

Méthodologies de calculs de l'empreinte carbone sur une plateforme de calcul

L'exemple du site de Rennes de Grid'5000

Matthieu Simonin

Univ. Rennes, Inria, CNRS, IRISA, Labos1point5

Anne-Cécile Orgerie

Univ. Rennes, Inria, CNRS, IRISA, EcoInfo

Mots-clefs

Empreinte carbone, Infrastructure, Grid'5000, quantification, sobriété, analyse en cycle de vie.

Résumé

Les plateformes de calcul scientifique offrent des ressources de calcul et de stockage qui sont partagées entre de multiples utilisateurs·rices. Ils·elles n'ont généralement pas accès aux informations qui pourraient leur permettre d'évaluer l'empreinte environnementale de leur utilisation de ces ressources. Cependant, le calcul de leur empreinte pourrait permettre une meilleure sensibilisation aux impacts environnementaux générés par l'utilisation de ces plateformes et conduire, idéalement, à l'organisation de la diminution de cette empreinte portée collectivement.

L'empreinte environnementale est souvent réduite à la mesure de son empreinte carbone voire les émissions carbone liées à son utilisation uniquement. Or la réalité des impacts environnementaux est bien-sûr beaucoup plus complexe car multifactorielle et aggravée par l'accélération technique et l'intensification des usages. Comme une analyse complète des impacts environnementaux se heurte au manque de données que l'on est capable d'obtenir de manière systématique et tout au long du cycle de vie des appareils numériques, l'étude se focalise néanmoins sur un cas pratique : le calcul du coût carbone dans un centre de calcul dédié à la recherche. L'article se propose donc d'une part de défricher les différentes méthodes de calcul d'empreinte environnementale qui peuvent être appliquées dans le cadre de la gestion d'une infrastructure de calcul, en incluant l'énergie grise ; et d'autre part de présenter et discuter plus particulièrement d'une méthode de calcul permettant d'attribuer un coût carbone à l'utilisation d'un cœur de calcul pendant une heure.

1 La planète en 2024, la place du numérique

Les accords de Paris, signés en 2015, par 190 pays visent à « maintenir l'augmentation de la température moyenne de la planète bien en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels,

et de préférence sans dépasser +1,5 °C » [1]. Sous ce seuil, on espère, en particulier que les points de bascules [2] restent stables. Or, presque 10 ans plus tard, les tendances ne vont pas dans ce sens : le dioxyde de carbone dans l'atmosphère atteint des taux jamais atteints depuis plusieurs millions d'années [3], avec le risque que le système climatique entre dans un emballement incontrôlable. Aujourd'hui les conséquences du réchauffement global sont d'ores et déjà visibles.

Le climat focalise toutes les attentions mais les intrications sont nombreuses et complexes entre climat, biodiversité, écosystèmes et plus généralement avec les autres limites planétaires. Le changement climatique n'est donc qu'une composante d'un problème plus vaste : six des neuf limites planétaires sont estimées déjà franchies [4]. Penser de manière systémique est nécessaire afin de ne pas aggraver d'autres dépassements de limites en se concentrant exclusivement sur l'un d'entre eux.

Le numérique quant à lui contribue *directement négativement* à plusieurs limites planétaires. Le consensus scientifique actuel situe la part du numérique dans l'empreinte carbone mondiale autour de 2,1% à 3,9% en 2020 [5]. En début de chaîne, l'extraction des ressources minérales pour concevoir notre *quincaillerie numérique*¹ amenuise les ressources naturelles disponibles tout en posant des questions sur les conditions sociales des travailleurs des mines et des populations locales subissant des pollutions induites et une concurrence pour l'accès à l'eau [6]. Plus proche de nous, l'accaparement de la ressource en eau douce pour la fabrication des puces électroniques [7] ou le refroidissement des centres de calcul font débat. En bout de chaîne, la fin de vie est également un problème loin d'être résolu [8].

Google [9] et Microsoft [10] dans leurs derniers rapports environnementaux rapportent une augmentation de leurs émissions depuis 2019 mettant à mal leurs objectifs de décarbonation affichés d'ici 2030. Plus généralement, on observe une contradiction entre les objectifs affichés (par exemple la trajectoire SBTi [11]) et les scénarios tendanciels du secteur qui prévoient une forte augmentation des impacts dans les années à venir [12]. Le moteur de cette augmentation est lié à l'augmentation des usages (nouveaux besoins, nouveaux utilisateurs) et à leur intensification. Dans ces conditions, l'information aux utilisateurs finaux est un levier possible pour la prise de conscience des enjeux et la base pour l'acceptation de politiques de sobriété efficaces.

Objectiver les impacts environnementaux liés à l'utilisation de ressources de calcul est ce que nous proposons de discuter dans cet article à travers plusieurs étapes. Dans une première étape, nous nous interrogeons sur la notion générique de mesure (y-a-t'il une bonne mesure ?), dans une seconde nous passerons en revue différentes méthodes de quantification des impacts à notre disposition à l'heure actuelle. Nous appliquons enfin une méthodologie effective de calcul permettant d'attribuer un impact carbone aux utilisateurs d'une plateforme de calcul prise en exemple, le site rennais de Grid'5000. Nous discutons dans chaque partie des méthodes et leurs limites.

2 Mesurer les impacts environnementaux ?

Pour objectiver les impacts environnementaux dans toute leur variété, le recours à des indicateurs serait une condition *nécessaire* à toute prise de décision. À des indicateurs de coût carbone d'une activité viennent s'ajouter des indicateurs multi-critères quantifiant les impacts sur les autres limites planétaires et la santé humaine (par exemple la base empreinte de l'ADEME [13]). Ces indicateurs sont consolidés par des analyses de plus en plus complètes (Analyse en Cycle de Vie - ACV) et combinés pour produire des *méta*-indicateurs plus facilement interprétables (par exemple le Nutriscore ou le PlanetScore).

¹ Terme emprunté à Romain Couillet

Cette mise en chiffre de nos activités suscite des controverses. Récemment les débats sur l'indicateur d'utilisation de produits phytosanitaires en agriculture (faut-il choisir HRI-1 ou NODU ?²) ou sur l'empreinte carbone des déplacements induits par les Jeux Olympiques et Paralympiques (JOP)³ de Paris sont symptomatiques des tensions qui peuvent naître de ces quantifications. En bref, les points de tensions s'exercent à différents niveaux qu'on peut résumer par trois questions :

(1) doit-on et peut-on tout quantifier ?

(2) une fois l'acte de quantification intégré, est-ce que l'indicateur est « précis »?

(3) est-ce que l'indicateur est « neutre » ?

Les indicateurs d'impact environnementaux n'échappent pas aux controverses qui naissent donc du positionnement des acteurs sur ces trois questions. Ils sont « naturellement » attaqués pour leur manque de précision (souvent par les partisans de l'inaction) et leur partialité (dans le cas des produits phytosanitaires, en étant favorable plutôt à un type d'agriculture plutôt qu'une autre). Enfin, la mise en place d'indicateurs est souvent considérée comme un moyen de sensibilisation des personnes avec un sous-entendu qu'une « bonne » sensibilisation serait automatiquement performative. Or des barrières existent bel et bien entre la prise de conscience et l'action qu'elles soient psychologiques (ex : biais cognitifs[15]), structurelles ou organisationnelles[16].

Dans le secteur du numérique, les indicateurs de performance sont omniprésents et leur amélioration est souvent le moteur d'innovations : *Flop/s* pour les processeurs, *bit/s* pour les réseaux, *PUE*⁴ (*Power Usage Effectiveness*) pour la gestion de l'énergie dans les centres de calcul, etc. Or par essence, une mesure de performance est *étroite* : elle est aveugle à bien d'autres aspects de l'ensemble [17]. En particulier les gains liés à l'optimisation d'un indicateur de performance sont souvent contrecarrés par l'augmentation des usages ou plus généralement par des effets rebonds. La prudence est donc de mise lorsqu'on fait rimer sobriété et efficacité. Dans le domaine des infrastructures de calcul, par exemple, faire baisser son PUE ne dit rien sur la consommation globale du centre de calcul (qui peut augmenter par exemple à cause d'une augmentation des usages), le taux de renouvellement des équipements (qui peut être très prématuré avec les conséquences discutées plus haut sur la fabrication et la fin de vie des équipements) ou encore l'utilisation d'autres ressources comme l'eau [18].

Dans cet article, nous passons en revue quelques indicateurs d'impact carbone de l'utilisation de ressources de calculs. En tant qu'indicateurs, ils sont donc sujets aux questionnements évoqués plus haut. Ces indicateurs peuvent être soit collectés par l'utilisatrice finale elle-même ou par l'infrastructure puis attribués à chacun des utilisateurs. On s'efforcera donc de contextualiser leur utilisation et de discuter leurs limites.

² HRI-1 et NODU sont deux indicateurs censés mesurer la quantité d'intrants épandus ainsi que leur dangerosité.

³ Une étude du SHIFT project estime les émissions dues aux trajets (beaucoup) plus importantes que les estimations faites par les organisateurs.

⁴ Le PUE mesure l'efficacité du système énergétique d'un centre de calcul. Un PUE de 2 signifie par exemple que chaque watt.heure nécessaire aux machines de calcul nécessite un watt.heure supplémentaire pour faire fonctionner tout le reste de l'infrastructure (climatisation,...).

3 La prise de mesure

3.1 Mesurer la consommation énergétique

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la consommation électrique de serveurs dans un centre de calcul. Les PDUs (*Power Distribution Units*) permettent généralement d’avoir des informations de consommation électrique (puissance instantanée) pour un groupe de prises, voire par prise, plusieurs fois par minute, à une précision de l’ordre de quelques watts. Des wattmètres externes peuvent également être utilisés pour mesurer la consommation par prise avec une plus grande précision et une plus grande fréquence. Ces mesures externes permettent d’obtenir la consommation de serveurs entiers (y compris l’alimentation électrique).

Des mesures sont également disponibles via IPMI (*Intelligent Platform Management Interface*) en utilisant le contrôleur BMC (*baseboard management controller*) de la carte mère d’un serveur. Enfin, des mesures sont disponibles directement sur certains composants du serveur (CPU, RAM, GPU). Ces mesures s’appuient sur des compteurs matériels implémentés par les constructeurs. Par exemple, Intel fournit l’interface RAPL (*Running Average Power Limit*) qui permet d’accéder à la consommation du processeur (CPU) et de la mémoire (RAM) d’un serveur. De la même manière, Nvidia fournit l’interface SMI (*System Management Interface*) qui permet d’obtenir la consommation d’un processeur graphique (GPU). Ces mesures, internes aux serveurs, ne rendent compte que d’une partie de la consommation des serveurs.

La Figure 1 (issue des résultats présentés dans [21]) montre la puissance moyenne mesurée sur un serveur par un wattmètre externe (à gauche), par le BMC (centre gauche), via RAPL (centre droite) et via Nvidia-SMI (droite) lorsque le serveur est allumé mais inactif (en rouge) et lorsqu’il exécute une application classique en calcul haute performance sur le CPU (en bleu) ou sur le GPU (en violet). Le serveur considéré dispose de 2 CPU Broadwell de 20 cœurs chacun et 8 GPU Nvidia Tesla V100.

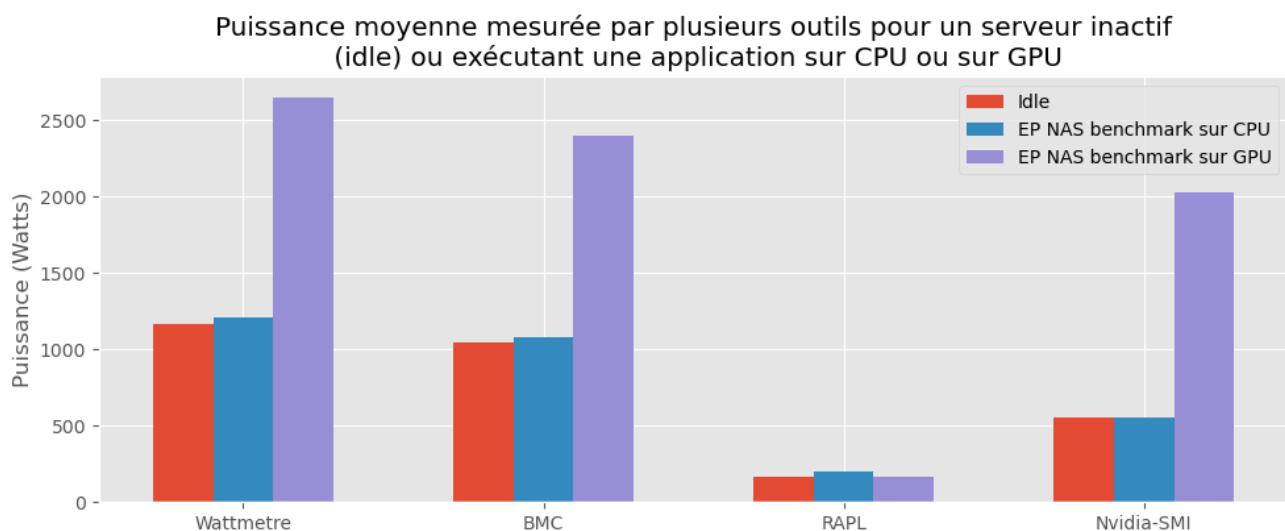


Figure 1

En comparant les puissances, on remarque sur les mesures du wattmètre que la puissance ‘idle’ représente environ 44% de la puissance maximale mesurée ici. Cette consommation est également appelée dans la littérature *consommation statique*, par opposition à la *consommation dynamique* qui

représente la part variable de la consommation du serveur (en fonction de sa charge). On remarque que les méthodes utilisant le BMC, RAPL et Nvidia-SMI ne capturent qu'une partie de la consommation par rapport à un wattmètre externe. Ainsi, par exemple pour la puissance statique, en sommant les résultats renvoyés par RAPL et par Nvidia-SMI, on atteint uniquement 61% de la puissance affichée par le wattmètre. De même, RAPL et Nvidia-SMI ne capturent qu'une partie de la consommation dynamique du serveur comme montré dans les résultats détaillés de ces expériences [21].

Au niveau du centre de calcul, d'autres mesures de consommation énergétique sont disponibles, notamment sur les tableaux électriques. Ils permettent d'obtenir la consommation des serveurs et autres équipements informatiques (part IT) et celle du système de refroidissement et des autres composants tel que l'éclairage (reste). Le PUE (*Power Usage Effectiveness*) est le ratio entre la consommation totale du centre (part IT + reste) sur la part IT. Cet indicateur permet notamment de caractériser l'efficacité de l'infrastructure du centre de calcul (principalement le système de refroidissement) et non des équipements informatiques.

Certains modèles utilisent le PUE pour calculer la consommation énergétique 'environnée' d'un usage donné, c'est-à-dire une consommation qui tient compte de l'usage de l'infrastructure. C'est par exemple le cas de la librairie codecarbon⁵ qui somme les consommations obtenues par RAPL (via l'interface Intel Power Gadget) et par Nvidia-SMI (via l'interface pynvml) et multiplie cette somme par le PUE. Comme indiqué précédemment, RAPL et Nvidia-SMI ne capturent qu'une partie de la consommation des serveurs. De plus, multiplier par le PUE ne rend compte que d'une partie également de la consommation de l'infrastructure. En effet, si chaque utilisateur utilise cette méthode et qu'on somme sur une période donnée tous ces 'coûts énergétiques' par utilisateur, cette somme ne correspond pas à la consommation énergétique totale du centre de calcul. En effet, cette méthode ne tient pas compte des serveurs d'infrastructure (frontend, NFS, monitoring, etc.), des autres équipements informatiques (routeurs, etc.) ni des périodes d'inactivité des serveurs du centre. Elle ne permet donc pas d'attribuer *tous* les coûts énergétiques aux utilisateurs de la plateforme. Ce modèle est donc à utiliser avec précaution car il ne tient compte que d'une partie de la consommation des ressources IT et d'une partie également de la consommation de l'infrastructure, cette dernière étant de plus supposée proportionnelle à la première.

Cet exemple illustre la difficulté à construire un modèle énergétique cohérent par utilisateur et utilisatrice d'une infrastructure partagée avec des coûts fixes et des coûts variables. En particulier, on souhaiterait qu'un tel modèle ait de 'bonnes' propriétés : par exemple que la somme des coûts individuels corresponde au coût énergétique total sur une période donnée (une année par exemple) ou encore qu'il y ait une relation d'ordre entre les coûts attribués aux utilisateurs et utilisatrices en fonction d'une relation d'ordre entre leurs usages. De tels modèles ont été proposés dans la littérature [19].

3.2 Estimer l'empreinte carbone

Le bilan carbone d'une infrastructure ne concerne pas uniquement les émissions de CO₂ mais plus généralement, les émissions de gaz à effet de serre (GES) générées par cette infrastructure. Toutes

⁵ Librairie Python Codecarbon (<https://codecarbon.io>) prise ici en exemple, mais plusieurs librairies exploitent le même principe.

les émissions sont alors normalisées en fonction du potentiel de réchauffement global de chaque gaz par rapport au CO₂ pour obtenir un indicateur unique exprimé en grammes équivalent CO₂ (g CO₂e). Plusieurs méthodes d'allocation existent pour attribuer une empreinte carbone à chaque utilisateur ou utilisatrice d'un centre de calcul. Ces méthodes d'allocation sont des règles comptables avec des finalités variées, les deux principales étant de nature externe (affichage, reporting) ou de nature interne (pour motiver des actions de réduction). Elles portent également sur des périmètres qui peuvent varier.

Depuis 2001 et l'apparition du *Greenhouse Gas Protocol* (GHG Protocol)⁶, le bilan carbone ou bilan des émissions de GES s'est progressivement imposé comme un standard de facto (avec des variantes). Ce protocole définit notamment 3 périmètres appelées *scopes* :

- Scope 1 : émissions qui résultent directement des activités de l'entreprise, comme la génération d'électricité en interne, les émissions de gaz réfrigérants des climatisations, etc.
- Scope 2 : émissions qui résultent de la consommation d'énergie de l'entreprise, typiquement l'électricité et le chauffage achetés.
- Scope 3 : tout le reste ! c'est-à-dire les achats, les déplacements professionnels et domicile-travail des employés, la gestion des déchets...

Par exemple, pour un centre de calcul qui possède des panneaux photovoltaïques (PV) pour une partie de son alimentation électrique, le scope 1 concerne la production électrique des PV, le scope 2 porte notamment sur le mix électrique acheté au fournisseur d'électricité externe en complément de la production PV et le scope 3 porte notamment sur la phase de fabrication et de fin de vie des équipements informatiques et autres du centre. Les grandes entreprises du numérique qui visent la neutralité carbone ne l'appliquent généralement qu'aux scopes 1 et 2 [20].

Concernant la phase d'usage (incluse dans les scopes 1 et 2), pour obtenir un indicateur carbone (ou GES), il convient de multiplier une consommation d'énergie (suivant un modèle défini tel que discuté précédemment) par un facteur d'émission (en g CO₂e/kWh) lié au mix énergétique utilisé par le centre de calcul. Le site web RTE permet par exemple de suivre en temps réel ce facteur moyen à l'échelle de la France⁷. Cependant, ce facteur d'émission est en pratique compliqué à évaluer pour un usage donné (voir par exemple la position de l'ADEME sur le facteur à prendre dans le cas du chauffage électrique en France [22]). De plus, l'achat de certificats d'énergies renouvelables (*Renewable Energy Certificate*) permet de réduire légalement (selon le GHG Protocol) le bilan carbone des grandes infrastructures Cloud, bien que cette technique soit controversée [23].

Concernant la phase de fabrication des équipements informatiques (incluse dans le scope 3), de plus en plus de méthodes d'allocation proposent de la prendre en compte. Cependant, le bilan carbone pour un équipement donné n'est pas toujours accessible. Dans le cadre du marché d'achat Matinfo⁸, de plus en plus de fournisseurs de matériels informatiques s'engagent à fournir ces données en mettant à disposition des fiches PCF (*Product Carbon Footprint*) par équipement. L'outil EcoDiag [28] fourni par le GDS EcoInfo s'appuie sur ces données pour calculer le bilan carbone de la phase de fabrication d'un parc informatique. Il est à noter cependant que, les processus de fabrications des

⁶ <https://ghgprotocol.org>

⁷ éCO2mix <https://www.rte-france.com/eco2mix>

⁸ <https://www.matinfo.fr>

équipements informatiques étant complexes, les incertitudes sur ces calculs de bilan carbone sont importantes.

Les fiches PCF s'appuient généralement sur des méthodologies d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) simplifiées, car ne considérant qu'un seul critère (le bilan carbone), là où une ACV classique est multicritères. Il existe deux catégories d'ACV, ainsi pour un équipement donné :

- L'ACV attributionnelle modélise les impacts environnementaux de l'équipement sur l'ensemble de son cycle de vie *a posteriori* et en régime permanent (capacités de production installées, etc.). Il s'agit donc dans ce type d'ACV d'attribuer à chaque équipement une part de responsabilité dans les impacts globaux générés. C'est ce type d'ACV qui est utilisé dans les fiches PCF. Par exemple, pour une partie de la phase de fabrication, on répartit les impacts environnementaux d'une chaîne de montage sur l'ensemble des équipements produits (en divisant par exemple la consommation énergétique de la chaîne par le nombre d'unités produites).
- L'ACV conséquentielle modélise les impacts environnementaux dans une situation par rapport à une autre (évaluation de la conséquence d'un changement d'hypothèse). Elle concerne également l'ensemble du cycle de vie de l'équipement. Sur le même exemple que précédemment, ce type d'ACV permet d'étudier l'évolution des impacts si par exemple on choisit d'ajouter un nouveau composant à l'équipement considéré, ce qui implique de modifier la chaîne d'assemblage existante, voire d'en construire une nouvelle. Les ACV conséquentielles sont rares dans la littérature et sont pourtant les seules aptes à répondre à des questions de type *what-if*. Ainsi, disposer d'une ACV attributionnelle sur l'équipement initial et d'une ACV sur le nouveau composant à ajouter ne permet pas de prendre en compte le changement d'infrastructure imposé par l'ajout de ce composant dans notre exemple (qui est simplement illustratif et non exhaustif sur les conséquences non prises en compte).

Ces deux méthodologies ont des finalités différentes et fournissent des résultats différents. Ainsi, comme pour les modèles et méthodes décrits précédemment, il convient d'identifier les objectifs et le périmètre visé pour choisir de manière adéquate la méthode à employer. Les résultats obtenus en termes de bilan carbone sont très fortement dépendant de la méthode et des hypothèses choisies (périmètre, facteurs, etc.) [24]. Il est ainsi très rare de pouvoir comparer de tels résultats obtenus dans le cadre de deux études différentes que les résultats soient quantitatifs ou qualitatifs.

4 Quantification d'une heure coeur sur [G5k@rennes](#)

Dans la suite, nous proposons d'appliquer une des méthodes d'estimation de l'empreinte carbone à notre plateforme locale : le site de Rennes de Grid'5000. Nous détaillons les étapes et les hypothèses qui nous amènent à un résultat, ainsi que les conditions d'utilisation de ce résultat. Nous appliquons ici une méthode d'attribution limitée (prise en compte du scope 3 très partiellement) qui se base sur le temps d'utilisation de la plateforme (quelle que soit l'utilisation effective des ressources pendant ce temps).

4.1 Grid'5000

Grid'5000 [25] est une plateforme qui permet à ses utilisateurs de reconfigurer leur environnement d'expérimentation assez profondément pour étudier différents aspects de l'informatique moderne : des couches basses du réseau aux grands systèmes distribués. Dit autrement la plateforme permet *par design* « *de tout casser et recommencer* ». Elle offre une grande variété de ressources : machines hétérogènes, stockages et réseaux variés pour permettre de couvrir un large spectre d'étude. Elle est donc à ce titre assez différente des plateformes de calcul intensif (par exemple GENCI⁹).

La méthodologie que nous utilisons dans cette partie reprend dans les grandes lignes les méthodologies utilisées sur d'autres plateformes comme GriCad [26], GenoToul bioInfo [27] et dans les centres nationaux du Grand Équipement National de Calcul Intensif (GENCI). Dans la suite, nous nous appuyons principalement par celle décrite par le GDR Labos1point5¹⁰, étant une synthèse des différents travaux en particulier ceux menés dans le GDS EcoInfo. Revenons tout d'abord sur quelques notions.

Le service rendu par une plateforme s'exprime traditionnellement en *heure.cœur*. Par exemple utiliser pendant une journée deux machines disposant de 32 cœurs de calculs fait consommer $2 \times 32 \times 24 = 1536$ heure.cœur (soit une quantité de ressource équivalente à 2 mois environ d'une machine ne disposant que d'un cœur). Pour reprendre la terminologie issue des ACV, l'**unité fonctionnelle** considérée est le fait de calculer pendant 1 heure sur 1 cœur de calcul. Autrement dit on cherche à déterminer le coût carbone d'une heure.cœur de calcul sur la plateforme. Notons que les cœurs de calcul ne sont cependant pas homogènes dans un centre de calcul (fréquence, jeux d'instructions différents...).

Le coût carbone s'exprime en gCO₂e. Il correspond à la masse de gaz à effet de serre émis pour rendre le service. L'unité permet de prendre en compte différents gaz ayant des pouvoirs réchauffant différents : par exemple 1kg de R116 (hexafluorétane, fluide frigorigène) correspond à 11 tonnes CO₂e¹¹.

Le Périmètre de l'étude décrit ce qui est pris en compte pour la réalisation du service rendu. La méthodologie prévoit d'inclure dans l'estimation :

1. *Les équipements informatiques* : serveurs de calculs, de stockage, serveur d'accès et d'administration, les pièces détachées (ex disques durs remplacés)
2. *Système de refroidissement* : climatisation, éventuelles fuites de liquide frigorigène
3. *Le système d'alimentation* : transformateurs, onduleurs, batterie, groupe électrogène
4. *Bâtiments* : construction et entretien des locaux
5. *Activité du personnel* : déplacements, équipement des personnels

À noter qu'un bilan est d'autant plus complet qu'il inclut le maximum des points ci-dessus (dans l'ordre de priorité). Nous travaillons dans la suite sur un périmètre 1) + 2). Les choix sont discutés dans la partie Erreur : source de la référence non trouvée.

⁹ <https://www.genci.fr/>

¹⁰ <https://labos1point5.org/les-rapports/estimation-empreinte-calcul>

¹¹ source: labos1point5

Les règles d'allocation sont les règles qui déterminent pour chaque élément pris en compte et pour chaque étape du cycle de vie la part contributive à la réalisation de l'unité fonctionnelle. Par exemple, à l'heure actuelle la fin de vie du matériel se voit souvent attribuer une part nulle par manque de données robustes. Les règles d'allocation définissent également pour la phase d'usage la part attribuée à chaque utilisatrice d'une ressource informatique partagée.

Les incertitudes évaluent l'erreur commise lors de l'activité de mesure et d'évaluation. Chaque élément et chaque étape du cycle de vie se voit affecter une incertitude qui se propage jusqu'au résultat final. Dans la suite du document, nous laissons dans un premier temps les considérations sur les incertitudes pour des raisons de clarté. Nous y revenons dans la partie Erreur : source de la référence non trouvée.

4.2 Inventaire et facteur d'émission de la fabrication

Le site de Rennes en 2023 disposait d'une centaine de machines dédiées aux expérimentations utilisateurs, une quinzaine de machines physiques dédiées à l'administration et/ou au stockage et enfin une dizaine d'équipements réseau. Le détail de cet inventaire est présenté dans le Tableau 1. Notons que quelques équipements ont été ajoutés en milieu d'année et se verront affecter une allocation de 50% (6 mois sur 12).

Nous prenons un coût carbone générique par unité de 1300 kg CO₂e pris en accord avec les données fournies par EcoDiag¹². Cette valeur est également cohérente avec les fiches PCF délivrées par DELL (resp. HPE) pour les Poweredge R630 et R730 (resp. Proliant) et dont on ne dispose pas pour les équipements plus anciens. La durée d'amortissement pour ce matériel est fixée dans notre étude à 7 ans qui est la durée de la garantie de ces serveurs. Ce qui conduit à estimer à 185 kg CO₂e par unité et par année d'immobilisation.

De la même manière, le facteur d'émission pour les équipements réseau choisi est de 400kgCO₂e¹³ sur 7 ans soit 57 kgCO₂e par année d'immobilisation.

Serveur de calculs	Usage	Nombre	Serveurs / Cœurs
Dell PowerEdge C6220 II	calcul	8	20
Dell PowerEdge R630	calcul	27	16
Dell PowerEdge R630	calcul	72	16
Équipement réseau			
Aruba X	réseau	3	-
Cisco Nexus 56128P	réseau	3	-
Cisco WS-C6509-E	réseau	1	-
Force10 S4810	réseau	1	-
Aruba 8325-48Y8C(*)	réseau	1	-
Serveur support/administration			
Dell PowerEdge C6220 II	stockage	4	-

¹² <https://ecoinfo.cnrs.fr/ecodiag-calcul/>

¹³ source: <https://www.cepir.info/>

PowerEdge R730	hyperviseur/NFS	3	-
ProLiant DL165 G7	stockage	2	-
HPE Proliant DL380 (*)	hyperviseur/NFS	1	-
HPE Proliant DL360 (*)	hyperviseur/NFS	3	-
HPE Apollo 4200(*)	hyperviseur/NFS	2	-

Tableau 1: Inventaire des équipements informatiques du site Grid'5000 de Rennes en 2023 entrant dans le périmètre de l'étude.

4.3 Consommation électrique et émissions associées

La consommation électrique des équipements et de la climatisation est estimée à 193 000 kWh pour l'année 2023. Le facteur d'émission retenu ici pour l'année 2023 est de 0.052 kgCO₂e/kWh¹⁴.

4.4 Utilisation de la plateforme

La Figure 2 présente les données historiques du site de Rennes. L'année 2023 est une année de faible utilisation de la plateforme ce qui s'explique par l'obsolescence (réelle ou ressentie) du matériel disponible à cette date. Notons qu'un module du gestionnaire de ressources¹⁵ permet depuis 2011 l'extinction automatique des machines inutilisées. En 2023, un total de 2,8 millions d'heure.cœur ont été utilisées (sur un peu moins de 5 millions d'heure.cœur pendant lesquelles les machines étaient allumées et accessibles).

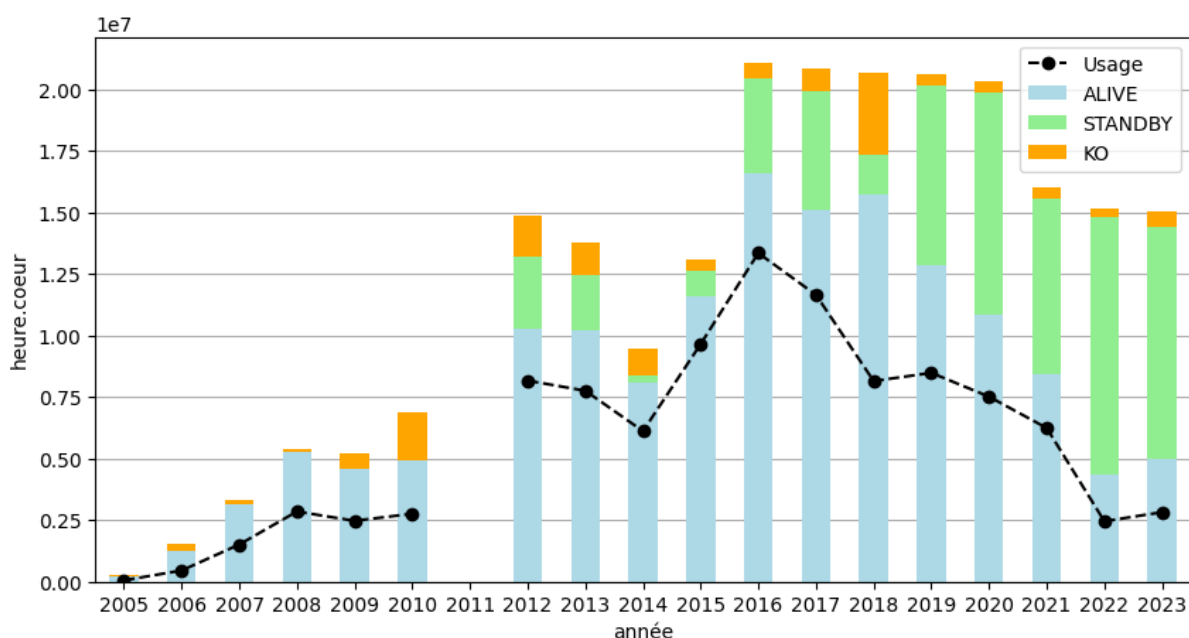


Figure 2. Utilisation (ligne pointillée) et état des serveurs (barres) du site Grid'5000 de Rennes en fonction des années. L'unité est l'heure.cœur. Lecture : en 2016 la quantité de ressources totale est

¹⁴Source: labos1point5

¹⁵ <http://oar.imag.fr/>

de 21 millions d'heure.cœur. Les travaux des utilisateurs ont occupé 13 millions d'heure.cœur. Les états des ressources se répartissent entre l'état ALIVE (allumé et disponible), STANDBY (éteinte pour économie d'énergie) et KO

4.5 Coût carbone d'une heure.cœur de calcul

Le Tableau 2 résume le calcul du coût pour l'unité fonctionnelle : calculer pendant 1 heure sur un cœur de calcul. Ce coût se décompose généralement en deux parties : la fabrication d'une part et l'utilisation d'autre part. Il s'avère qu'en 2023 la période d'immobilisation de 7 ans est révolue pour l'ensemble des équipements en place. En admettant la règle comptable de ne pas comptabiliser dans le bilan la phase de fabrication au-delà de cette période, le bilan carbone retenu est de 4 g/heure.cœur.

Nous faisons le choix ici de présenter néanmoins le coût de la fabrication pour donner une idée des ordres de grandeur en jeu. Ce coût carbone représenterait donc les 2/3 du coût carbone total.

	kg CO ₂ e	kg CO ₂ e/heure.cœur
Fabrication	22585*	0,008*
Utilisation	11580	0,004

Tableau 2: Décomposition du coût carbone d'une heure.cœur de calcul pour le site de Rennes, la fabrication correspond à la part due à l'immobilisation du matériel sur une période de 7 ans (indiqué par une *).

Les incertitudes liées à la fabrication sont de l'ordre de 50% alors que les incertitudes liées à la phase de l'utilisation sont plutôt de l'ordre de 15%¹⁶. Selon la prise en compte de la fabrication dans les conditions évoquées plus tôt l'incertitude globale serait de l'ordre de 25% (et d'autant plus grande que la part de fabrication est importante dans le coût global).

4.6 Discussion et limites

Sur le périmètre/la collecte des données. La collecte rétrospective des données d'inventaire est possible sur Grid'5000 car l'état de la plateforme est versionné¹⁷, cependant quelques machines/équipements, en particulier d'administration, n'en font pas (encore) partie. Nous avons dû combler quelques trous avec l'aide de l'équipe technique. Le décompte des heures.cœur disponibles est également possible rétrospectivement car les données des travaux utilisateurs sont accessibles dans la base de données ouverte en lecture seule aux utilisateurs et utilisatrices de la plateforme. Les états des machines (éteinte, allumée, en erreur) se trouvent également dans la base de données mais nécessitent une reconstruction. Nous mettons à disposition les scripts qui nous ont permis de synthétiser ces données. Quelques matériels manquent néanmoins à l'étude : câbles, PDU, pièces détachées... ainsi que tout autre matériel qui aurait été installé en 2023 et dont on aurait perdu la trace.

Les machines de la plateforme (en 2023) se trouvent dans une salle mutualisée avec une autre plateforme. La climatisation est partagée et nous avons appliqué une règle d'attribution au *prorata*

¹⁶ En appliquant le rapport méthodologique du labos1point5 : <https://labos1point5.org/les-rapports>

¹⁷ À chaque changement (ajout d'une machine, changement d'un disque ...) correspond une entrée dans <https://gitlab.inria.fr/grid5000/reference-repository>

de la consommation pour en déduire la part de la climatisation due à Grid'5000. Aucune fuite de produit frigorigène n'a été détecté durant l'année considérée.

Nous avons également fait le choix de ne pas inclure l'utilisation du groupe électrogène dans le bilan. Ce groupe est partagé par toutes les installations du laboratoire rendant malaisé la détermination de sa contribution pour la plateforme (considérée comme faible). D'autre part, le bâtiment hébergeant les machines peut être considéré comme amorti (construit à la fin des années 1960). L'activité du personnel n'est pas comptabilisée, c'est un point d'amélioration de l'étude.

Sur la diffusion du résultat. De manière générale, il est compliqué de fournir un calcul d'empreinte carbone sans contexte tant le résultat final est sensible à un ensemble de paramètres et choix faits tout au long du processus. Parmi les paramètres influençant le facteur d'émission de la plateforme, on peut citer le taux de charge, le facteur d'émission de l'énergie, le PUE, la politique d'extinction des machines [26]. Le facteur d'émission d'une plateforme est en outre difficilement comparable à celui d'autres plateformes en partie pour les raisons précédentes mais également pour des raisons méthodologiques (par exemple le périmètre initial, la durée d'amortissement, etc.). Dans ce cadre, la comparaison des facteurs d'émissions entre différentes plateformes n'est *a priori* pas prudente.

Sur la finalité. Comme discuté dans la partie 2, la diffusion du facteur d'émission ou du rapport des émissions par utilisateur ne saurait être une fin en soi. Il peut être envisagé comme un moyen pour faire naître le débat au sein de la communauté de la plateforme et guider certains choix stratégiques. L'indicateur porte en lui une forme « d'individualisation » qu'il faut réussir à dépasser pour organiser collectivement une baisse globale des impacts. Par exemple, l'un des enseignements de la méthodologie présentée est que les impacts futurs d'une campagne de renouvellement ou d'extension du parc sont décidés dès la décision d'achat. En effet les émissions de la fabrication sont connues à l'avance et la part des émissions liées à son utilisation peut être aisément estimée.

Bibliographie

- [1] Accords de Paris. https://fr.wikipedia.org/wiki/Accord_de_Paris_sur_le_climat . Visité le 23/09/24
- [2] *Tipping points*. https://en.wikipedia.org/wiki/Tipping_points_in_the_climate_system . Visité le 23/09/24
- [3] The physical science basis of climate change empowering transformations, insights from the IPCC AR6 for a climate research agenda grounded in ethics, V. Masson-Delmotte, PLOS Climate 3(8), 2024. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000451>
- [4] Earth beyond six of nine planetary boundaries, Katherine Richardson *et al.*, Science Advances 9, 2023. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adh2458>
- [5] The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations, C. Freitag, M. Berners-Lee, K. Widdicks, B. Knowles, G. Blair et A. Friday, Patterns, 2021, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666389921001884>
- [6] Controverses minières. Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales, rapport de l'association Systext, 2021.

- https://www.systext.org/sites/default/files/RP_SystExt_Controverses-Mine_VOLET-1_Nov2021_maj.pdf . Visité le 23/09/24.
- [7] À Grenoble, l’agrandissement de STMicroelectronics relance la question du partage de l’eau. https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/06/10/a-grenoble-l-agrandissement-de-stmicroelectronics-relance-la-question-du-partage-de-l-eau_6177027_3244.html . Visité le 23/09/24
- [8] L’âge des low-tech, Philippe Bihouix, édition du seuil, 2014.
- [9] Google Sustainability Reports. <https://sustainability.google/reports/> . Visité le 23/09/24
- [10] Microsoft Sustainability Reports. <https://www.microsoft.com/en-us/corporate-responsibility/sustainability/report>. Visité le 23/09/24
- [11] SBTi - Guidance for the ICT sector, ITU, GeSI, GSMA, SBTi, 2020. <https://sciencebasedtargets.org/sectors/ict#project-participants> . Visité le 23/09/24
- [12] Communiqué de presse ARCEP, point d’étape « pour un numérique soutenable », 2023. https://www.arcep.fr/fileadmin/reprise/communiques/communiques/2023/slides-conf-presse-PNS_05_04_2023.pdf . Visité le 23/09/24
- [13] Base Empreinte de l’ADEME. <https://base-empreinte.ademe.fr/> . Visité le 23/09/24
- [14] Chiffres, Olivier Martin, éditions Anamosa, 2023.
- [15] Biais de confirmation, J. Brisson, Guide pratique des biais cognitifs, vol. 1, 2020. <https://www.shortcogs.com/biais/biais-de-confirmation>
- [16] Understanding carbon lock-in, G. Unruh, Energy Policy, 28 (12): 817–830, 2020. [doi:10.1016/S0301-4215\(00\)00070-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00070-7).
- [17] La troisième voie du vivant. Olivier Hamant. Éditions Odile Jacob. 2022.
- [18] De l’eau dans les nuages, S. Bouveret, A. Bugeau, A.-C. Orgerie, S. Quinton, Annales des Mines, n° 27, 2024. <https://hal.science/hal-04698568v1>
- [19] How much does a VM cost? Energy-proportional Accounting in VM-based Environments, M. Kurpicz, A.-C. Orgerie, A. Sobe, PDP: Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing, 651-658, 2016. <https://inria.hal.science/hal-01276913/file/paper.pdf>
- [20] Les « neutralités carbone » des entreprises du numérique, A.-L. Ligozat, EcoInfo, 2022. <https://ecoinfo.cnrs.fr/2022/03/17/les-neutralites-carbone-des-entreprises-du-numerique/>
- [21] An experimental comparison of software-based power meters: focus on CPU and GPU, M. Jay, V. Ostapenco, L. Lefèvre, D. Trystram, A.-C. Orgerie, B. Fichel, IEEE/ACM CCGrid conference, 2023. <https://inria.hal.science/hal-04030223v2>
- [22] Positionnement de l’ADEME sur le calcul du contenu CO₂ de l’électricité dans le cas du chauffage électrique, ADEME, 2020. <https://presse.ademe.fr/2020/07/positionnement-de-lademe-sur-le-calcul-du-contenu-co2-de-lelectricite-dans-le-cas-du-chauffage-electrique.html>
- [23] Data center emissions probably 662% higher than big tech claims. Can it keep up the ruse? Isabel O’Brien, The Guardian, septembre 2024. <https://www.theguardian.com/technology/2024/sep/15/data-center-gas-emissions-tech>
- [24] How bad are bananas ? The carbon footprint of everything, Mike Berners-Lee, édition Greystone Books, 2011.
- [25] Adding virtualization capabilities to the Grid’5000 testbed, D. Balouek *et al*, Communications in Computer and Information Science, vol. 367, 2012.

- [26] Estimation de l'empreinte carbone d'une heure.coeur de calcul, F. Berthoud, B. Bzezniak, N. Gibelin, M. Laurens, C. Bonamy, M. Morel, X. Schwindenhammer, rapport, 2020. <https://hal.science/hal-02549565v4>
- [27] Lettre d'information de la plateforme GenoToul (2021). <https://bioinfo.genotoul.fr/index.php/news/newsletter-35special-carbon-footprint-issue/> .Visité le 23/09/24
- [28] Calculer le bilan Carbone de votre parc informatique avec EcoDiag, un service EcoInfo, B. Montbroussous, J. Schaeffer, G. Moreau, F. Berthoud, G. Feltin, *Congrès JRES : Les Journées Réseaux de l'Enseignement et de la Recherche*, 2019. <https://hal.science/hal-02387873v1>