les data centers en particulier au niveau de la consommation énergétique. En effet, tout courrier stocké chez un fournisseur est consultable en permanence quelque part sur un disque dur toujours en fonction ; l'accès à un service en ligne ou à un réseau social, la consultation de données, de vidéos en ligne consomment une très grande quantité d'électricité. Selon l'agence de l'environnement et de la maîtrise l'énergie, envoyer un courriel avec une pièce jointe consomme autant qu'une ampoule basse consommation de forte puissance allumée pendant une heure. Chaque jour 10 milliards de courriers sont échangés dans le monde, ce qui correspond à une énergie de 50 GWh, soit la production électrique pendant une heure de 15 centrales nucléaires [21]. En 2010, les centres de données ont consommé environ 1,5% de l'énergie produite dans le monde, dont la moitié était dédiée à leur refroidissement [15]. Ce pourcentage est passé à 4% en 2015 [2]. Cette consommation a malheureusement un impact négatif sur l'environnement car la majeure partie de l'électricité est produite à partir d'énergies fossiles. Une étude de 2008 a estimé que les centres de données dans le monde ont émis 116 millions de tonnes de carbone, soit un peu plus que Le Nigeria la même année [16].

Dans ce contexte, de nombreuses initiatives sont menées pour rendre l'usage des centres de

données plus vertueux au niveau de leur empreinte écologique. L'une de ces initiatives consiste à utiliser les sources d'énergie renouvelable (SER) dans le système d'alimentation des data centers et même de faire en sorte que cette production énergétique soit directement intégrée à leurs propres installations. Ainsi, McGraw-Hill Companies a récemment terminé une installation de panneaux solaires de 14.1 MW pour alimenter son centre de données situé à East Windsor [17]. De même, Apple a construit un champ solaire de 40 MW pour son centre de données de Caroline du Nord [3]. Néanmoins, la nature intermittente des sources d'énergie renouvelables (soleil et vent) conduisent ces centres de données à revendre les surplus d'énergie et à utiliser les sources classiques afin d'assurer un service continu. Cette politique énergétique économiquement viable n'est pas totalement satisfaisante en terme d'empreinte carbone.

Pour réduire encore la part des énergies fossiles, de nombreux chercheurs se sont intéressés d'une part (1) à la gestion de ressources énergétiques pour répondre aux demandes des utilisateurs, et d'autre part (2) à l'optimisation de l'utilisation des ressources informatiques et des réseaux dans le but de diminuer la consommation globale.

Arlit *et al* [4] introduisent une méthode qui optimise la combinaison de l'usage du réseau électrique et des SER d'un point de vue économique en équilibrant la demande en moyen calcul et la disponibilité des ressources. De même, Goiri *et al* [7] ont développé un prototype de data center écologique dans un petit conteneur comprenant un ensemble de panneaux solaires, une batterie électrique et des onduleurs. Dans un esprit comparable, des chercheurs de l'Université du Massachusetts ont construit Blink [19], un cluster alimenté par deux micro éoliennes et deux panneaux solaires.

Parallèlement, des travaux sont menés en vue d'optimiser les ressources informatiques de deux façons. D'un côté, il est possible de poser des problèmes d'ordonnancement sous contraintes énergétiques [14], des problèmes d'allocation et de gestion de ressources avec arrêt de serveurs, migration de machines virtuelles, etc. [6, 8, 9, 20]. D'un autre côté, il est possible d'imaginer de nouvelles architectures toujours moins gourmandes en énergie [11, 13, 18].

Le projet ANR DATAZERO adopte une position originale dans ce domaine en allant plus loin que les approches présentées. Son ambition est de faire converger les besoins des utilisateurs avec la production énergétique renouvelable grâce à une boucle de négociation [1]. Ainsi, en fonction des circonstances et des périodes de l'année, le niveau d'énergie disponible pour les calculs peut varier, le principe étant que le dimensionnement des moyens informatiques et électriques permettent un service conforme à la qualité de service annoncée, en toute autonomie grâce au stockage à court et à long terme. Ces stockages permettent de lisser la production énergétique disponible pour le centre de données afin qu'ils puissent assurer des services en ligne toute la journée et toute l'année. Cependant, l'énergie n'est pas constante dans le temps car la demande cliente varie. Ainsi minimiser le recours au stockage est toujours préférable. De ce fait, en cas de réduction de l'enveloppe énergétique, des machines peuvent être éteintes, les machines virtuelles migrées, etc. Inversement, en cas d'une forte demande de la part des serveurs, une partie de l'énergie peut être puisée en plus de celle provenant directement des éoliennes et/ou des panneaux solaires. Ici, le stockage à long terme se fait au moyen de la production d'hydrogène avec des électrolyseurs et la production inverse d'électricité se fait avec des piles à combustible [12].

Cet article présente, dans le cadre du projet de recherche DATAZERO, une gestion efficace d'un système hybride d'énergies renouvelables (SHER) composé de panneaux solaires, d'éoliennes, de batteries et de systèmes piles à combustibles avec électrolyseurs pour l'alimentation d'un data center sans échange avec le réseau électrique extérieur. Nous proposons ici un modèle basé sur la programmation linéaire mixte pour optimiser l'engagement des sources d'énergie.

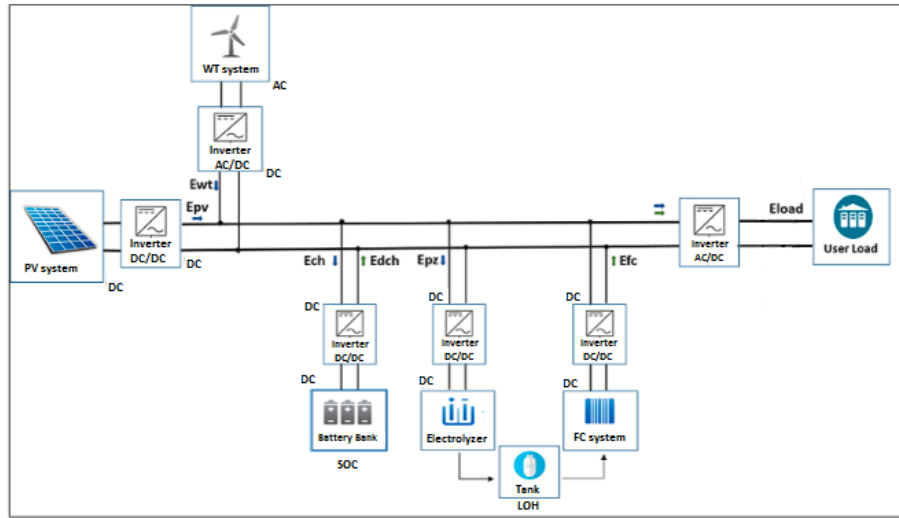


FIGURE 1 – Architecture électrique d'un data-center

Ceci se fait dans le respect de la demande des utilisateurs avec la maximisation du niveau des stocks d'énergie à long terme. Cette approche tient compte de la saison et des prévisions météorologiques au moment des prises de décision.

La suite de cet article est organisée de la manière suivante : la section 2 permet de décrire les modèles de chaque source d'énergie primaire ou secondaire utilisée, les contraintes d'utilisation du système ainsi que le problème d'optimisation que l'on doit résoudre. La section suivante propose un programme mathématique linéarisable en vue de sa résolution. Le paragraphe 3 illustre un cas d'usage avec la présentation d'une solution. L'article se termine par une conclusion et des perspectives.

2. Modèle d'un système hybride

Le système d'alimentation du data center est composé de panneaux solaires (pv), éoliennes (wt), pile à combustible (fc), batteries, électrolyseur, réservoir d'hydrogène et d'autres appareils de conversion d'énergie comme le montre la figure 1. Afin d'analyser et d'engager correctement le système hybride décrit ici, il est nécessaire pour comprendre le modèle de chaque composant. Dans la suite nous considérons un horizon H discrétisé en K périodes de Δt unités de temps tel que $H = K\Delta t$. Nous faisons l'hypothèse qu'au cours d'une période Δt , pour tout t avec $k\Delta t \leq t < (k+1)\Delta t$ et $k \in \llbracket 0, K-1 \rrbracket$, les paramètres et les variables du modèle sont constants.

2.1. Modélisation des composants

Soit la modélisation des composants décrits ci-après en fonction des paramètres du système et de l'instant k de l'horizon de travail H discrétisé :

Les panneaux solaires : la puissance de sortie P_{pv_k} des panneaux à l'instant k dépend du rayonnement solaire I_k au même instant (kW/m^2), du rendement du module η_{pv} et est proportionnelle à leur surface A_{pv} (m^2) avec $k \in \llbracket 0, K-1 \rrbracket$:

$$P_{pv_k} = I_k \times A_{pv} \times \eta_{pv}$$

Les éoliennes : le modèle de puissance de sortie d'une éolienne dépend de la vitesse du vent à l'instant k converti en la puissance Pw_k (voir [12] pour le détail du calcul), de la surface Awt occupée par les pales ainsi que du rendement η_{wt} avec $k \in \llbracket 0, K-1 \rrbracket$:

$$Pwt_k = Pw_k \times Awt \times \eta_{wt}$$

Les batteries : les batteries constituent un composant de stockage à court terme qui se chargent et se déchargent. Soient Pch_k et $Pdch_k$ les puissances de chargement ou de déchargement à l'instant k . L'état de chargement global des batteries est calculé à l'instant k tel que $k \in \llbracket 1, K-1 \rrbracket$ avec σ le taux d'auto-déchargement, η_{ch} et η_{dch} les rendements de chargement, déchargement :

$$SOC_k = SOC_{k-1} \times (1 - \sigma) + Pch_{k-1} \times \Delta t \times \eta_{ch} - Pdch_{k-1} \times \Delta t \times \eta_{dch} \quad (1)$$

avec $Pch_k \geq 0$ et $Pdch_k \geq 0$ tels que si $Pch_k > 0$ alors $Pdch_k = 0$ et inversement pour tout k car les batteries ne se chargent et ne se déchargent jamais simultanément. Par ailleurs, la valeur SOC_k est bornée par la quantité d'énergie minimale SOC_{min} et maximale SOC_{max} qu'elles peuvent contenir. Ainsi, pour tout $k \in \llbracket 1, K-1 \rrbracket$ avec $SOC_0 = SOC_{init}$ on a :

$$SOC_k = \min\{SOC_{k-1} \times (1 - \sigma) + Pch_{k-1} \times \Delta t \times \eta_{ch}, SOC_{max}\} \quad \text{si } Pch_{k-1} > 0 \quad (2)$$

$$SOC_k = \max\{SOC_{k-1} \times (1 - \sigma) - Pdch_{k-1} \times \eta_{dch}, SOC_{min}\} \quad \text{si } Pdch_{k-1} > 0 \quad (3)$$

L'électrolyseur : la puissance fournie par l'électrolyseur est calculée pour chaque instant k ($k \in \llbracket 0, K-1 \rrbracket$) comme suit :

$$Pez_k = \frac{HHV_{H_2} \times Qez_k}{\eta_{ez}} \quad \text{avec } Pez_{min} \leq Pez_k \leq Pez_{max} \quad (4)$$

avec Pez_{min} et Pez_{max} les puissances minimale et maximale de fonctionnement, Qez_k le flux de masse d'hydrogène en [Kg] passant par l'électrolyseur à l'instant k , η_{ez} le rendement de l'électrolyseur et HHV_{H_2} la valeur d'échauffement d'hydrogène.

La pile à combustible : la puissance fournie par la pile à combustible est calculée pour chaque instant k avec $k \in \llbracket 0, K-1 \rrbracket$ selon l'équation (5) en fonction du flux de masse d'hydrogène passant par la pile Qfc_k en [Kg], le rendement de la pile η_{fc} et la basse valeur d'échauffement d'hydrogène LHV_{H_2} . Celle-ci est bornée par sa puissance nominale Pfc_{nom} :

$$Pfc_k = LHV_{H_2} \times Qfc_k \times \eta_{fc} \quad \text{avec } Pfc_k \leq Pfc_{nom} \quad (5)$$

Le réservoir d'hydrogène : le niveau d'hydrogène dans le réservoir est calculé à chaque instant k avec $k \in \llbracket 1, K-1 \rrbracket$ comme suit, avec $LOH_0 = LOH_{init}$ et η_{tank} le rendement lié à la détente de l'hydrogène :

$$LOH_k = LOH_{k-1} + Qez_{k-1} - Qfc_{k-1}/\eta_{tank} \quad \text{avec } 0 \leq LOH_k \leq LOH_{max} \quad (6)$$

2.2. Autres contraintes

Satisfaction de la demande : pour satisfaire la demande $Pload_k$ et le fonctionnement du système, on doit respecter la loi de conservation suivante avec η_{inv} le rendement des convertisseurs et pour tout $k \in \llbracket 0, K-1 \rrbracket$:

$$\begin{cases} Prenew_k \leq Pwt_k + Ppv_k \\ Pload_k = (Pdch_k - Pch_k + Pfc_k - Pez_k + Prenew_k) \times \eta_{inv} \end{cases} \quad (7)$$

Cette relation garantit la satisfaction de la demande sans que l'équilibre ne soit imposé. Le surplus de production potentiel (batteries et réservoir d'hydrogène pleins) est supposé perdu.

Principes de fonctionnement : parallèlement, il convient de contraindre les solutions afin de respecter certaines règles qui interdisent l'usage simultané de : (1) les batteries en charge et décharge, (2) l'électrolyseur et la pile à combustible, (3) la décharge des batteries et la pile à combustible et (4) la charge des batteries et l'électrolyseur. Pour cela nous introduisons de nouvelles variables (binaires et réelles) et de nouvelles contraintes associées visant à éviter ces conflits. Par exemple pour tout $k \in \llbracket 0, K-1 \rrbracket$, $Pch_k = x_k \times Pch'_k$ et $Pdch_k = (1 - x_k) \times Pdch'_k$ avec $x_k = 1$ si les batteries sont en charge et 0 sinon.

2.3. Problème d'optimisation

Le data center a vocation à être utilisé toute l'année sans recourir au réseau d'alimentation électrique conventionnel. Ce faisant, il doit maintenir un niveau d'énergie dans ses stocks à long terme afin de pouvoir fonctionner les jours défavorables du point de vue de l'alimentation externe. En effet, l'idée est que les jours les plus favorables, par exemple en été, compensent les jours les moins favorables, par exemple en hiver. L'enjeu est par conséquent de lisser la consommation sur l'année grâce au stockage long terme (H_2). Pour le problème posé ici, nous admettons qu'une étude des données météorologiques sur plusieurs années permettent de prévoir quel doit être le niveau des stocks d'hydrogène d'un point macroscopique. Il s'agit alors de proposer un engagement des sources, et donc un usage adapté des stocks, afin de coller à ces prévisions.

Ainsi, le problème d'optimisation consiste à minimiser l'écart entre le niveau du stock d'hydrogènes souhaité (LOH_{cible}) à la fin de l'horizon H et le niveau observé (LOH_{K-1}). Soit le programme mathématique à résoudre :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } LOH_{cible} - LOH_{K-1} \\ \text{sous les contraintes} \\ (2), (3), (4), (5), (6), (7) \\ \text{équations d'utilisation exclusives} \end{array} \right. \quad (8)$$

Ce programme mathématique peut être facilement linéarisé sous la forme d'un programme linéaire mixte [5] pour permettre sa résolution.

3. Mise en œuvre

Le problème d'optimisation linéarisé a été programmé en Python. Les solutions optimales sont obtenues grâce au solveur Gurobi [10]. Étant donné que pour chaque configuration choisie les solutions sont optimales, nous ne les commentons pas. Seule une illustration graphique permet de comprendre la manière dont le stockage est géré en fonction de la production d'énergie en provenance des sources renouvelables (éoliennes et panneaux solaires).

3.1. Paramètres d'entrée

Pour bien illustrer le problème d'optimisation, les paramètres d'entrées choisis du programme linéaire mixte sont les suivants sur une période d'engagement des sources de $H = 48$ heures, avec $\Delta t = 1$ heure. Les valeurs ont été choisies pour des raisons pédagogiques alors que le problème du dimensionnement optimal d'un tel data center n'a pas été traité.

- la demande du data center est fixée à 150 kW sur 48 heures ;
- la puissance nominale de l'éolienne est de 200 kW ;

- la surface des panneaux solaires est de 2000 m^2 avec une puissance nominale de 260 W.m^{-2} ;
- le rayonnement solaire utilisé provient de la base de données NSRDB¹ aux États-Unis ;
- la vitesse du vent provient de la base de données MERRA2² aux États-Unis ;
- $\text{LOH}_{\text{cible}} = 300 \text{ kWh}$, $\text{LOH}_0 = 100 \text{ kWh}$
- $\text{SOC}_{\text{init}} = 437.2 \text{ kWh}$, $\text{SOC}_{\text{max}} = 1000 \text{ kWh}$

3.2. Résultats

La figure 2 présente l'engagement des sources énergétiques sur un horizon de 48 heures avec un pas d'une heure. Le programme linéaire permet aussi de trouver une solution optimale pour

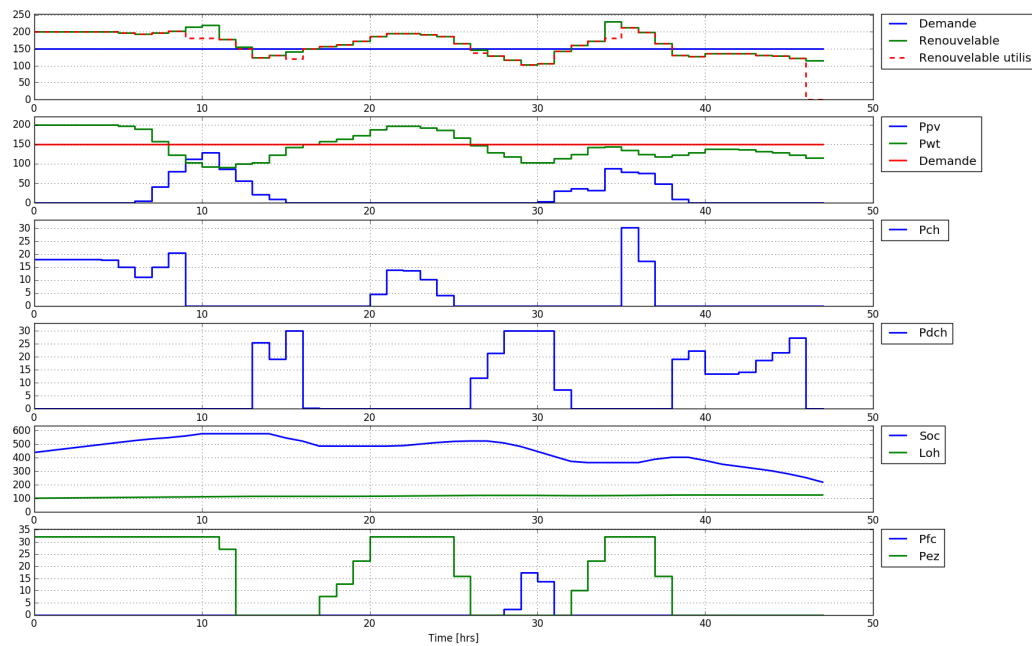


FIGURE 2 – Engagement des sources sur 48heures, heure par heure

les valeurs caractérisant le système sur l'horizon H. Nous avons choisi de présenter sur cette figure, pendant l'horizon considéré pour tout $k \in \llbracket 0, K-1 \rrbracket$, les valeurs des variables suivantes :

- Pfc_k , la puissance de fonctionnement de la pile à combustible ;
- Pez_k , la puissance de fonctionnement de l'électrolyseur ;
- Pch_k , la puissance de chargement des batteries ;
- Pdch_k , la puissance de déchargement des batteries ;
- SOC_k , l'état de charge des batteries ;
- LOH_k , le niveau de réservoir d'hydrogène ;

Nous observons sur la figure 2 qu'à chaque fois que la production renouvelable est supérieure à la demande, de l'énergie est stockée. On remarque toute fois une exception lors des 9e, 10e et 34e heures au cours desquelles il n'est pas possible de stocker dans la batterie la totalité de la production, soit parce que celle-ci est pleine ou que la puissance nécessaire est supérieure à la puissance de la batterie. Pour ce qui est du stockage long, la limitation vient de la puissance

1. <https://nsrdb.nrel.gov>

2. <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA>

maximale que peut absorber l'électrolyseur. Parallèlement, à chaque fois qu'on observe que la production est inférieure à la demande (autour des 15e et 30e heures), la batterie et les piles à combustible compensent ce déficit temporaire.

4. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une manière de piloter les sources de stockage électriques d'un data-center uniquement alimenté par des énergies renouvelables. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet ANR DATAZERO. En utilisant les prédictions météorologique, il est possible de prédire la puissance fournie par les sources primaires (ici le soleil et le vent). Grâce à la modélisation du problème sous la forme d'un programme linéaire mixte, nous obtenons les consignes optimales pour tous les paramètres du système avec comme l'objectif de conserver toujours un niveau de stock énergétique suffisant.

Les perspectives de ce travail consiste à explorer la possibilité de proposer des profils de consommation à destination du data-center qui soient les plus avantageux pour la gestion des stocks d'énergie d'une part et pour les utilisateurs d'autre part. Cela passe par la coopération du processus d'optimisation avec les utilisateurs via une phase de négociation telle que proposée dans le projet DATAZERO. La prise en compte du caractère incertain des données d'entrées du problème est une autre perspective.

Remerciements

Ce travail est soutenu par le projet ANR DATAZERO (contrat n° ANR-15-CE25-0012) et par le Labex ACTION (contrat n° ANR-11-LA BX-01-01).

Bibliographie

1. ANR DATAZERO. <http://datazero.org>.
2. Energie consommée par les data centers. <https://www.planetoscope.com/electronique/230-energie-consommee-par-les-data-centers.html>.
3. Apple. – Apple facilities, environmental footprint report. *Apple and the Environment*, 2013.
4. Arlitt (M.), Bash (C.), Blagodurov (S.), Chen (Y.), Christian (T.), Gmach (D.), Hyser (C.), Kumari (N.), Liu (Z.), Marwah (M.) et al. – Towards the design and operation of net-zero energy data centers. – In *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, 2012 13th IEEE Intersociety Conference on, pp. 552–561. IEEE, 2012.
5. Billionnet (A.). – *Optimisation discrète, De la modélisation à la résolution par des logiciels de programmation mathématique*. – Dunod, 2007.
6. Caux (S.), Rostirolla (G.) et Stolf (P.). – Smart Datacenter Electrical Load Model for Renewable Sources Management. – In *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ)*, Salamanca, Spain, 21/03/2018-23/03/2018 volume 16, p. (on line), <http://www.icrepq.com>, 2018. European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality.
7. Goiri (I. n.), Katsak (W.), Le (K.), Nguyen (T. D.) et Bianchini (R.). – Parasol and greenswitch : Managing datacenters powered by renewable energy. *SIGARCH Comput. Archit. News*, vol. 41, n1, mars 2013, pp. 51–64.
8. Grange (L.), Costa (G. D.) et Stolf (P.). – Green IT scheduling for data center powered with renewable energy. *Future Generation Computer Systems*, 2018.
9. Grange (L.), Stolf (P.), Da Costa (G.) et Sayah (A.). – Heuristiques d'ordonnancement pour

- les centres de données alimentés par énergies renouvelables. – In *Conférence d'informatique en Parallélisme, Architecture et Système (ComPAS'2017)*, Sophia Antipolis, jun 2017.
10. Gurobi Optimization (I.). – <http://www.gurobi.com>, 2014.
 11. Hackenberg (D.), Schöne (R.), Ilsche (T.), Molka (D.), Schuchart (J.) et Geyer (R.). – An energy efficiency feature survey of the intel haswell processor. – In *International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshop (IPDPSW)*, pp. 896–904. IEEE, 2015.
 12. Haddad (M.), Nicod (J.-M.) et Péra (M.-C.). – data-center supply-refueling station synergy. – In *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC 2017)*, pp. 1 – 6, Belfort, dec 2017. IEEE.
 13. Hofmann (J.), Fey (D.), Eitzinger (J.), Hager (G.) et Wellein (G.). – Analysis of intel's haswell microarchitecture using the ecm model and microbenchmarks. – In *International Conference on Architecture of Computing Systems*, pp. 210–222. Springer, 2016.
 14. Kassab (A.), Nicod (J. M.), Philippe (L.) et Rehn-Sonigo (V.). – Scheduling independent tasks in parallel under power constraints. – In *46th International Conference on Parallel Processing (ICPP)*, pp. 543–552, Bristol, UK, aug 2017.
 15. Koomey (J.). – Growth in data center electricity use 2005 to 2010. *A report by Analytical Press, completed at the request of The New York Times*, vol. 9, 2011.
 16. Mankoff (J.), Kravets (R.) et Blevis (E.). – Some computer science issues in creating a sustainable world. *Computer*, vol. 41, n8, août 2008, pp. 102–105.
 17. Miller (R.). – Huge solar array will support nj data center. *datacenterknowledge*, 2011. – <http://www.datacenterknowledge.com/archives/2011/06/14/huge-solar-array-will-support-nj-data-center/>.
 18. Orgerie (A.-C.), Assuncao (M. D. d.) et Lefevre (L.). – A survey on techniques for improving the energy efficiency of large-scale distributed systems. *ACM Comput. Surv.*, vol. 46, n4, mars 2014, pp. 47 :1–47 :31.
 19. Sharma (N.), Barker (S.), Irwin (D.) et Shenoy (P.). – Blink : Managing server clusters on intermittent power. *SIGARCH Comput. Archit. News*, vol. 39, n1, mars 2011, pp. 185–198.
 20. Stolf (P.), Borgetto (D.) et Aubert (M.). – Host management policy for energy efficient dynamic allocation. – In *2016 Seventh International Green and Sustainable Computing Conference (IGSC)*, pp. 1–7, Hangzhou, China, Nov 2016.
 21. Tison (C.) et Lichenstein (L.). – Internet : la pollution cachée. – <https://www.youtube.com/watch?v=75mx9pRJyLg\&t=1402s>, oct 2016. Camicas produced conjointly with France Télévision.