

Choix et limites des méthodes d'estimation de l'empreinte carbone des heures de calculs

Gaël Guennebaud (*[gael.guennebaud at inria.fr](mailto:gael.guennebaud@inria.fr)*)

Équipe Numérique et Soutenabilité : <https://nes.labri.fr/fr/>

Café Calcul du 4 juin 2026



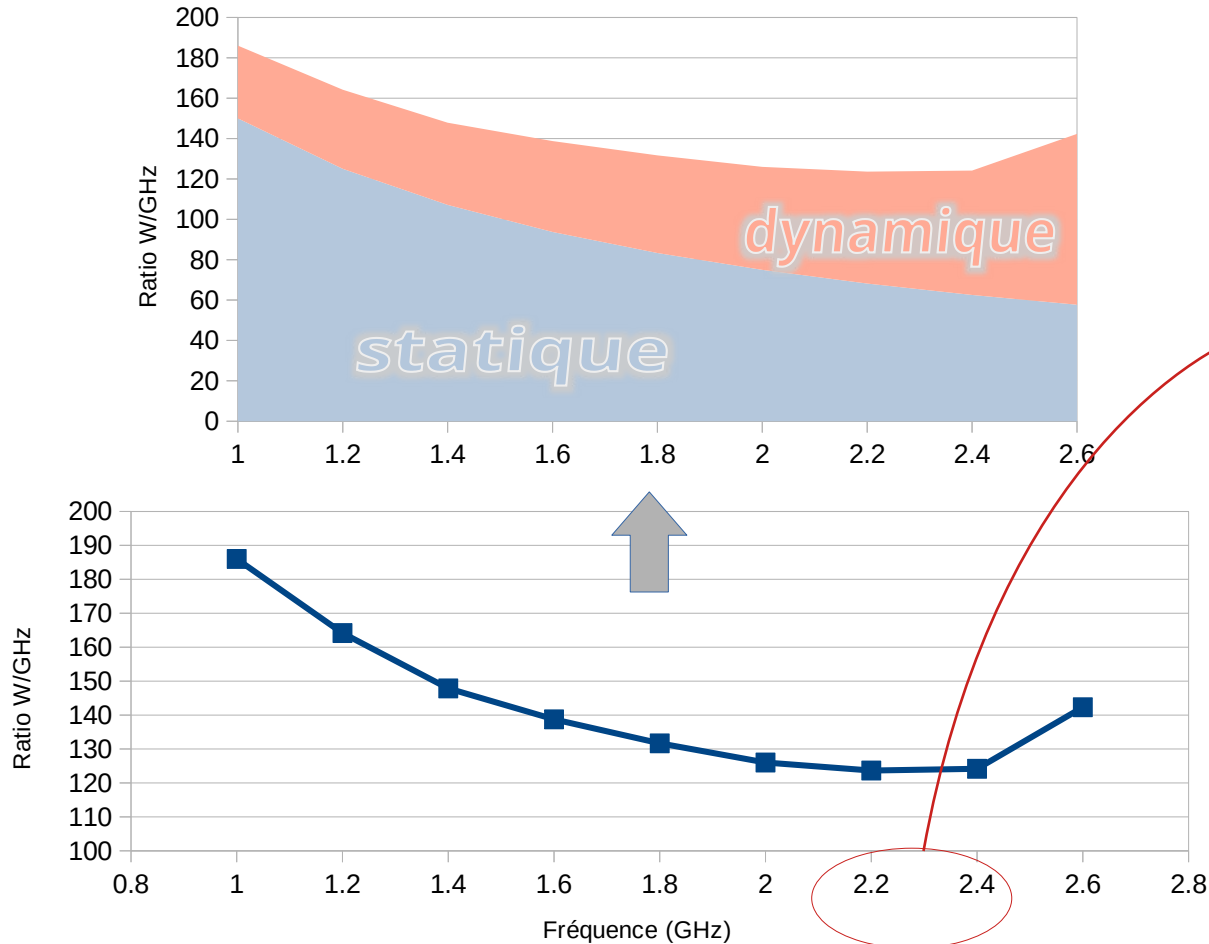
LABORATOIRE
BORDELAIS
DE RECHERCHE
EN INFORMATIQUE

LaBRI



Puissance vs fréquence : un exemple

Machine : 2x 18-core Intel CascadeLake et 192 Go de RAM



Meilleur choix pour ce CPU ?

→ dépend de l'application
(ex. préférer des fréquences plus basse si limité par les transferts mémoire ou disque)

→ dépend de ce qui est fait de la machine en dehors de la plage de calcul (ex. éteinte ?)

Evaluating and Reporting the Carbon Footprint of Shared Computing Platforms: Choices and Limits

Gaël Guennebaud¹, Anne-Laure Ligozat², Anne-Cécile Orgerie³, Matthieu Simonin³

¹ Inria, Univ. Bordeaux, Talence, France, Email: gael.guennebaud@inria.fr

² Université Paris-Saclay, CNRS, LISN, ENSIIE, Orsay, France, Email: anne-laure.ligozat@lisn.upsaclay.fr

³ Univ. Rennes, Inria, CNRS, IRISA, Rennes, France, Email: {anne-cecile.orgerie, matthieu.simonin}@irisa.fr

Abstract—Attributing the carbon costs of shared ICT infrastructures to its end-users is frequently promoted as a way to encourage awareness of environmental impacts and advocate for more sustainable practices. This paper explores the intricacies of this approach by focusing on shared ICT infrastructures specifically dedicated to academic research, several of which have recently introduced carbon intensity values for their users. This scenario serves as a practical case study for examining the methodologies and challenges associated with evaluating the carbon intensity of shared ICT infrastructures. We explore the choices with their limitations, discuss the objectives behind their implementation of this type of environmental indicator and offer actionable insights. This analysis aims to contribute to the broader discussion on sustainable computing practices and the role of environmental indicators in driving meaningful change.

Index Terms—Life cycle assessment, carbon footprint, ICT infrastructures, research platforms, computing servers

with potentially numerous subcontractors, and a proficiency in specialized life cycle analysis (LCA) methodologies and software (e.g. PAIA, SimaPro). Therefore, for a given ICT device, utilized by one person (i.e. the user), estimating its carbon footprint is already quite challenging. Yet, most of current ICT devices are connected to the Internet and often interact with services hosted by data centers. Consequently, the user indirectly employs shared ICT infrastructures through her device: communication networks and data centers.

Attributing carbon costs of shared ICT infrastructures to its end-users (either direct users or services deployed on Cloud infrastructures for instance) is often presented as a way to incentivize users to their environmental impacts. Several methods exist in literature to estimate such carbon costs or carbon intensity [12], [18], [35]. The idea is to attribute a quantity

Pourquoi
Pour quoi | « quantifier » ?

Finalités de la quantification

A chaque objectif...

- Informer les utilisateurs
- Suivi annuel à l'échelle de l'ESR
- Optimisation du service
- Optimisation d'un code
- Tests de non-régression
- Faire des projections dans le future



**Réduire les émissions
& impacts globaux**

... sa propre méthodologie !

Finalités de la quantification

A chaque objectif...

- Informer les utilisateurs

Notion d'échelle :

- ESR
- Etablissement/Institut
- Labo
- Projet
- Chercheur
- Article
- Job



**Réduire les émissions
& impacts globaux**

Exemple

Bilan GES des laboratoires

LES DONNÉES

- Introduction
- Le périmètre
- Bâtiments
- Achats
- Déchets
- Matériel informatique
- Véhicules
- Missions
- Déplacements domi
- Alimentation
- Activités de recher

LES RÉSULTATS

- GHG Protocol
- Bilan réglementaire
- Empreinte environnementale Nouve
- Empreinte carbone & soumission



Les activités de recherche

Les activités de recherche peuvent impliquer une pratique hors des murs du laboratoire. Cette pratique peut demander des zones de culture ou d'élevage, de l'expérimentation animale ou l'usage de matériels.

Ajouter une activité de recherche

Infrastructures de recherche

CERN

Calcul GENCI

Astronomie

Activités agricoles

GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif) est une très grande infrastructure de recherche de classe IR* qui finance des ressources nationales de calcul qui sont hébergées et opérées dans **trois centres de calcul** : le **CINES** (France Universités), l'**IDRIS** (CNRS) et le **TGCC** (CEA).



Type de service de calcul

Jean Zay A100 (GPU)

Quantité

100000

heures.GPU

✕ Annuler

+ Ajouter

▲ Avec la selection :



Exemple

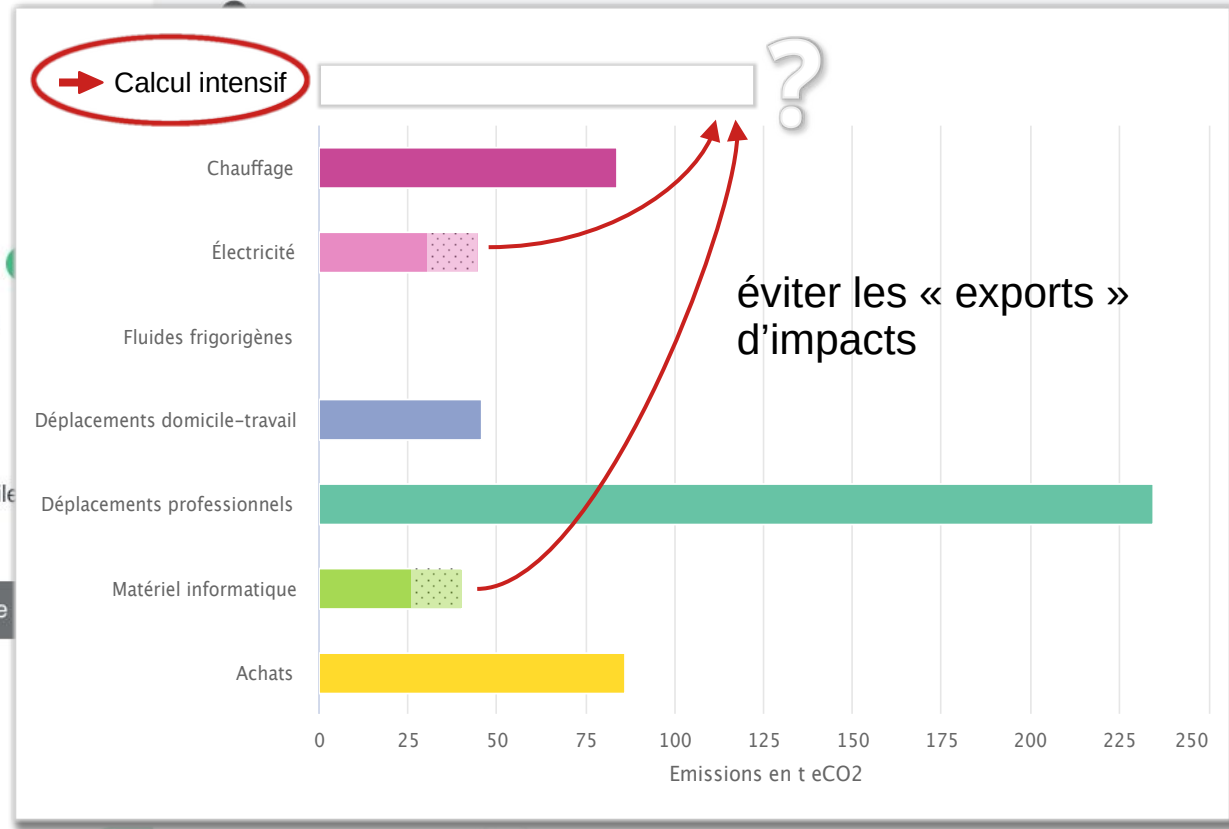
Bilan GES des laboratoires

LES DONNÉES

- Introduction
- Le périmètre
- Bâtiments
- Achats
- Déchets
- Matériel informatique
- Véhicules
- Missions
- Déplacements domicile
- Alimentation
- Activités de recherche

LES RÉSULTATS

- GHG Protocol
- Bilan réglementaire
- Empreinte environnementale
- Empreinte carbone & soumission



ette pratique
e matériels,
rastructures
s, etc.

aqueille des

Avec la selection :

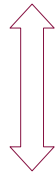
Finalités de la quantification

A chaque objectif...

- Informer les utilisateurs

→ Enclencher des mécanismes de **sobriété**

sobriété/frugalité : « redéfinir les usages,
réorienter les besoins, en lien
avec les enjeux planétaires »
renvoie à des normes sociales



efficacité/efficience : « rendre un même usage
avec un impact moindre,
optimiser les systèmes »

Quel(s) mécanisme(s) ?

Quel potentiel ?

Suffisant ?

Nécessaire ?

Ralentir d'action ?

Contre-productif ?

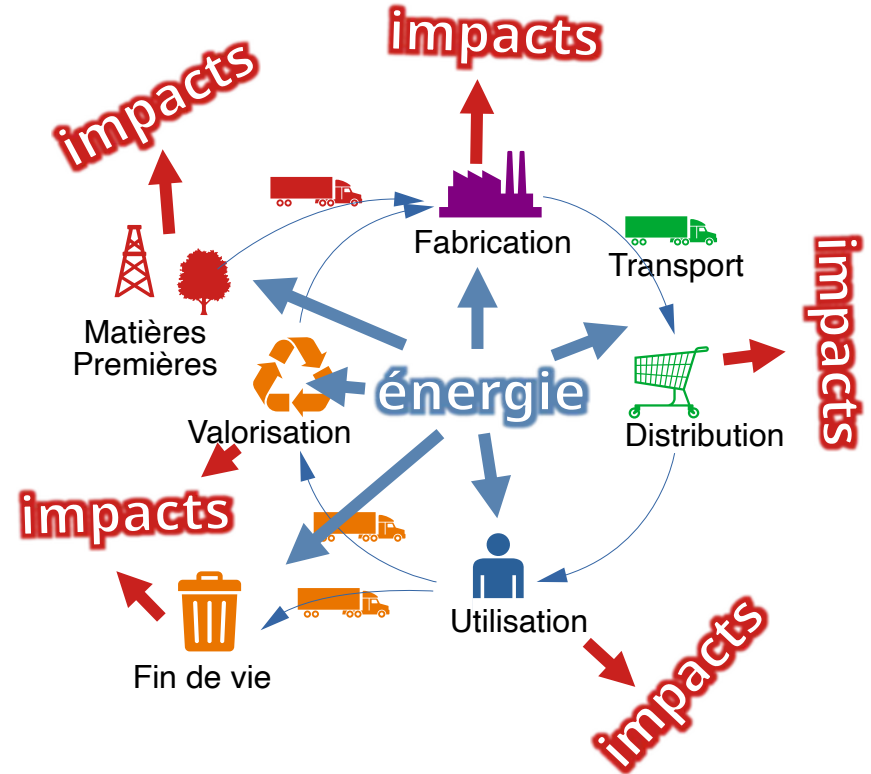
Réduire les émissions
& impacts globaux

→ Autres ?

Comment « quantifier » l'empreinte carbone *par utilisateur* d'un service de calcul ?

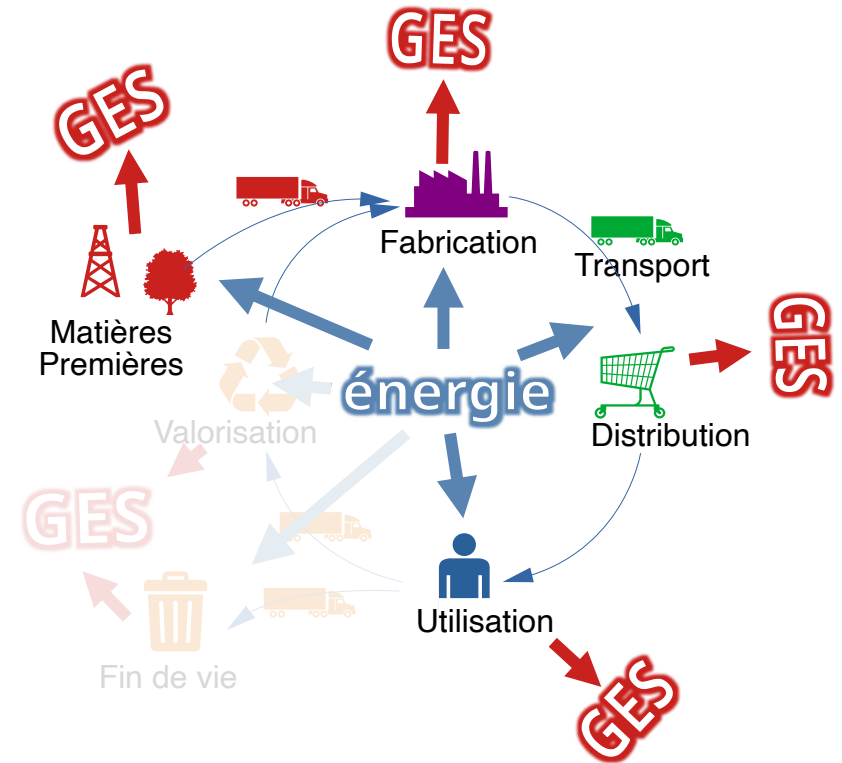
Méthodologie par
Analyse de Cycle de Vie Attributionnelle

Basée ACV



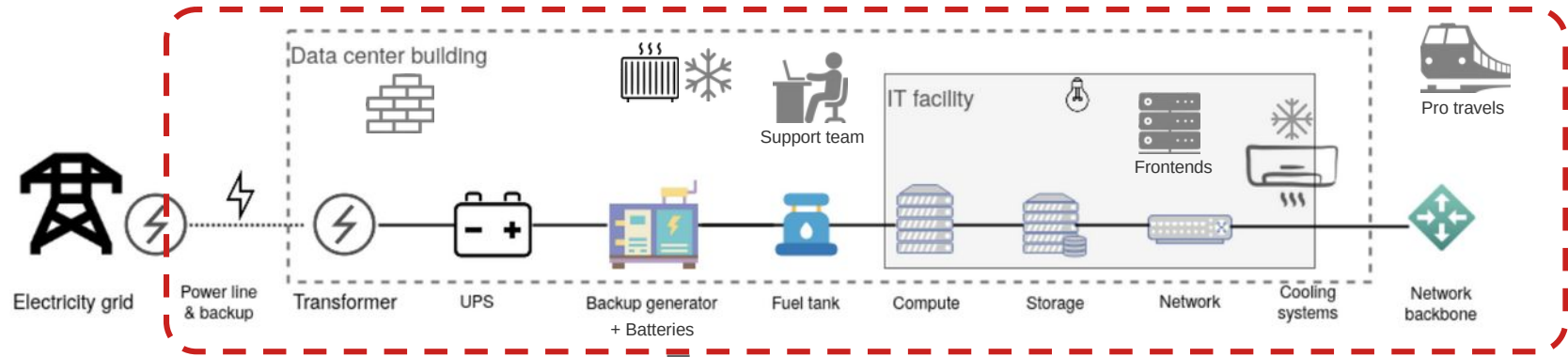
Basée ACV simplifiée

- GES (& consommation électrique)
- Ignore la fin de vie



ACV attributionnelle

1) Estimer l'empreinte GES du service (tCO_2e/an)



Adapted from B. Davy



2) Répartir les émissions entre les utilisateurs au prorata du « **volume de calculs** »

1 – Empreinte carbone d'un service

Pour une année

Par type de partition (ex., scalaire vs GPU) :

$$EC = \sum_X \left(\text{\%affectation}_X \left(\frac{GES_{fabrication\ X}}{durée\ de\ vie\ X} + \text{Consommation}_X \times FE_{élec} + \dots \right) \right)$$

Fabrication + Usage + autres



Clef d'allocation
ex. prorata de la
conso élec

2 – Répartition entre les utilisateurs

Pour une année

Clef de répartition ? Classiquement :

→ « heure.coeur » & « heure.GPU »

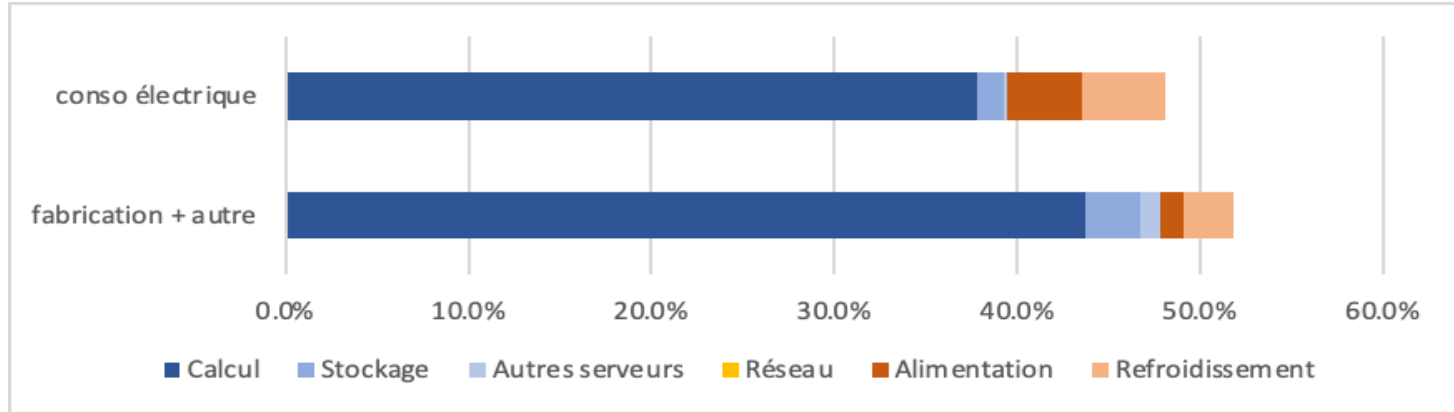
$$EC = \sum_X \%affectation_X \left(\frac{GES_{fabrication\ X}}{durée\ de\ vie_X} + Consommation_X \times FE_{élec} \right)$$

$$FE = \frac{EC}{nb\ heures.CPU} \longrightarrow E(user) = nb\ heures.CPU_{user} \times FE$$

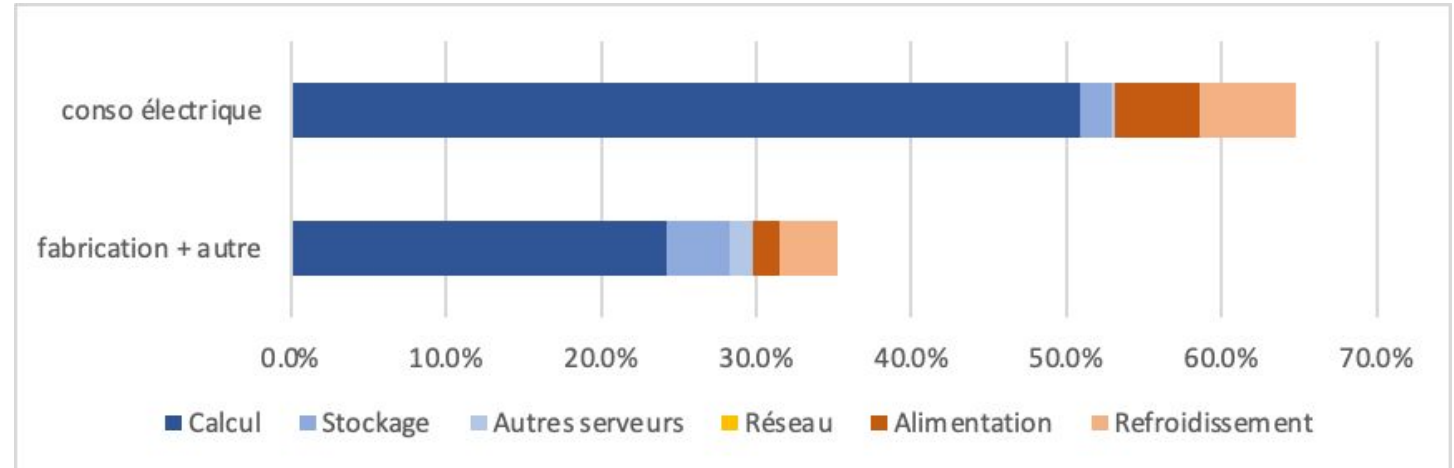
Facteur d'émission
[gCO2e/h.coeur]

Exemples (2020, en France)

CPU
 40 coeurs / noeud
 –
 ~1.5 gCO₂e/h.coeur



GPU
 4 GPUs / noeud
 –
 ~40 gCO₂e/h.GPU



Déconstruction de la méthode



ACV Simplifiée Attributionnelle

Pour une année

Clef de répartition ? Classiquement :

→ « heure.coeur » & « heure.GPU »



**Reflet de la
vérité terrain ?**

$$EC = \sum_X \%affectation_X \left(\frac{GES_{fabrication\ X}}{durée\ de\ vie_X} + Consommation_X \times FE_{élec} \right)$$

$$FE = \frac{EC}{nb\ heures.CPU}$$

$$E(user) = nb\ heures.CPU_{user} \times FE$$

Facteur d'émission
[gCO2e/h.coeur]

ACV Simplifiée Attributionnelle

Au delà des GES

- Épuisement des ressources
- Pollutions air, eaux, sols
- Éthiques, colonialisme
- Conflits d'accès à l'eau

$$EC = \sum_X \%affectation_X \left(\frac{GES_{fabrication\ X}}{durée\ de\ vie_X} + Consommation_X \times FE_{élec} \right)$$

$$FE = \frac{EC}{nb\ heures \cdot CPU}$$

Facteur d'émission
[gCO2e/h.coeur]

Paris sur le futur

Pour une année

Pourquoi pas 1 jour, 1 semaine, 1 mois, 2 ans ?

Réellement connue à sa fin de vie !

In 2024, 808 (among 1528) Cascale-Lake nodes and 216 (among 612) quad-V100 nodes were decommissioned after about 5 and 4 years respectively – instead of the assumption of a 6 year lifetime used to compute the emission factors – to release space and resources for newer H100-based nodes.

$$EC = \sum_X \%affectation_X \left(\frac{GES_{fabrication\ X}}{durée\ de\ vie\ X} + Consommation_X \times FE_{elec} \right)$$

$$FE = \frac{EC}{nb\ heures.\ CPU}$$

Réellement connues à la fin de la période !

Fabrication

Troncation

Construction des usines, bureaux
R&D, Marketing, voyages
d'affaires, ...
→ + ~40 % ?

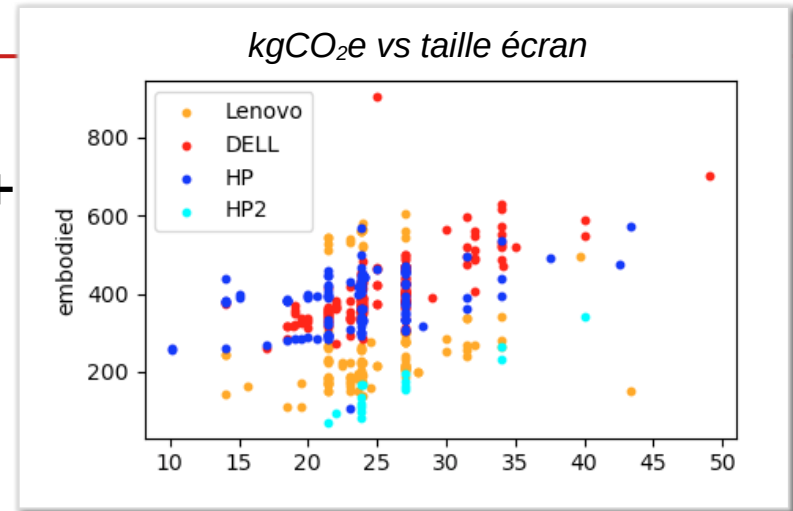
Incertitudes

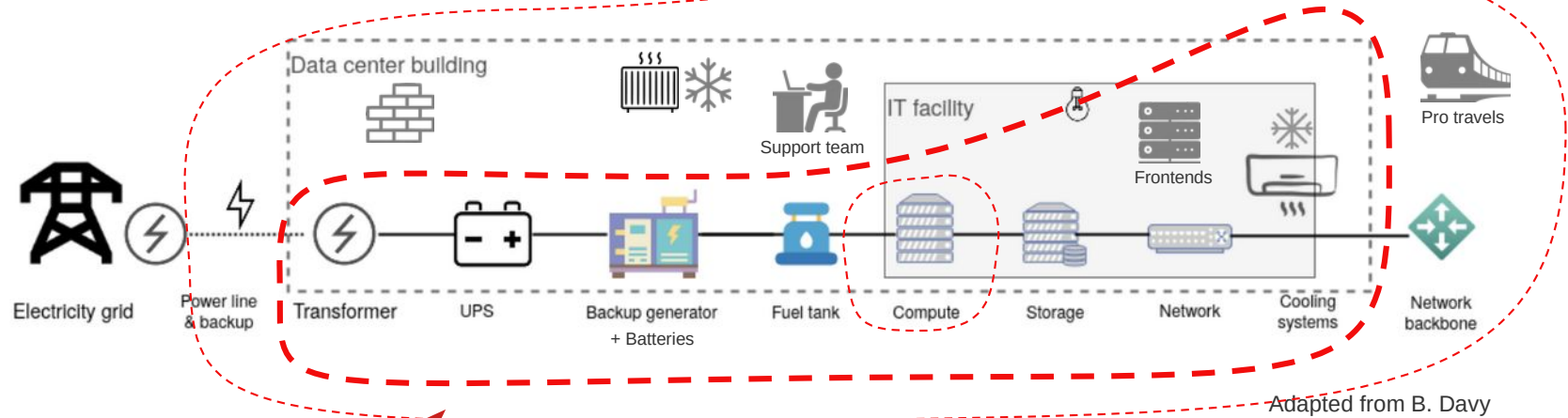
Configuration (CPUs, SSDs, GPUs, ...)
Manque de données
Manque de transparence
Méthodologique
ACV « de bureau »
Incompétence

$$EC = \sum_X \%affectation_X \left(\frac{GES_{fabrication\ X}}{durée\ de\ vie\ X} + \right)$$

Fin de vie

→ Très grosses incertitudes
→ Pas de « bonne » méthodo





Périmètre ?

$$EC = \sum_X \%affectation_X \left(\frac{GES_{fabrication\ X}}{durée\ de\ vie\ X} + Consommation_X \times FE_{élec} \right)$$

- choix dépend de la finalité
- ↔ efforts de collecte de données

Périmètre *(reco. Labos1.5 pour bilans GES)*

Obligatoire

- Équipements IT
 - Nœuds de calculs, Front-ends,
 - Réseau, Stockage (temporaire et long terme),
 - Serveurs annexes (web, stats...)
- Système d'alimentation
 - Alimentation, Groupe électrogène (& GNR),
 - Onduleurs, Batteries
- Système de refroidissement
 - Fuites des fluides frigorigènes

Consommation électrique
&
Fabrication

Périmètre *(reco. Labos1.5 pour bilans GES)*

A compter séparément

- Installation, maintenance
- Personnel affecté au service
 - Postes informatiques (conso+fabrication),
 - Chauffage/clim,
 - Missions et (déplacements pendulaires)
- Construction/entretien des bâtiments
 - Au prorata de la surface occupée, amortissement sur 50 ans

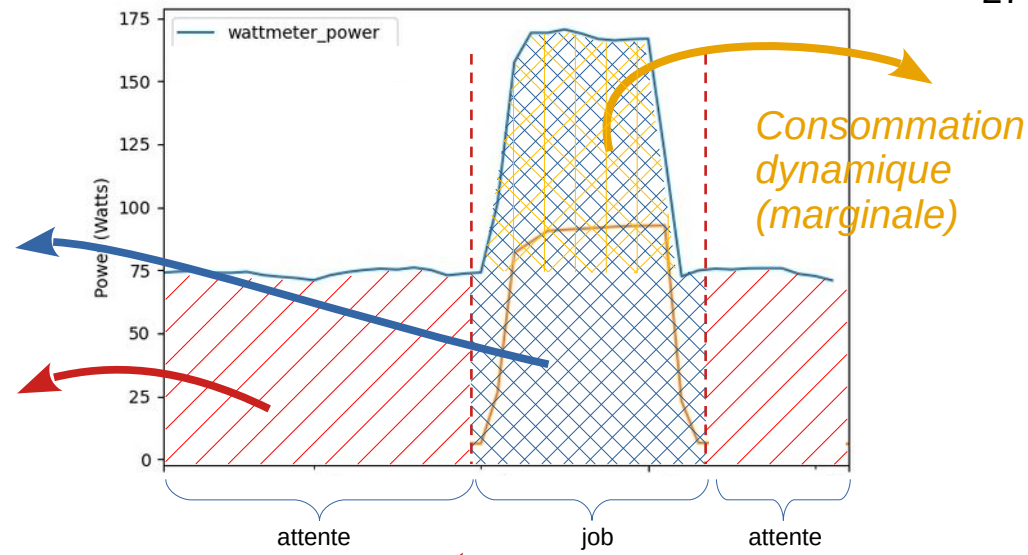
Hors périmètre

- Transfert de données
- Récupération de la chaleur fatale

(Non-)proportionnalité à l'usage ?

consommation « utile »

Conso statique = « gâchis »
Souvent oubliée !



$$EC = \sum_X \%affectation_X \left(\underbrace{\frac{GES_{fabrication\ X}}{durée\ de\ vie\ X}}_{= \text{Coûts fixes ? } \checkmark} + \underbrace{Consommation_X \times FE_{élec}}_{= \text{Proportionnelle à l'usage ? } \times}$$

$$FE = \frac{EC}{\underbrace{nb\ heures \cdot CPU}_{usage}} \approx \frac{E_{fabrication}}{nb\ heures \cdot CPU} + \times$$

Bilan intermédiaire

« $FE = x \text{ gCO}_2\text{e/h.coeur}$ »

- **Incertitudes** à toutes les étapes !
- Vision **tronquée** des impacts
- Pas de **choix « parfaits »**
- **Non-proportionnalité** des | émissions à l'usage
conso.
 - Émissions marginales = petite fraction du total
- Reflète | ~~une réalité physique~~
des règles comptables

Bilan intermédiaire

« $FE = x$ gCO₂e/h.coeur »

- OK pour des bilans GES
- OK si enclenche de la sobriété
- Quid des autres effets performatifs ?

Les « gCO₂/h.coeur » comme critère de choix d'un service ?

Exemple :

Service A
1.8 gCO₂e/h.coeur

VS

Service B
1.1 gCO₂e/h.coeur



→ Lequel vous choisissez pour votre prochain projet ?

- Chiffres comparables ? (même méthode, périmètre, base de données, etc.)
- D'où vient la différence ?

Les « gCO₂/h.coeur » comme critère de choix d'un service ?

Option 1 : B est plus récent (Moore/Koomey's laws)

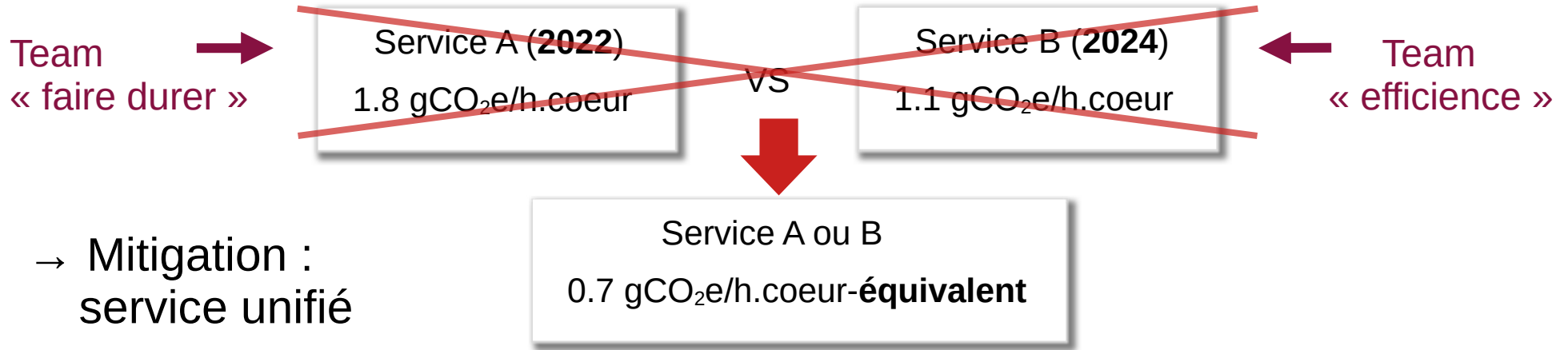


→ Tension entre :

- Utiliser des serveurs plus efficaces : impacts marginaux--
- Obsolescence ++ → renouvellement ++ → impacts fab. ++
- (*rend faux les FE...*)

Les « gCO₂/h.coeur » comme critère de choix d'un service ?

Option 1 : B est plus récent (Moore/Koomey's laws)



- Approche GENCI (edari.fr et GES1.5)
- Limites : ne passe pas à l'échelle, réalité physique --, opaque, source de confusions

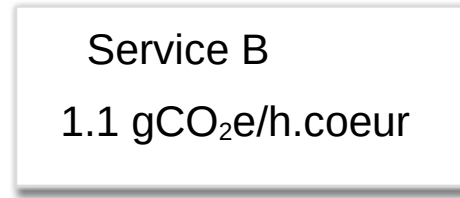
Les « gCO₂/h.coeur » comme critère de choix d'un service ?

Option 2 : A et B identiques, mais A est moins utilisé

Team
« laissés-pour-compte »



VS



Team
« Tirer la couverture à soi »

Rappel :

$$FE \approx \frac{E_{fabrication} + E_{conso\ statique}}{nb\ heures \cdot coeur} + \alpha_{conso\ dynamique}$$

- Mitigation : approche mutualisée

→ **FE contre productif pour la sélection d'un service**

Les « gCO₂/h.coeur » comme boussole pour réduire les impacts ?

Réduire les « gCO₂/h.coeur » d'un service c'est bien ?

- Q : Quid des impacts **absolus** ?

Deux options (non exclusives) :

$$EC = \sum_X \%affectation_X \left(\frac{GES_{fabrication\ X}}{durée\ de\ vie_X} + Consommation_X \times FE_{elec} \right)$$

$$FE = \frac{EC}{nb\ heures.CPU}$$

Les « gCO₂/h.coeur » comme boussole pour réduire les impacts ?

Option 1 : augmenter la durée d'utilisation

Impacts absolus : OK si continue de répondre à **un vrai besoin**
(jusqu'à un certain point)
 OK aussi si le service est délaissé

$$EC = \sum_X \%affectation_X \left(\frac{GES_{fabrication\ X}}{\text{durée de vie}_X} + Consommation_X \times FE_{elec} \right)$$

++

$$FE = \frac{EC}{nb\ heures.CPU}$$

-

Les « gCO₂/h.coeur » comme boussole pour réduire les impacts ?

Option 2 : augmenter le taux d'usage

Impacts absolus : ++

$$EC = \sum_X \%affectation_X \left(\frac{GES_{fabrication\ X}}{durée\ de\ vie\ X} + \boxed{Consommation_X} \times FE_{elec} \right)$$

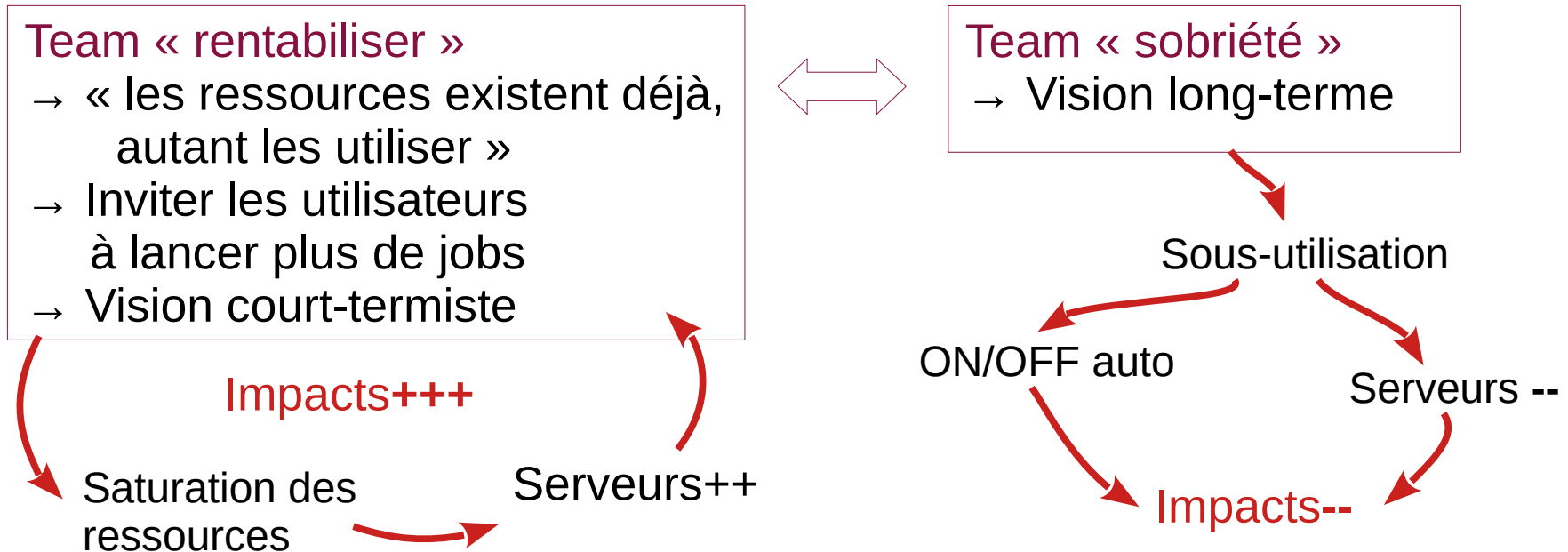
++

$$FE = \frac{\boxed{EC}^+}{\boxed{nb\ heures.\ CPU}^{+++}}$$

Les « gCO₂/h.coeur » comme boussole pour réduire les impacts ?

Option 2 : augmenter le taux d'usage

→ **dilemme des « coûts irrécupérables »**



Team « sobriété » ?

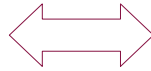
→ Élargir le périmètre d'analyse

Projet de recherche

- Conception/dév. des codes
- Acquisition/gestion des données
- ...



Empreinte GES
heures de calcul



Retombées des recherches

- Impacts sur l'environnement + / -
- Impacts sur la société ++ / -

Conclusions

« $FE = x \text{ gCO}_2\text{e/h.coeur}$ » un sujet complexe

→ la « vérité terrain » n'existe pas

→ /!\ aux mésusage des indicateurs

→ tensions entre indicateurs et leviers

→ questions et dilemmes

→ individualise les responsabilités

~~Renoncer à toute tentative de quantification ?~~

Proposition 1/2

Affronter la complexité avec un jeu d'indicateurs

- FE marginal → impact de lancer ou non un job à court terme
- FE attributionnelle → pour des bilans *a posteriori*
- Impacts globaux → c'est ça qui compte vraiment !

→ Comment s'en emparer (correctement) sans être expert ?

Proposition 2/2

Penser global et collectif !

- Beaucoup de dilemmes ne peuvent être résolus individuellement
- Gros des impacts à la prise de décision d'installer un nouveau lot de serveur
 - Impliquer les utilisateurs dans cette prise de décision
 - Débats éclairés (estimations des impacts des différents postes)