

Estimation de l'empreinte carbone d'une heure.coeur de calcul

Françoise Berthoud(1), Bruno Bzeznik(1), Nicolas Gibelin(1), Myriam Laurens(1), Cyrille Bonamy(2),
Maxence Morel (3), Xavier Schwindenhammer (3)

1 : UMS GRICAD, Université Grenoble Alpes

2 : Laboratoire LEGI, Université Grenoble Alpes

3 : Laboratoire GAEL, Université Grenoble Alpes

Avril 2020

Introduction

Cette étude a été impulsée au sein de l'UMS GRICAD par le groupe de travail Green-CAD. Elle a plusieurs objectifs 1) développer et proposer une méthodologie spécifique d'évaluation de l'empreinte carbone d'un service numérique (calcul) 2) fournir aux utilisateurs une estimation de l'empreinte carbone de leurs calculs 3) identifier les axes d'amélioration dans la perspective de réduction des GES émis par les calculs 4) identifier les limites et les axes d'amélioration de la méthodologie.

Cet article présente dans une première partie le système étudié : sa définition, l'unité fonctionnelle, les frontières du système. Nous décrivons les principales hypothèses du scénario de référence en les justifiant. Nous expliciterons ensuite les méthodologies utilisées pour la collecte des données. Enfin nous présenterons les résultats pour le scénario de référence et pour des scénarios alternatifs. Ceci nous permettra d'identifier les paramètres clé et les principaux leviers de réduction de l'empreinte carbone d'une heure de calcul CPU. Pour finir nous essaierons d'identifier les limites et les axes d'amélioration de cette méthodologie.

Définition du système étudié

Définition du service

GRICAD (Grenoble Alpes Recherche Infrastructure de Calcul Intensif et de Données) est une Unité Mixte de Service (UMS 3758) sous la tutelle du CNRS (INSMI), de l'Université Grenoble Alpes, de Grenoble-INP et de INRIA, créée en 2016, pour répondre aux besoins relatifs au calcul et à la donnée des chercheurs du site grenoblois.

Les principales missions de GRICAD sont :

- Accompagnement et conseils aux chercheurs sur leurs besoins liés au calcul et à la donnée
- Mise à disposition de l'ensemble des chercheurs et personnels en soutien de la recherche d'infrastructures avancées et mutualisées pour le calcul intensif et l'exploitation des données de la recherche.
- Participation aux infrastructures de site en termes d'hébergement, de stockage et de virtualisation.

La « mise à disposition d'infrastructures avancées et mutualisées pour le calcul intensif et l'exploitation des données de la recherche » consiste notamment en la mise à disposition de serveurs de calculs et stockage nécessaire au calcul, avec leur environnement logiciel technique et humain.

Nous avons l'ambition de fournir une estimation du coût carbone de chacun de nos services. Pour cette première étude, nous nous intéressons au service calcul à partir de l'évaluation de l'empreinte carbone de l'heure de calcul un cluster constitué de serveurs de calcul et de stockage basés sur des processeurs xeon Sky Lake.

Choix des indicateurs environnementaux

Nous avons choisi de nous restreindre aux émissions de gaz à effet de serre parce que nous ne disposons pas de données de qualité suffisante pour les autres indicateurs environnementaux pertinents (déplétion de ressources non renouvelables, consommation d'eau, éco-toxicité humaine, aquatique et terrestre). Par contre, dans la mesure du possible, nous avons intégré à notre étude les GES émis pendant la phase de fabrication des équipements. Nous n'avons pas pris en compte la phase de fin de vie (notamment le recyclage) par manque de données. Les GES émis sont exprimés en kg CO₂e (kg équivalent CO₂).

Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle retenue pour cette étude est :

Calculer pendant 1h sur 1 cœur physique de type xeon dans les conditions moyennes d'utilisation de la plateforme de calcul DAHU de l'UMS GRICAD en 2019.

Frontières du système

Le système étudié inclut les éléments suivants :

- Les serveurs de gestion du service (fabrication, usage),
- les serveurs de calcul (C6420) (fabrication, usage),
- Les serveurs de stockage pour les fichiers temporaires nécessaires au calcul (scratch) (fabrication, usage),
- le réseau d'interconnexion rapide de type omnipath 100 Gb/s (usage),
- le réseau Gigabit d'interconnexion entre les équipements (usage),
- les systèmes de refroidissement et de maintenance du datacentre qui héberge les serveurs (usage),
- les personnels en charge de la maintenance directe du service de calcul (missions, déplacements domicile-travail, équipements informatiques (fabrication), consommation d'électricité liée leurs activités professionnelles).

Ne sont pas pris en compte (dans la plus part des cas par manque de données) :

- Les GES émis par la collecte et le traitement des déchets électroniques (serveurs et équipements terminaux) ,
- les GES émis par la construction du datacentre et la construction des bureaux des personnels,
- les GES émis par les services support au fonctionnement de l'UMS GRICAD (services administratifs et informatique des tutelles CNRS, UGA, INP et INRIA), par les agences de financements (ANR, europe, etc.), et la part du bilan des supports de nos publications (conférence, revues, vidéos, etc.)
- les GES générés par le transport des données d'entrée et de sortie du calcul depuis et vers l'espace de stockage de l'utilisateur (données non encore disponibles),
- les GES émis par le fonctionnement d'internet dans le cadre de l'activité des personnels

- Les GES générés par l'utilisation de l'équipement terminal de l'utilisateur (préparation des données, soumission du job, récupération des données et post-traitement) ne font pas parti du périmètre de l'étude.

Scénario de référence et hypothèses de ce scénario

Dans le scénario de référence (1h de calcul sur 1 cœur), les hypothèses suivantes sont posées :

- L'usage de l'heure de calcul correspond à un usage moyen (en utilisant de ressources mémoire, réseaux, stockage temporaire)
- Le mix électrique considéré est celui de la France
- La durée d'utilisation des équipements de type serveurs/serveurs de stockage, réseaux d'interconnexion avant mise au rebut est de 7 ans (nous proposerons une analyse en faisant varier ce paramètre)
- Les équipements terminaux des personnels qui gèrent le service calcul ne diffèrent pas en moyenne de ceux des autres personnels de GRICAD

- Les déplacements domicile-travail des personnels qui gèrent le service calcul ne diffèrent pas en moyenne de ceux des autres personnels de GRICAD
- Les consommations électriques des personnels qui gèrent le service calcul ne diffèrent pas en moyenne de ceux des autres personnels du bâtiment IMAG (qui héberge GRICAD)
- La période de référence (6 janvier au 22 juillet 2019) sur laquelle les mesures ont été réalisées est représentative de la moyenne

Collecte des données

Les données sur les émissions de GES lors de la phase de fabrication des équipements ont été collectées chez DELL.

Les données de consommation d'électricité par les équipements directement impliqués dans le calcul ont été collectées dans notre datacentre à partir des unités de distribution d'alimentation (PDU) monitorées installés dans les baies.

Les données relatives aux GES émis par les personnels ont été collectées

- auprès de GRICAD (service administratif) pour les missions,
- par enquête anonyme auprès des personnels de GRICAD pour les déplacements domicile-travail,
- par inventaire pour les équipements informatiques des personnels et
- auprès du service de la COMUE pour la consommation électrique du bâtiment.

A noter que le bâtiment qui héberge le datacentre et les bureaux des personnels est un bâtiment moderne, HQE qui n'utilise aucune autre source d'énergie que l'électricité. Ce bâtiment est en outre équipé d'un système de contrôle qui permet de connaître la consommation électrique totale, la consommation tertiaire et la consommation du datacentre.

Inventaire des éléments du système

Nous nous sommes appuyés pour faire cette étude sur une période de référence pendant laquelle il n'y a eu aucun changement dans la configuration matérielle des équipements du système.

Cette période de référence couvre tous les jours entre le 7 janvier 2019 et le 22 juillet 2019.

Pendant cette période, ont été mobilisés les équipements informatiques suivants :

Frontale et serveur de gestion des serveurs de calcul (100%)

- Frontal DELL R630 Sauvegardes
- 2 serveurs DELL R510

Serveur de calcul (100%)

40 X Noeuds de calcul "Dahu" C6420:

2 X Intel(R) Xeon(R) Gold 6130 CPU @ 2.10GHz

- 192 Go de RAM
- 1 X SSD 240 Go SATA mix use
- 1 X SSD 480 Go SATA mix use
- 1 X DD 4To SATA
- 1 X Intel Omni-Path Host Fabric Adaptateur séries 100
- 1 X Intel X710 Deux ports 10Gb SFP+

6 X switch Omnipath networking H1048-OPF, 48 ports

Serveurs de stockage (65%)

2 X R640 :

- 8 X Disque PM5-V Hot Plug 480Go SSD SAS Utilisation mixte
- 2 X Intel Xeon Silver 4114
- 64 Go de RAM

16 X R740XD:

- 12 X Disque dur Hot Plug 10To NL-SAS 1
- 2 X Intel Xeon Silver 4108
- 64 Go de RAM

Et pour le fonctionnement de l'unité, pour 17 personnes : type de matériel (Quantité)

- Pc fixe (1)
- Pc portable (18)
- Ecran (30)
- Telephone IP (17)
- Telephone portable (4)
- Tablette (1)
- DD externes (10)
- DD haute capacité (5)
- Photocopieur multifonction (1)
- Clavier (17)
- Souris (17)

Le nombre d'ETPT (Equivalent Temps Plein de Travail) mobilisé pour gérer ces moyens de calcul: 2.

le calcul considère donc 2/17ème des ressources de la précédente liste pour la part de la fabrication des équipements des utilisateurs.

La durée d'utilisation des équipements de type serveurs/serveurs de stockage, réseaux d'interconnexion avant mise au rebut est de 7 ans (nous proposerons une analyse en faisant varier ce paramètre)

Le nombre moyen journalier d'heures de calcul.coeur réalisées effectivement sur cette période a été de 22126 heures.coeur, soit 72% de la capacité maximale du cluster en moyenne (nous proposerons une analyse en faisant varier ce paramètre).

Concernant le **facteur d'émission en GES du kwh d'électricité en France**, nous prendrons la valeur proposée par la plateforme ELCD (<https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/>), à savoir 0,112 kg CO2e par kwh d'électricité consommée (nous proposerons quelques simulations à partir d'autres facteurs d'impact)

Les facteurs d'allocation :

Les facteurs d'allocations sont des éléments indispensables au calcul de l'impact d'un service parce qu'ils permettent d'estimer la part de la fabrication d'un équipement par exemple qu'on va imputer à notre heure de calcul. Ils permettent donc de répondre à une question du type : quelle part des émissions de GES de la fabrication du serveur R740 va-t-on imputer à l'heure de calcul ?

Le facteur d'allocation est un nombre sans unité, il s'exprime en général en %.

Facteur d'allocation pour les serveurs :

Selon la problématique et le système, le calcul des facteurs d'allocation peut varier, mais ici le principe du calcul est quasiment toujours le même.

Soient :

- T, la durée de vie de l'équipement dans l'unité [ici en général 7 ans], exprimé en années.
- $H_{\text{totalcoeur}}$, le nombre total d'heures de calcul / coeur réalisées sur 1 année (en faisant l'hypothèse que le nombre d'heure.coeur n'a pas varié pendant toute la durée d'utilisation de l'équipement)
- Q, la quantité d'équivalent CO2 émise lors de la fabrication de l'équipement (incluant l'extraction des matières premières), exprimée en kg CO2e

Alors pour chaque équipement, le facteur d'allocation est :

$$1 / (H_{\text{totalcoeur}} * T)$$

La part (p) de la fabrication de l'équipement considéré pour cette heure de calcul sera donc :

$$p = Q / (H_{\text{totalcoeur}} * T)$$

Dans le cas des serveurs de stockage c'est un peu différent parce qu'ils ne sont utilisés que à 65% par les serveurs de calcul, le facteur d'allocation devient donc :

$$p = Q / (0,65 * H_{\text{totalcoeur}} * T)$$

Facteur d'allocation pour les personnes :

Concernant le coût CO2 liée aux activités professionnelles en lien avec ce service, notre calcul ne prend en compte que les coûts directs pour lesquels nous disposons de données.

Nous avons réalisé le Bilan de Gaz à Effet de Serre de l'unité GRICAD (seulement les personnels affectés à l'unité qui ont une mission de service dans le cadre de l'unité, hors stagiaires et hors personnels hébergés). Ce bilan ne prenait pas en compte les missions mais seulement les déplacements domicile-travail, la consommation d'électricité (dans le bâtiment), et la part de la fabrication des équipements informatiques de l'unité (équipements terminaux principalement).

Soient

- $Q_{\text{totalpersonnels}}$ la quantité en kg CO₂e générée par l'activité de l'unité,
- P_{total} la quantité totale d'ETPT de l'unité (Equivalent Temps Plein de Travail)
- $P_{\text{service-calcul}}$ la quantité d'ETPT dédiée au service de calcul

Alors

La part des GES émise pour la partie calcul est :

$$p_{\text{personnels}} = Q_{\text{totalpersonnels}} * P_{\text{service-calcul}} / P_{\text{total}}$$

Résultats

Evaluation de l'empreinte carbone des équipements liés directement au service calcul

Consommation électrique des équipements informatiques liés au calcul :

- Consommation électrique sur 2019 liée aux serveurs de calcul (incluant la partie réseau) : 95690 kWh
- Consommation électrique sur 2019 liée à l'utilisation des serveurs de stockage temporaire : 52560 kWh. La part de ces serveurs de stockage utilisés par les calculs effectués sur les serveurs de calcul pendant la période de référence est de 65%. La consommation électrique sur 2019 liée aux serveurs de stockage est donc : 34164 kWh.

Les serveurs dissipent de la chaleur et doivent donc être refroidis. Le système utilisé dans le bâtiment IMAG qui héberge le datacentre utilise différentes technologies : refroidissement à air direct, utilisation de la géothermie, utilisation de la chaleur résiduelle. Le PUE (Power Usage Effectiveness) mesure le rapport entre la quantité d'énergie totale utilisée par le datacentre sur la quantité d'énergie utilisée par les serveurs eux-mêmes. Le PUE annuel de ce datacentre a été estimé à 1,4.

Total de la consommation électrique en tenant compte du PUE du datacentre (PUE=1,4) est donc : consommation * PUE, soit :

$(95690+34164)*1,4 = \mathbf{181795 \text{ kWh au total}}$ (dont 133965 kWh pour le calcul et 47830 kWh pour le scratch)

Fabrication des serveurs (calcul et stockage) :

Les serveurs de calcul et de stockage sont fabriqués essentiellement en Asie, à partir de composants issus de nombreuses usines, les métaux et matières premières nécessaires à leur fabrication sont extraits dans de très nombreuses mines réparties dans le monde entier. Les équipements sont finalement transportés jusqu'à leur lieu d'utilisation (ici Grenoble). Tous les processus mis en jeu génèrent des Gaz à Effet de Serre dont la comptabilité est réalisée grâce à des bases de données complexes (notamment EcoInvent) et des méthodologies plus (ACV) ou moins (Méthode PAIA)

simplifiées selon les indicateurs retenus. Les données que nous utiliserons dans la suite sont issues de l'utilisation de la méthode PAIA par le constructeur des équipements.

Pour les équipements impliqués dans le calcul, les évaluations donnent (avec les configurations spécifiques des serveurs) :

Equipement	Total CO2e (kg)	Part dédiée au calcul
- C6420 (40)	65300	65300
- R740 XD (16)	23962	15575 (65%)
- R640 (2)	2986	1941 (65%)
- R630 (1)	1309	1309
- R510 (2)	2618	2618

Nous n'avons pas réussi à ce jour à obtenir les données sur les équipements réseau.

Le total des GES émis par la fabrication et le transport des équipements pour le calcul s'élève donc, en moyenne par an, à : 12392 kg CO2e (dont 9329 kg pour les serveurs de calcul strictement et 3063 pour l'environnement dont le scratch)

Nombre d'heures de calcul pour 2019 :

Le nombre moyen journalier d'heures de calcul / coeur réalisées effectivement sur cette période a été de 22126 heures.coeur

En extrapolant ce nombre sur une année entière, nous estimons un nombre d'heures de calcul à 8 075 990 heures.coeur pour 2019

Bilan de l'empreinte carbone des équipements liés directement au service calcul

	Total GES en kg CO2e pour 2019	GES en g pour 1 h.coeur
Fabrication serveurs de calcul	9329	1,16
Fabrication serveurs environnement (dont scratch)	3063	0,38
Usage serveurs de calcul	14468	1,79
Usage serveurs environnement (dont scratch)	5166	0,64
TOTAL		3,97 g pour 1h.coeur

Evaluation de l'empreinte carbone liée à l'activité professionnelle des agents qui gèrent ce service

Pour évaluer les GES générés par les activités des personnels en charge du service, nous avons

- D'une part estimé les GES générés par les déplacements professionnels des agents ayant effectué des missions en lien avec ce service,
- D'autre part réalisé un bilan des GES de l'unité en incluant : les déplacements domicile-travail, les équipements utilisés par l'équipe (fabrication) et enfin l'énergie utilisée par l'unité pour son fonctionnement (uniquement de l'électricité).

Déplacements professionnels

Les déplacements professionnels des agents de GRICAD qui assurent le service calcul ont été pour l'année 2019 de 450 kg eqCO₂.

Consommation d'électricité de l'unité GRICAD

GRICAD représente 4,28 % de la surface du bâtiment IMAG. La consommation d'électricité du bâtiment IMAG en 2019 a été de 672 409 kWh.

La consommation estimée de GRICAD est donc de 28779 kWh, soit 3108 kg CO₂e

Trajets domicile-travail

Type de déplacement	Nombre de km (total)	Facteur d'émission
A pieds	3 098	0 kg CO ₂ e/km
Vélo électrique	1 859	0,0160 kg CO ₂ e/km
Voiture essence	58703	0,2587 kg CO ₂ e/km
Voiture diesel	49771	0,2510 kg CO ₂ e/km
Bus	12391	0,16 kg CO ₂ e/passager.km
Tram	10687	0,0066 kg CO ₂ e/passager.km
RER	71249	0,0180 kg CO ₂ e/passager.km

Ce qui représente un total de 31045 kg CO₂e pour 14 répondants pour l'année 2019, soit en moyenne 2217 kg CO₂e / personne

Les équipements informatiques et autres utilisés par l'unité en 2019 (part due à la fabrication)

Matériel	Quantité	Durée de vie	Kg CO ₂ e par unité	Bilan total annuel
Pc fixe	1	5	300	60
Pc portable	18	4	210	945
Ecran	30	6	376	1 882
Telephone IP	33	7	17	80
Telephone portable	4	2	63	126
Tablette	1	2	80	40

DD externes	10	5	45	90
DD haute capacité	5	5	75	75
Photocopieur	1	5	2935	587
Videoprojecteur	1	5	94	19
Clavier	17	3	24	136
Souris	17	3	5	28

Tableau 1 : équipements de l'unité GRICAD (2019)

La part annuelle totale de la fabrication de ces équipements (bilan total annuel) est de : 4068 kg CO2e

Bilan de l'empreinte carbone due aux activités des personnels en charge de ce service :

	Total GES en kg CO2e pour 2019 (pour les personnels en charge du service)	GES en g pour 1 h.coeur
Déplacement domicile-travail	4435	0,55
Fabrication équipements unité	479	0,06
Energie consommée (électricité)	366	0,05
Déplacement professionnels	450	0,06
TOTAL		0,71 g pour 1h.coeur

Résultats

Finalement, avec les données suivantes :

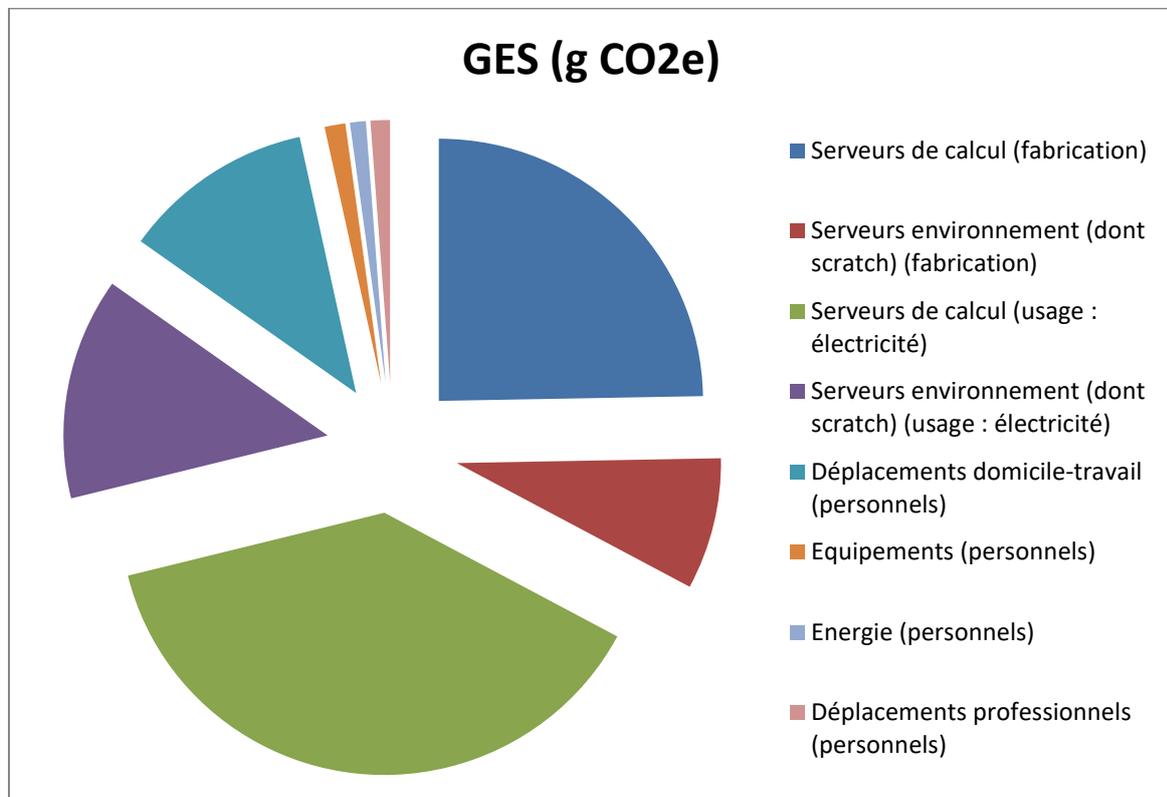
- Durée de vie des équipements : 7 ans
- Facteur d'émission électricité : 0,108 kg CO2e / kwh consommé
- Taux d'utilisation moyen du cluster : 72%
- PUE = 1,4

Nous obtenons le résultat suivant :

1h.coeur génère 4,48 g CO2e, avec la répartition suivante :

Poste d'émission de GES	GES (g CO2e)
Serveurs de calcul (fabrication)	1,16
Serveurs environnement (dont scratch) (fabrication)	0,38
Serveurs de calcul (usage : électricité)	1,79
Serveurs environnement (dont scratch) (usage : électricité)	0,64

Déplacements domicile-travail (personnels)	0,55
Equipements (personnels)	0,06
Energie (personnels)	0,05
Déplacements professionnels (personnels)	0,06
TOTAL	4,68

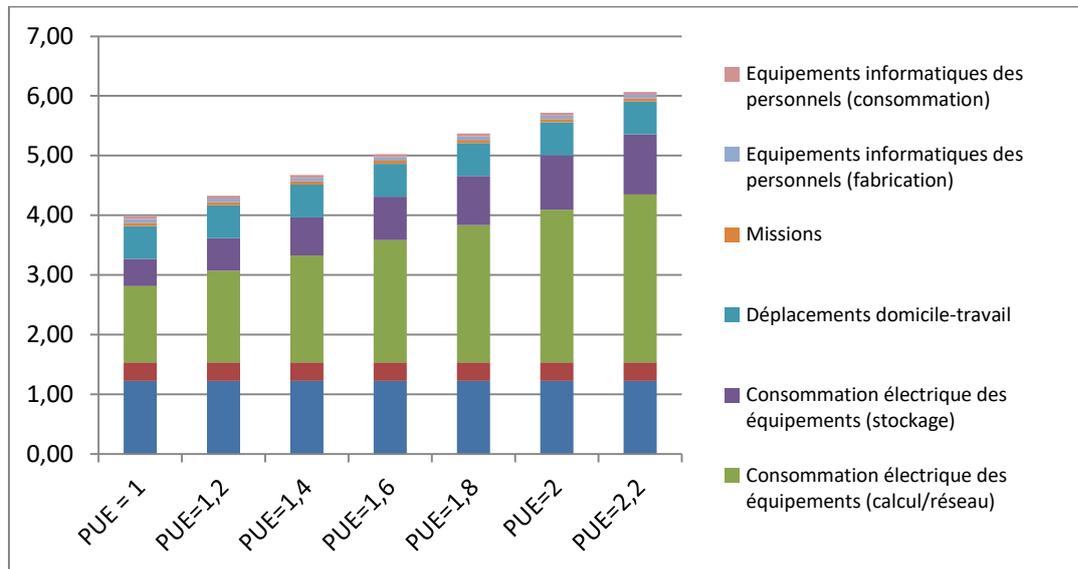


Analyse de sensibilité sur les différents paramètres identifiés :

Influence du PUE

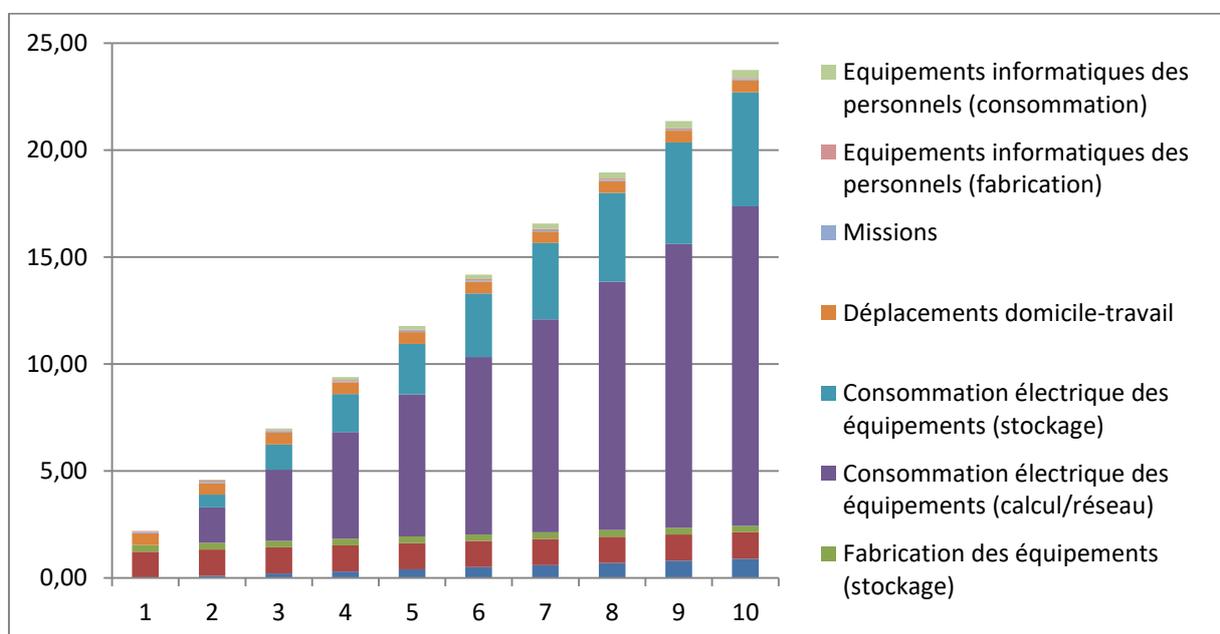
Le PUE influence directement les émissions de GES due à la consommation d'électricité des serveurs de calcul.

Sur le schéma ci-dessous, nous avons fait varier la valeur du PUE de 1 à 2,2 (à noter que le PUE moyen des datacentres Français était de 1,8 en 2015). L'augmentation des GES correspondant à 1 h.coeur est de l'ordre de 50% entre ces deux valeurs extrêmes.



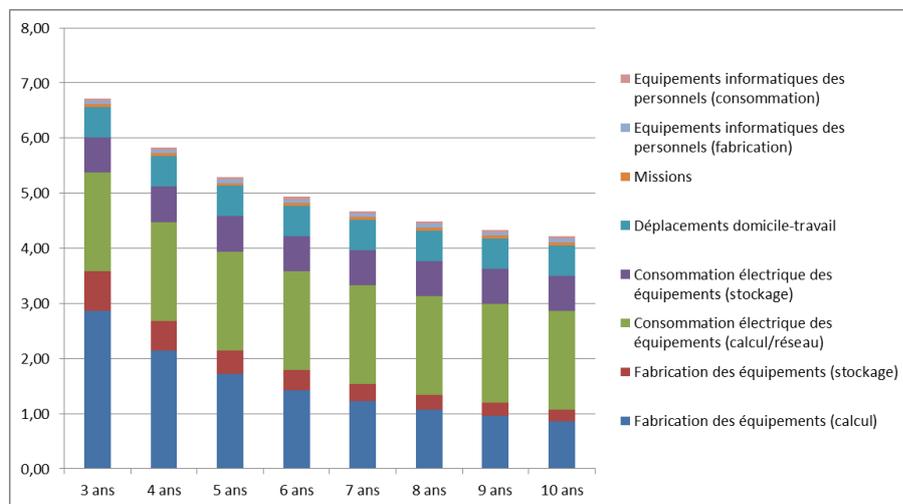
Influence du pays (production d'électricité différente)

Nous avons simulé différents facteurs d'impact pour l'électricité consommée : de 0 à 0,9 kg CO₂e / kWh consommé. La différence est évidemment frappante avec une part de plus en plus importante due à l'usage des équipements informatiques (facteur 10 entre les valeurs extrêmes).



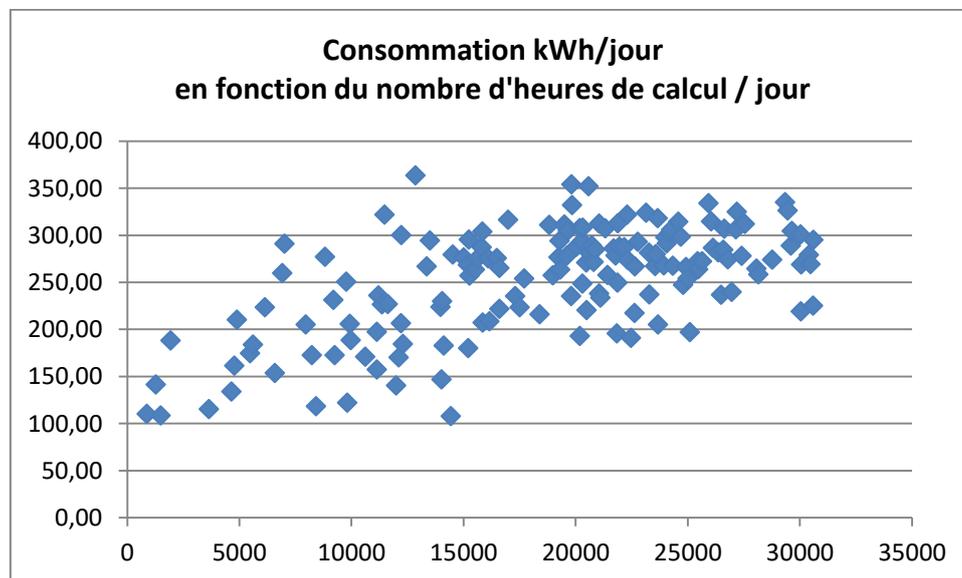
Influence de la durée de vie des équipements dédiés au calcul + environnement

Nous avons fait varier la durée de vie des équipements de 3 ans à 10 ans. Il apparaît clairement sur la figure ci-dessous que ce paramètre est au moins aussi important que le PUE pour réduire l'impact du service calcul.



Influence du taux d'occupation de la plateforme

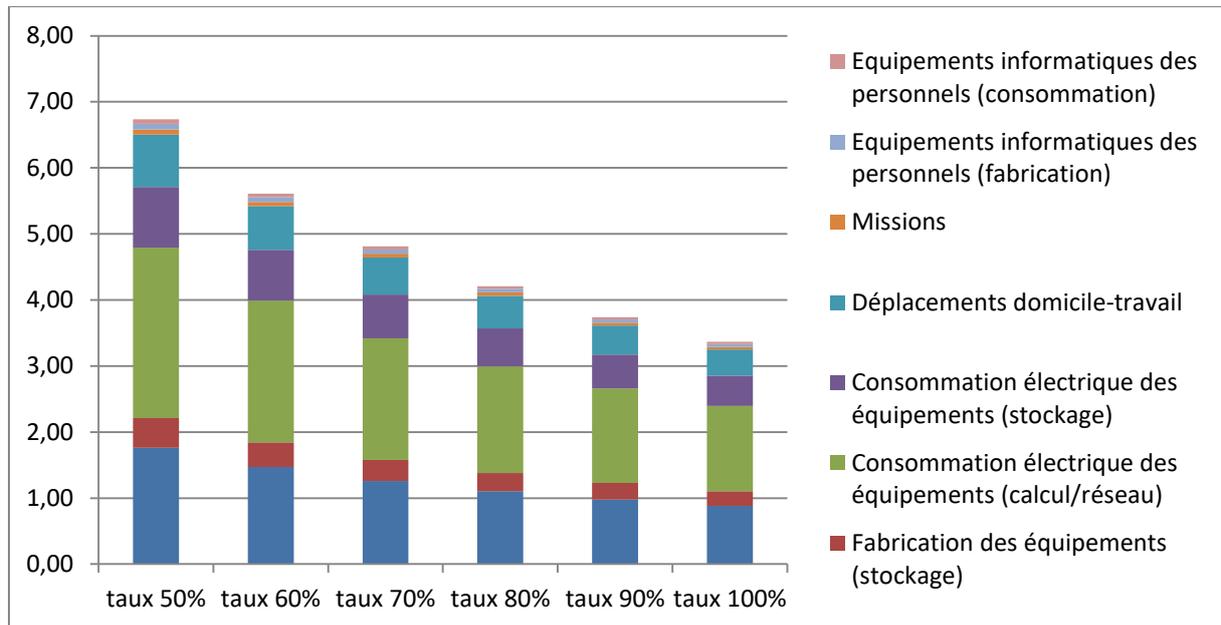
Zoom sur la variation de la consommation électrique des serveurs de calcul en fonction du taux de charge :



Cette figure donne, sur 24h, la consommation électrique pour le nombre réel d'heures de calcul effectuées ce même jour.

La grande variabilité s'explique par la variabilité du type de codes qui sollicitent plus ou moins de ressources et donc plus ou moins d'énergie. En moyenne la consommation électrique ne varie pas beaucoup entre un taux de charge de 50% et un taux de charge de 100%.

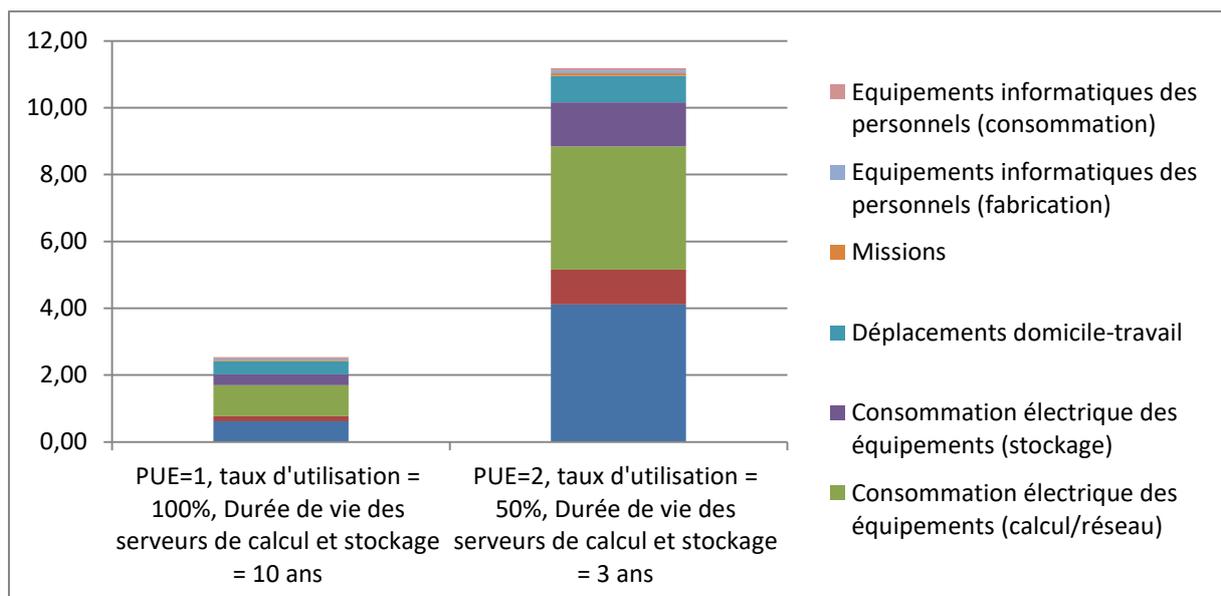
Aussi, dans les simulations suivantes, nous considérons que la consommation électrique ne varie pas en fonction du taux de charge.



La réduction de la part d'électricité par h.coeur lorsque le taux d'occupation de la machine augmente s'explique par le fait que la consommation électrique des heures non utilisées est répartie sur les heures de calcul effectives.

Meilleure et moins bonnes conditions possibles (en restant en France)

Nous avons simulé les meilleures conditions et les pires pour visualiser les différences (à facteur d'impact constant)



La différence très importante (facteur 4,4) montre l'importance de mettre en œuvre l'ensemble des outils, techniques, mode de gestion, etc. nécessaires à l'optimisation du service :

- Réduire le PUE au minimum,
- Augmenter la durée de vie des équipements,
- Augmenter le taux d'utilisation,
- Installer les plateformes de calcul et de stockage dans un site dont l'énergie est faiblement émettrice en GES.

Limites de l'étude :

A ce stade, il nous paraîtrait intéressant pour aller plus loin :

- D'intégrer les incertitudes aux résultats,
- d'évaluer le coût en CO2 des services support cités plus haut (services support des tutelles notamment),
- d'intégrer dans l'étude les équipements / personnels nécessaires au pré et post traitements des calculs lorsqu'ils sont effectués à GRICAD,
- de réaliser un calcul similaire pour les calculs sur GPU,
- d'estimer si la part du bâtiment (béton et autres matériaux) serait significative,
- de conduire des études similaires pour un centre national (IDRIS ou CINES) et européen et dans d'autres mésocentres,
- d'intégrer les coûts CO2 liés au transport des données sur RENATER lorsque les calculs sont réalisés à distance du lieu de stockage des données.

En conclusions :

Notre étude montre que, dans les conditions d'usage de notre mésocentre, les paramètres déterminants sur les émissions de Gaz à Effet de Serre pour chaque heure.coeur de calcul sont

- la durée de vie des équipements (à cause du poids important de leur fabrication)
- les GES émis par la production et le transport de l'électricité utilisée par les serveurs de calcul et de stockage temporaire
- les trajets domicile-travail des personnels qui assurent le service calcul

Les leviers de réduction des GES émis par heure.coeur sont :

- la réduction du PUE du datacentre qui héberge les serveurs de calcul et de stockage
- l'augmentation du taux d'utilisation (utile) des serveurs de calcul
- l'augmentation de la durée de vie des équipements informatiques
- la localisation géographique des serveurs et/ou l'utilisation d'une électricité faiblement émettrice en GES.