



Mesurer l'impact environnemental du numérique : Pourquoi, comment et avec quelles limites ?

Lier industriels & académiques autour de communs numériques

David & Eric @Boavizta, 17 Novembre 2022

Sommaire



1. **Introduction** : Qui est Boavizta ?
2. Pourquoi faire de la mesure un commun ?
3. Périmètre de notre approche
4. Processus de création de communs à travers trois exemples
5. Approche réflexive
6. **Ouverture** : Les difficultés d'animer une communauté d'experts de nature hétérogène



Qui est Boavizta ?

Qui sommes-nous ?



David Ekchajzer

Préparation d'un
doctorat sur les impacts
environnementaux
systémiques du
numérique



Eric Fourboul

Formateur et
consultant en
analyse de cycle
de vie du
numérique

Boavizta – évaluation d'impacts environnementaux de l'IT



Groupe de travail / 170+ membres

Entreprises
Chercheurs
Freelances

Thématiques

Référentiel de données
Mesure du cloud
Méthodes de calcul
Convictions top management
Outils open-source



<https://boavizta.org/>

Boavizta – Missions & valeurs



Charte de participation au projet Boavizta

Version 0.9, dernière mise à jour le 25/11/20
Contact : Eric Fourboul / eric@boavizta.com

La présente charte a pour objet la formalisation des valeurs et des objectifs qui sous-tendent le projet Boavizta, ainsi que des modalités de collaboration entre les différents participants au projet.

Vision et objectifs du projet

Le numérique, lourd d'impacts pour l'environnement

Le **changement climatique** et ses conséquences constituent l'un des enjeux majeurs de notre siècle et posent des risques cruciaux pour l'avenir de l'espèce humaine sur Terre : l'absence d'actions visant à diminuer dès maintenant les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique aura de manière certaine des conséquences dramatiques sur la santé, le bien-être voire la survie de tout ou partie de la population humaine. Or le **secteur du numérique** est de tous les secteurs émetteurs de gaz à effet de serre celui qui **progresses le plus vite** : il pourrait atteindre 8% des émissions totales de GES en 2025.

Indépendamment de la question climatique, le numérique est responsable d'une large partie de l'**exploitation de ressources naturelles non renouvelables**, notamment certains métaux rares ; outre les risques de **pénurie de ressources** que la consommation croissante d'équipements informatiques fait courir, la fabrication de ces mêmes équipements entraîne des **impacts environnementaux et sociaux lourdement négatifs** tout au long de la chaîne de valeur : pollution des milieux naturels, épuisement des réserves en eau, destruction de la biodiversité, utilisation de main d'œuvre clandestine et/ou infantile, exposition des travailleurs à des substances toxiques, conflits armés liés au contrôle des ressources...

Les collaborateurs du projet Boavizta reconnaissent l'importance des impacts environnementaux et humains du secteur du numérique et le caractère crucial de la **nécessité d'agir pour limiter ces impacts au plus vite**, en particulier au regard de la croissance extrêmement rapide des équipements et des usages. **Ils se donnent par conséquent pour objectif d'élaborer des solutions permettant à toute organisation de piloter et réduire l'impact environnemental et social de son utilisation du numérique.**

Objectifs du projet

Les collaborateurs du projet Boavizta souhaitent que d'ici à quelques années, toutes les organisations aient mis en place un **système de pilotage et de réduction des impacts environnementaux et sociaux de leur empreinte numérique**, notamment en matière d'émissions de GES et d'exploitation des ressources naturelles non renouvelables.

A cet effet, ils se donnent notamment pour mission :

Missions:

- développer des **communs** ;
- **fédérer** les acteurs de l'écosystème ;
- obtenir des résultats concrets et un **impact** tangible ;
- faciliter l'**aide** de pair à pair ;

Valeurs:

- le **partage** des données, des outils et des idées ;
- la **rigueur** scientifique ;
- la **confiance** et la **coopération** entre les différents acteurs du groupe de travail ;



Pourquoi faire de la mesure un commun ?

Des impacts en forte croissance



2020 : **2,1 to 3,9%**

2025 : **4 to 8%**



Des impacts difficiles à estimer

- Forte mutualisation
- Sentiment d'immatérialité
- Manque de transparence
- Multi-périmètres
- Multi-critères
- Multi-étapes

Parce que c'est une nécessité démocratique



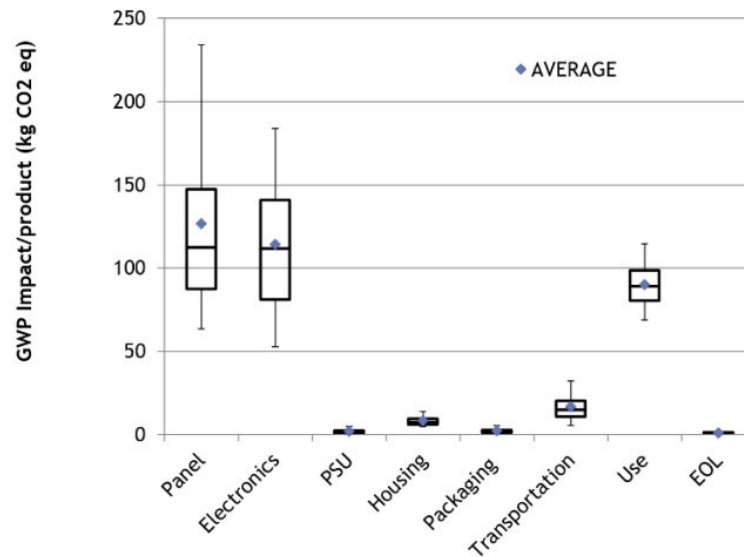
"On va envoyer un mail avec une pièce jointe rigolote et on va consommer beaucoup d'énergie" *Agnès Pannier-Runacher*

Parce que les mesures sont de mauvaise qualité



Impact carbone moyen des écrans d'ordinateurs (kgCO2e/inch)	
Dell (PAIA)	11,4 to 26,7
Lenovo (PAIA)	5,7 to 24,5
HP (Other)	3,3 to 8,6
NegaOctet	2,94
Base Impacts (ADEME)	≈ 2,7

Dell E2219HN Monitor



Des maaaaaaarges d'erreurs

○ Parce que les mesures sont peu transparentes et peu fiables



R740 Product Carbon Footprint	Emissions	R740 Life Cycle Assessment (adapté)	Emissions
32 GB Memory		1 x 32GB DIMM	44
2 x 300GB 2,5" HDD 1 x 1TB 2,5" HDD		2 x 400GB 2,5" SSD + 1 x 1.2TB 2,5" HDD	140
2 CPUs		2 x Xeon CPUs with housing	47
		Other (chassis, PSU, mainboard, cards, etc.)	265
Total	1313	Total	496





Parce que le chemin est plus important que l'arrivée



Quelques bénéfices de la démarche de mesure indépendants du résultat :

- Expliquer les chiffres
- Stimuler l'action collective
- Comprendre les dynamiques d'impacts
- Comprendre les postes d'impacts
- Questionner les résultats existants
- ...

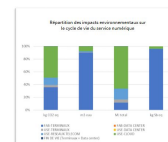
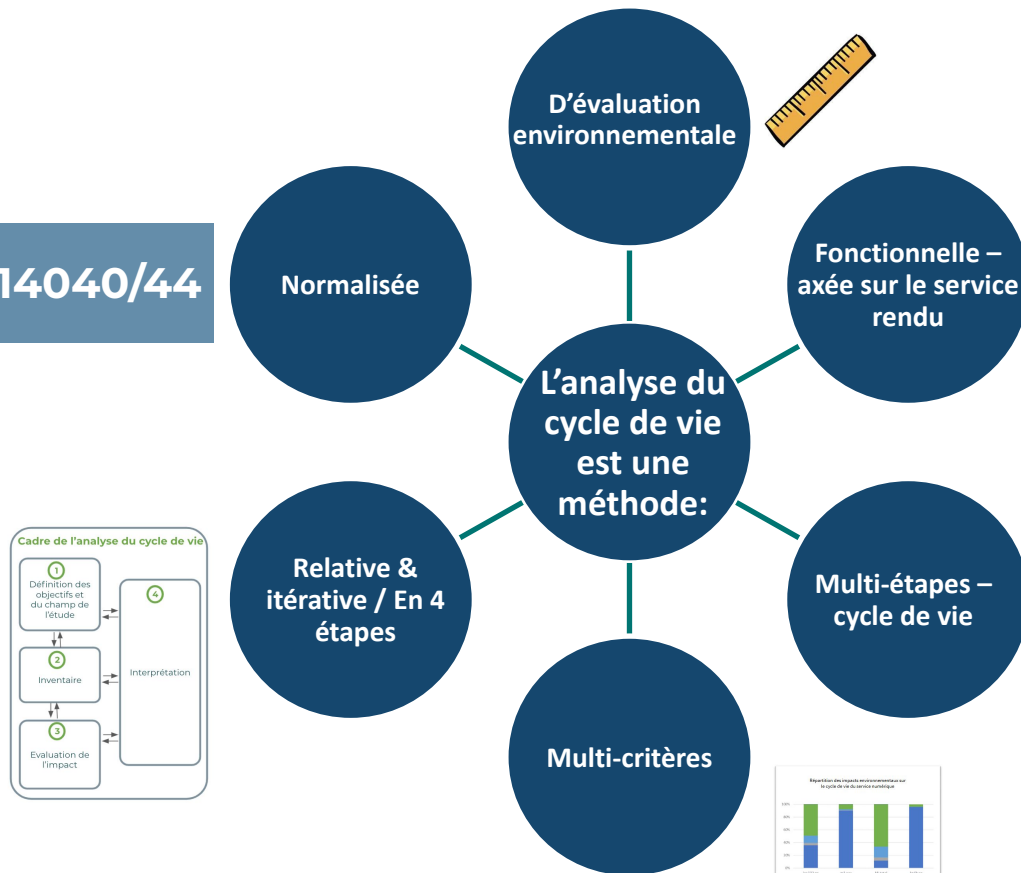


Périmètre de notre approche

Se baser sur les fondamentaux de l'ACV



ISO 14040/44



Multi-étapes



D'un point de vue produit:



Note: le bilan carbone est aussi une approche cycle de vie

Prise en compte de toutes les étapes du cycle de vie, *du berceau à la tombe* :

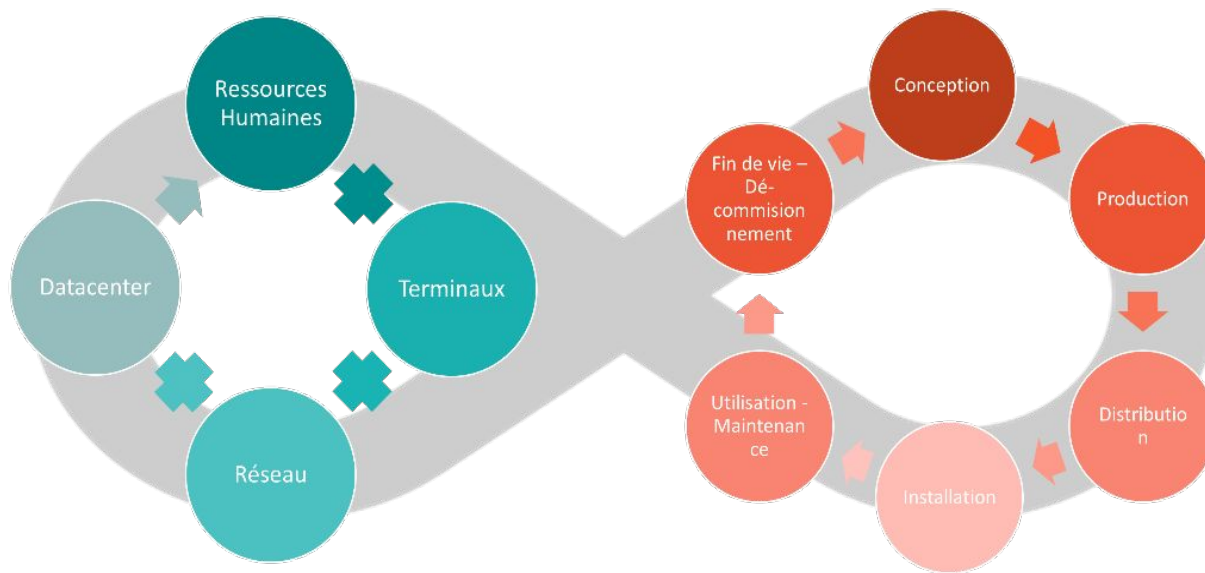
- extraction des ressources & fabrication
- transport & distribution
- utilisation
- fin de vie

Exemple: Plus de 80% de l'empreinte environnementale des smartphones est lié à la phase de fabrication

Multi-étapes



D'un point de vue service numérique:

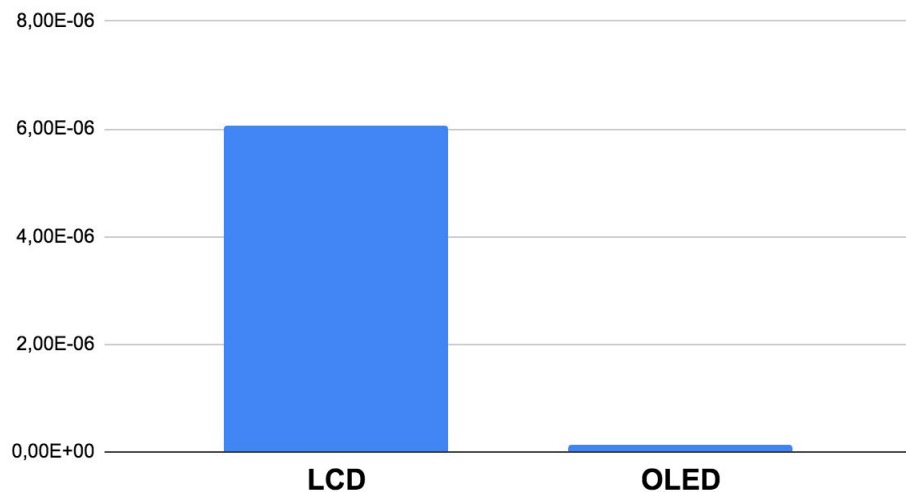


Copyright DDemain

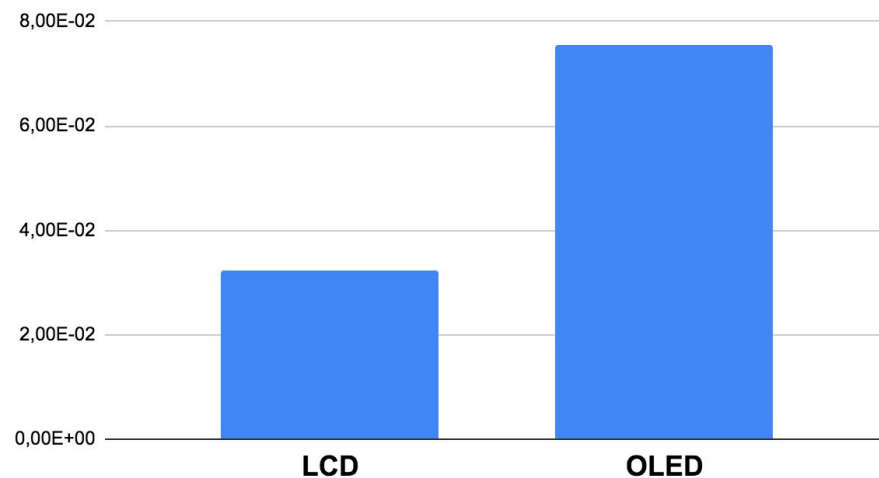
Multi-critères



Impact ADP (kg SB eq) - LCD vs OLED



Impact GWP (kg CO2 eq) - LCD vs OLED



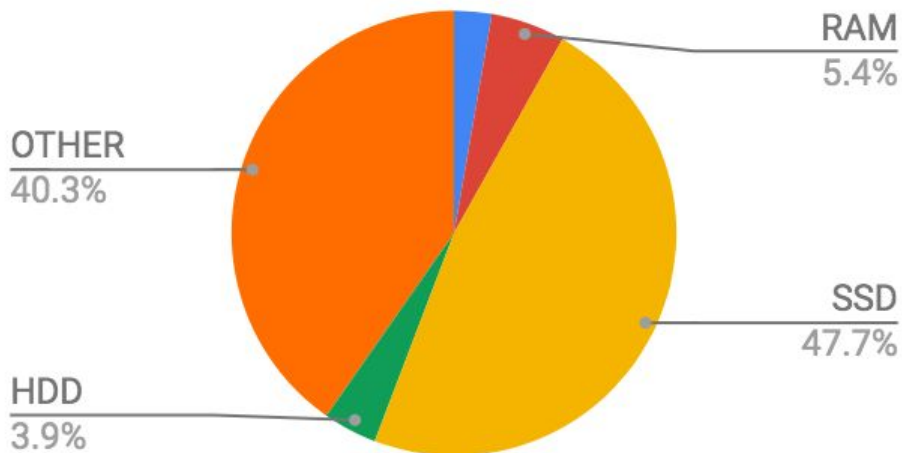
Référence: formation ACV DDomain/TiDE/Hubblo

Multi-critères

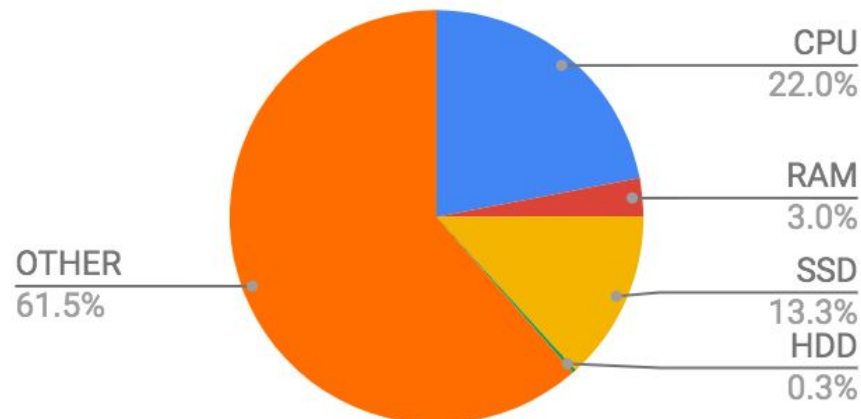


Impacts production serveur moyen

GWP (kgCO₂eq)



ADP (kgSBeq)



Référence: <https://www.umweltbundesamt.de/> & Boavizta

Vers une approche systémique



- Debunker les allégations sur les effets dits positifs



- Prendre en compte et vulgariser les effets indirects



Processus de création de communs



Exemple 1 : Référentiel open-data des données constructeurs

Identification de sources de données constructeurs



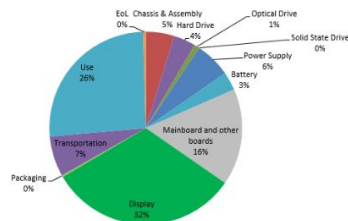
Lenovo Product Carbon Footprint (PCF) Information Sheet

PC/Notebook/Monitor/Tablet

Commercial Name	Lenovo E41-45	
Model Number	81BK, 82BF	
Issue Date	2020/03/17	

Product Environmental Attributes

(a) Product Carbon Footprint Value:	336 kg of CO ₂ e (see Note 1 below)
(b) Product Picture:	(c) Life Cycle Detail by Component & Life Stage (Pie Chart):



Note 1:

Product Carbon Footprint (PCF)

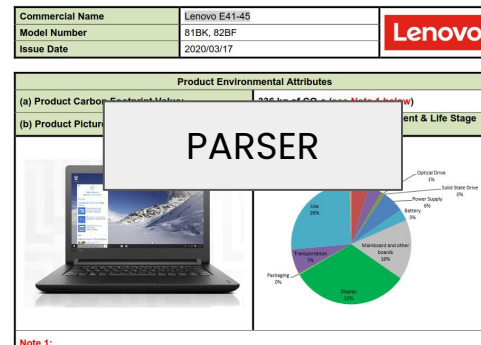
Déclaration environnementale (GES) des entreprises sur leurs produits

Industrialisation de la collecte



Site constructeur

Lenovo Product Carbon Footprint (PCF) Information Sheet PC/Notebook/Monitor/Tablet



Fiche PDF
constructeur

1.	manufacturer	name	category	subcategory	gwp_total	gwp_use_ratio	ye
2.	Apple	13-inch MacBook Air (M1 CPU) 256GB - 2020	Workplace	Laptop	161	0.1500	
3.	Apple	13-inch MacBook Air (M1 CPU) 512GB - 2020	Workplace	Laptop	161	0.1500	
4.	Apple	13-inch MacBook Air with Retina display (1.1GHz dual-core CPU) 256GB - 2020	Workplace	Laptop	174	0.1500	
5.	Apple	13-inch MacBook Air with Retina display (1.1GHz quad-core CPU) 512GB - 2020	Workplace	Laptop	202	0.1500	
6.	Apple	13-inch MacBook Pro (1.4GHz quad-core CPU) 256GB - 2020	Workplace	Laptop	217	0.1700	
7.	Apple	13-inch MacBook Pro (2.0GHz quad-core CPU) 512GB - 2020	Workplace	Laptop	251	0.1700	
8.	Apple	13-inch MacBook Pro (Four Thunderbolt 3 ports) 256GB - 2020	Workplace	Laptop	298	0.1900	
9.	Apple	13-inch MacBook Pro (Four Thunderbolt 3 ports) 512GB - 2020	Workplace	Laptop	251	0.1900	
10.	Apple	13-inch MacBook Pro (M1 CPU) 256GB - 2020	Workplace	Laptop	185	0.1900	
11.	Apple	13-inch MacBook Pro (M1 CPU) 512GB - 2020	Workplace	Laptop	207	0.1900	
12.	Apple	13-inch MacBook Pro (Two Thunderbolt 3 ports) 256GB - 2020	Workplace	Laptop	212	0.1900	
13.	Apple	13-inch MacBook Pro (Two Thunderbolt 3 ports) 512GB - 2020	Workplace	Laptop	233	0.1900	
14.	Apple	13-inch MacBook Pro with Retina display (2.7GHz CPU) 128GB - 2015	Workplace	Laptop	439	0.1200	
15.	Apple	14-inch MacBook Pro (M1 Pro 10-core CPU and 16-core GPU) 1TB - 2021	Workplace	Laptop	307	0.22	
16.	Apple	14-inch MacBook Pro (M1 Pro 8-core CPU and 14-core GPU) 512GB - 2021	Workplace	Laptop	271	0.22	

REFERENTIEL

Github
Boavizta

Ouverture au public : Datavizta



Reset filtres

Fabricant

Apple

Dell

Lenovo

HP

Lexmark

Seagate

Catégorie

Workplace

Datacenter

Sous-catégorie

Laptop

Monitor

Smartphone

Desktop

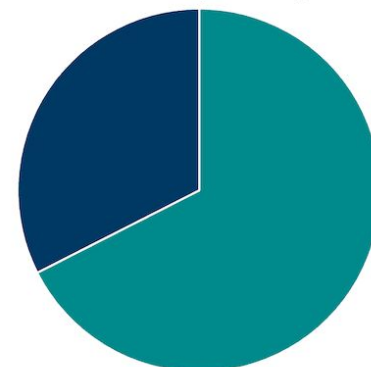
Server

Tablet

Printer

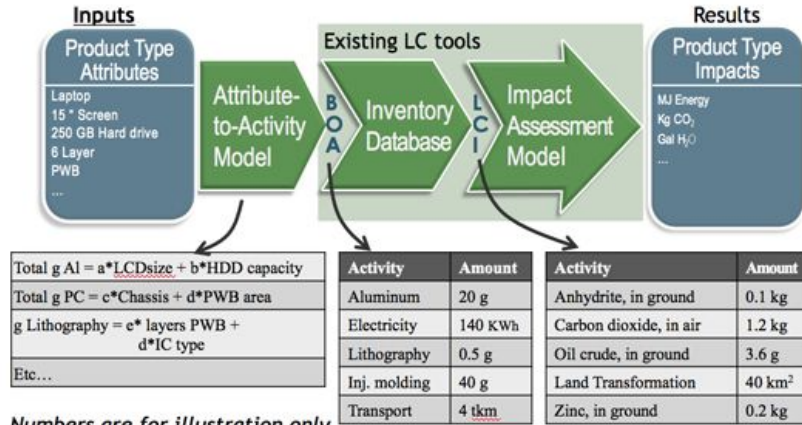
Fabricant	Nom	Catégorie	Sous-ca...	Date Fabrica.
Apple	13-inch MacBook Air with Retina display	Workplace	Laptop	March 20...
Apple	13-inch MacBook Pro Four Thunderbolt 3 ports with ...	Workplace	Laptop	November 2
Apple	13-inch MacBook Pro Four Thunderbolt 3 ports with ...	Workplace	Laptop	November 2
Apple	13-inch MacBook Pro M1. 2020 with 256GB	Workplace	Laptop	November 2
Apple	13-inch MacBook Pro M1. 2020 with 512GB	Workplace	Laptop	November 2
Apple	13-inch MacBook Pro	Workplace	Laptop	May 202
Apple	13-inch MacBook Pro	Workplace	Laptop	2020
Apple	14-inch MacBook Pro 1TB	Workplace	Laptop	October 20
Apple	14-inch MacBook Pro 512GB	Workplace	Laptop	October 20
Apple	15-inch MacBook Pro	Workplace	Laptop	November 2019
Apple	15-inch MacBook Pro	Workplace	Laptop	November 2019

Emissions de GES
1139 kgCO₂eq
Moyenne calculée sur 1064 équipements de multiples catégories
Durée de vie moyenne: 4.56 an(s)



Scope 2 : 769 kgCO₂eq (phase d'utilisation)
Scope 3 : 370 kgCO₂eq (phases de fabrication, transport et fin de vi

Compréhension des méthodes et de ses limites



Numbers are for illustration only

Limites

- Non documenté
- Non auditable
- Pas de traçabilité
- Communication des hypothèses limitée
- Hypothèses variables

Product Attribute to Impact Algorithm (PAIA)

Marque MIT

Collaboration avec eco-info (ecodiag)



- Amélioration du processus de collecte
- Nouvelles sources de données
- Convergence sur les limites importantes de ces données

The screenshot shows the Ecodiag web application interface. At the top, there is a header with the Ecodiag logo and a link to 'À propos'. Below the header, there is a section titled 'i Règle de calcul' with the text 'total fabrication & transport' and the formula $\sum_i N_i \text{ facteur}_i$. The main content area is divided into two tabs: 'Équipement' and 'Options'. The 'Équipement' tab is active, showing a 'Synthèse globale' section with a dropdown menu and a trash icon. Below this, there are input fields for 'Serveurs : 0', 'PC fixes : 0', 'PC portables : 0', 'Écrans : 0', and 'Autres : 0'. To the right of these fields is a dashed box with an upload icon and the text 'Téléverser un fichier (.csv)'. Below this is a section titled 'Outils et options' with a button 'Simplifier la table'. At the bottom, there is a table with columns 'Validité', 'Type', 'Modèle', 'Quantité', and 'kgCO2e'. The table contains four rows of equipment data, each with a 'Validé' status, a 'Type' (GPU puissant, PC fixe sans écran, PC portable, Écran), a 'Modèle' (Modèle par défaut), and a 'Quantité' of 0. At the bottom of the table, there is a button 'ajouter un élément'. Below the table, there is a summary line: 'Total CO2e (fabrication et transport) : 0 kgCO2e'. At the very bottom, there is a footer with the text 'EcoDiag version 2022-10-04-b7a0033 - un service ecoinfo.'

Les difficultés à communiquer les limites



⇒ Contributeur

“J’aimerais ajouter une fonctionnalité de comparaison” ⇒ Les fiches ne sont pas comparables

⇒ Utilisateurs entreprises

“Je voudrais utiliser le référentiel dans un outil pour mesurer les impacts d’un parc informatique” ⇒ Les fiches ne peuvent pas être agrégées

⇒ Grand Public

“Avant d’acheter/choisir un équipement, je voudrais comparer l’impact carbone de 2 équipements de la même catégorie.” ⇒ Les fiches ne sont pas comparables



Exemple 2 : Méthode ouverte pour l'évaluation des impacts de la fabrication des serveurs

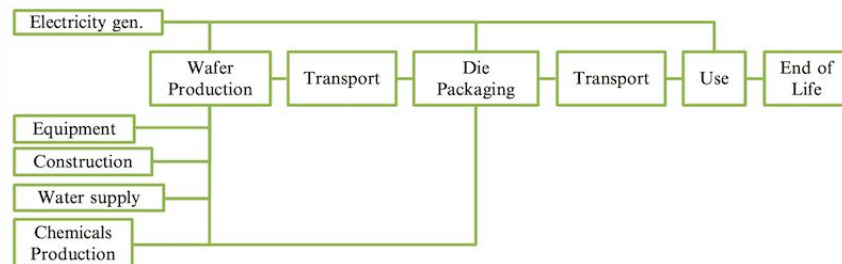
Une problématique industrielle



⇒ **Besoins d'une évaluation bottom-up pour comprendre l'impact de chaque composant d'un serveur**

⇒ **Des indices dans la littérature scientifique :**

- l'importance des phases de fabrication des "wafers" et d'assemblage/conditionnement des puces
- la convergence des résultats pour les différents types de composants électroniques : CMOS, mémoire flash et DRAM



Etapas du cycle de vie d'un circuit intégré - Sarah Boyd

⇒ **Principaux domaines de recherche à explorer :**

- un moyen d'estimer la surface de die (c'est-à-dire de la puce électronique) à partir des caractéristiques techniques des composants.
- facteurs d'impacts multicritères au niveau des composants et de la surface de die

Production d'une méthode actionnable



Abschlussbericht

Green Cloud Computing

Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu
Umweltwirkungen des Cloud Computing

Von:

Jens Gröger, Ran Liu
Öko-Institut e.V., Berlin
Dr. Lutz Stobbe, Jan Druschke, Nikolai Richter
Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM), Berlin

Herausgeber:
Umweltbundesamt

L'étude de l'Umweltbundesamt nous a donné une première version des formules que nous recherchions :

$f(\text{tech characteristics}) = \text{die surface}$
 $g(\text{die surface}) = \text{multi-criteria impact}$

Pour la production de "wafers", sur la base des données 2017 publiées par Siltronic et Sumco (15 et 28 % du marché).

Pour la fabrication de composants :

- Pour les CPU, sur la base des données de fabrication d'Intel Xeon (plaquettes de 300 mm et technologie 14nm).
- Pour les composants de stockage RAM et SSD (nand), l'étude s'appuie sur des données déjà utilisées dans des études précédentes (Schödwel et al. (2018), Prakash et al. (2013)).

Component	Unit	ADP (kgSbeq)	GWP (kgCO2eq)	PE (MJ)
CPU Base	Unit	2.04E-02	9.14	156.00
CPU Die	cm2	5.80E-07	1.97	26.50
RAM Base	Unit	1.69E-03	5.22	74.00
RAM Die	cm2	6.30E-05	2.20	27.30
SSD Base	Unit	5.63E-04	6.34	76.90
SSD Die	cm2	6.30E-05	2.20	27.30
HDD	Unit	2.50E-04	31.10	276.00
Motherboard	Unit	3.69E-03	66.10	836.00
Rack Server	Unit	2.02E-02	150.00	2 200.00
Blade Enclosure	Unit	4.32E-01	880.00	12 700.00
Blade Server	Unit	6.72E-04	30.90	435.00
Server Assembly	Unit	1.41E-06	6.68	68.60
Power Unit	Supply kg	8.30E-03	24.30	352.00

Production d'une méthode actionnable



Storage density for RAM

Manufacturer	Architecture	Go/cm2
Samsung	30nm	0.625
Samsung	25nm	1.25
Samsung	20nm	1.75
Samsung	18nm	2.38
SK hynix	30nm	0.750
SK hynix	26nm	1.00
SK hynix	21nm	1.31
SK hynix	21nm	1.88
Micron	30nm	0.750
Micron	30nm	0.875
Micron	20nm	1.13
Micron	20nm	1.13

Storage density for SSD

Manufacturer	Layers	Bits/cell	Nand type	Storage density (Go/mm2)	Year
Samsung	32	3	TLC	1.9E-01	2015
Samsung	36	3	TLC	2.3E-01	2016
Samsung	48	3	TLC	3.3E-01	2017
Samsung	64	3	TLC	4.1E-01	2018
Samsung	96	3	TLC	5.7E-01	2019
Samsung	64	4	TLC	7.1E-01	2020
Toshiba/WD	48	3	TLC	3.10E-01	2016
Toshiba/WD	64	3	TLC	4.55E-01	2017
Toshiba/WD	72	3	TLC	4.90E-01	2018
Toshiba/WD	96	3	TLC	7.61E-01	2019
Micron/Intel	36	3	TLC	2.85E-01	2016
Micron/Intel	64	3	TLC	5.50E-01	2017
Micron/Intel	72	3	TLC	5.93E-01	2018
Micron/Intel	96	3	TLC	7.83E-01	2019
Micron/Intel	64	4	QLC	8.16E-01	2020

Die size /core for CPU

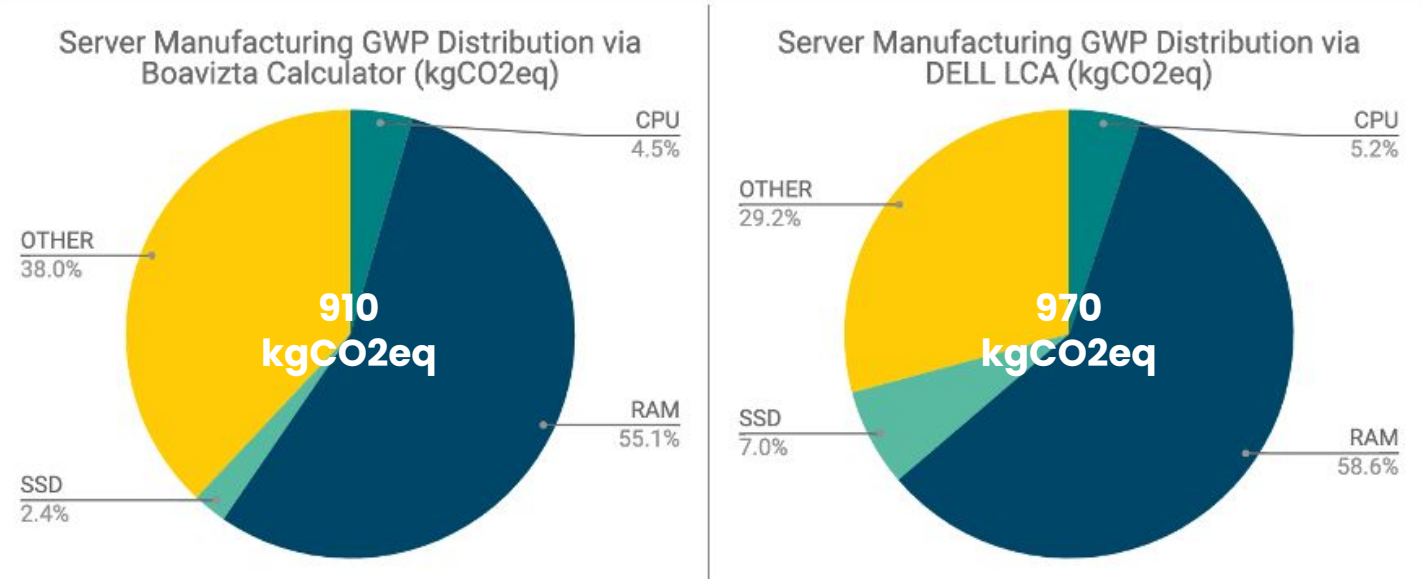
CPU Family	Introduction Year	Process (nm)	Die size (mm2)	Core Number	Size/Core (mm2)
Skylake	2017	14	694	28	24.8
Skylake	2017	14	485	18	26.9
Skylake	2017	14	325	10	32.5
Coffee Lake	2017	14	149	6	24.8
Coffee Lake	2017	14	174	8	21.8
Broadwell	2014	14	456	24	19.0
Broadwell	2014	14	306	14	21.9
Broadwell	2014	14	246	10	24.6
Haswell	2013	22	622	18	34.6
Ivy Bridge	2011	22	160	4	40.0
Ivy Bridge	2011	22	257	6	42.8
Ivy Bridge	2011	22	341	10	34.1
Ivy Bridge	2011	22	541	15	36.1
Sandy Bridge	2010	32	216	4	54.0

Production d'une méthode actionnable



Retour sur le cas "DELL R740" !

OK !



Comparaison des résultats entre l'ACV Dell et les résultats des formules Boavizta

Mise à disposition via une API

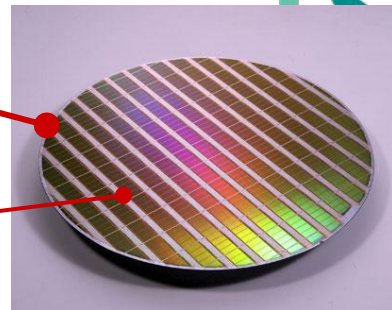
Données issues de calculs
bottom-up,
basés sur l'impact d'une die 🧪

<https://api.boavizta.org>

<https://doc.api.boavizta.org>

wafer

die



Phases du cycle de vie :

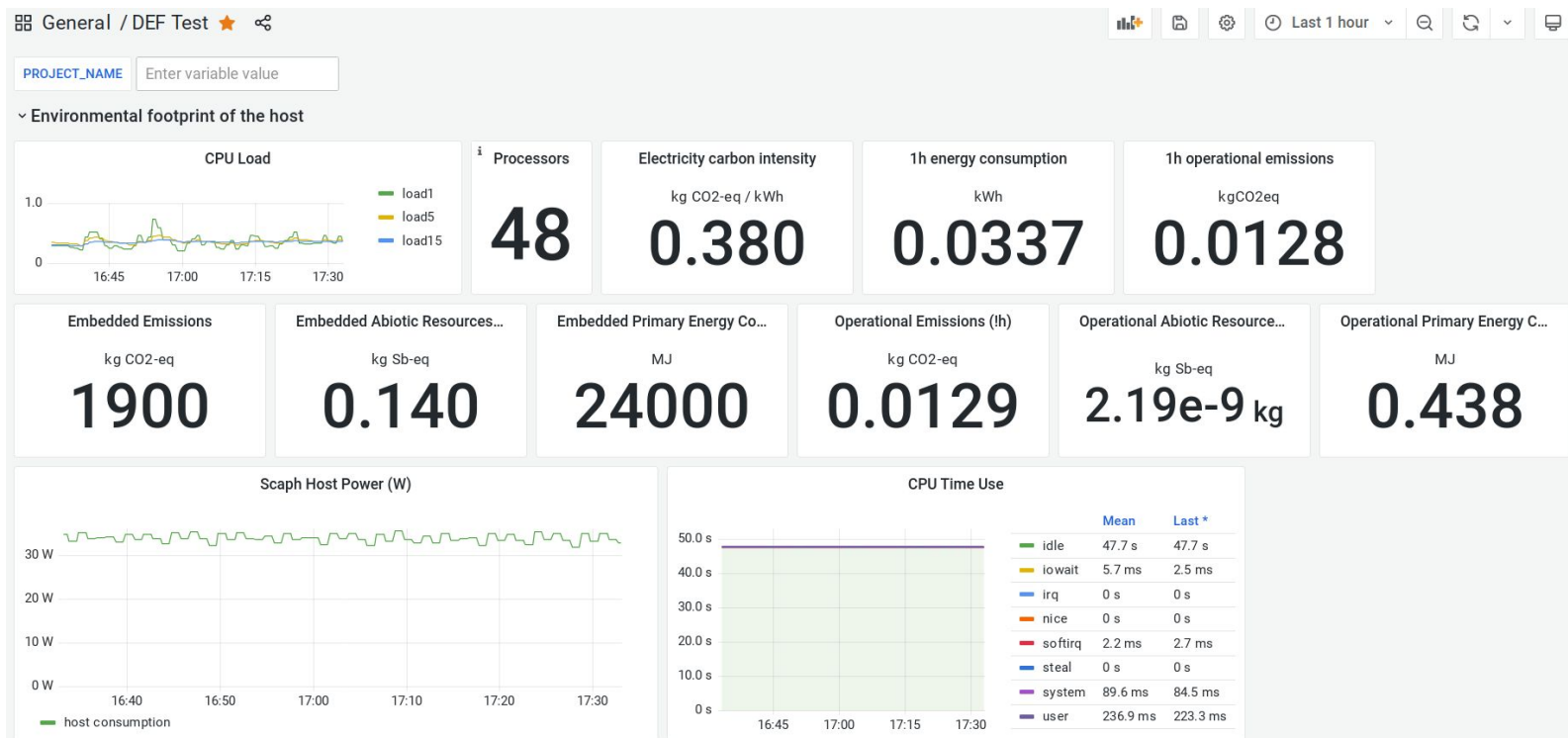
- 🪛 extraction ✓
- 👷 fabrication ✓
- 🚚 transport/installation ✗
- ⚡ usage ✓
- ♻️ fin de vie ✗



Hypothèses d'usage
(consommation d'énergie)

Inventaire
(équipements et composants)
à prendre en charge

Donner accès aux acteurs de l'infra : Boagent



Souhait de collaboration avec l'UC Louvain



- ⇒ Intégration du travail de revue de la littérature des facteurs d'impacts des semi-conducteurs
- ⇒ Intégration de leur approche screening pour l'IOT
- ⇒ Collaboration autour des impacts du réseau



Exemple 3 : Collecte collaborative de la consommation électrique des serveurs (Energizta)



Une problématique scientifique

⇒ INRIA Lyon : comparaison des wattmetres logiciel

⇒ INRIA Lille : PowerAPI

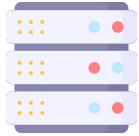
⇒ UPPA : PowerJoular



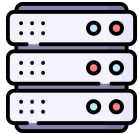
Une problématique industrielle

- ⇒ Modéliser les impacts de serveurs sans accès physique
- ⇒ Modéliser les impacts du cloud
- ⇒ Améliorer les wattmètres logiciels

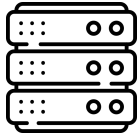
Collecte de donnée collaborative



- Caractéristique techniques
- États : [(power, load, I/O,...)]



- Caractéristique techniques
- États : [(power, load, I/O,...)]



- Caractéristique techniques
- États : [(power, load, I/O,...)]



**Open-science
DB**

Science collaborative



⇒ Démarche de rétro-ingénierie

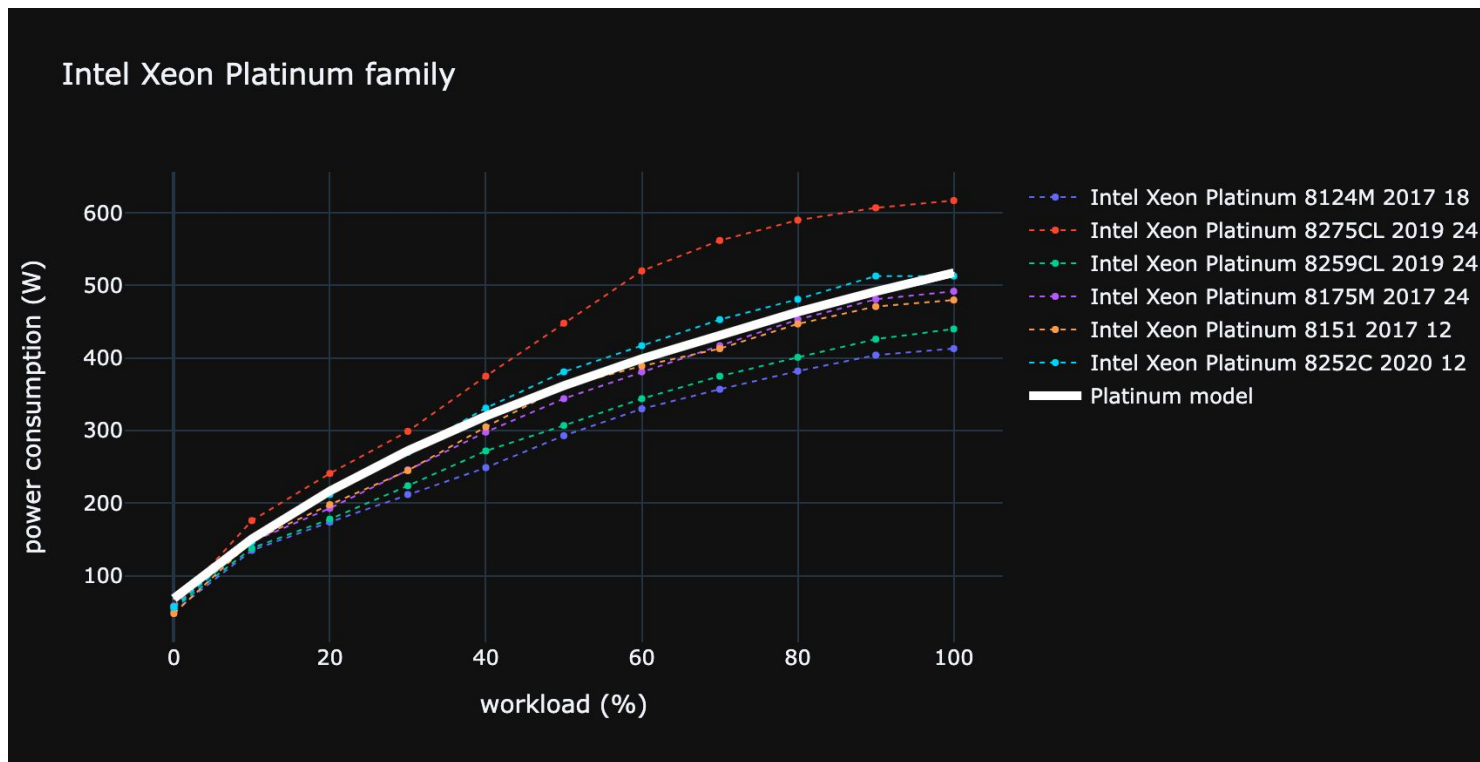
⇒ Comprendre les divergences entre différentes sources de données
(Wattmetre, RAPL, IMPI, DCMI, ...)

⇒ Comprendre les éléments dimensionnant la consommation électrique des serveurs

⇒ Produire des modèles de consommation à partir des caractéristiques techniques

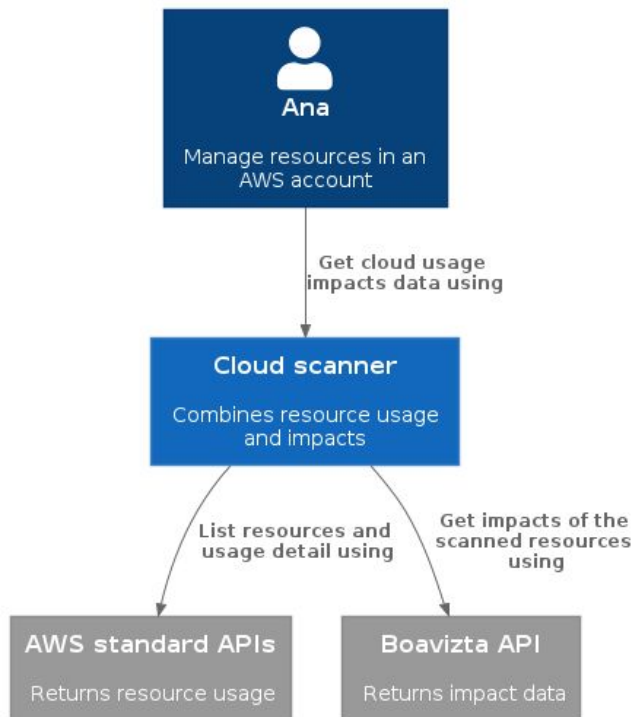
⇒ Pleins d'autres choses que l'on ne sait pas

Cas d'usage : Cloud



Credits to Benjamin Davy (TEADS) & Samuel Rince

Ouverture aux utilisateurs du cloud : Cloud-scanner



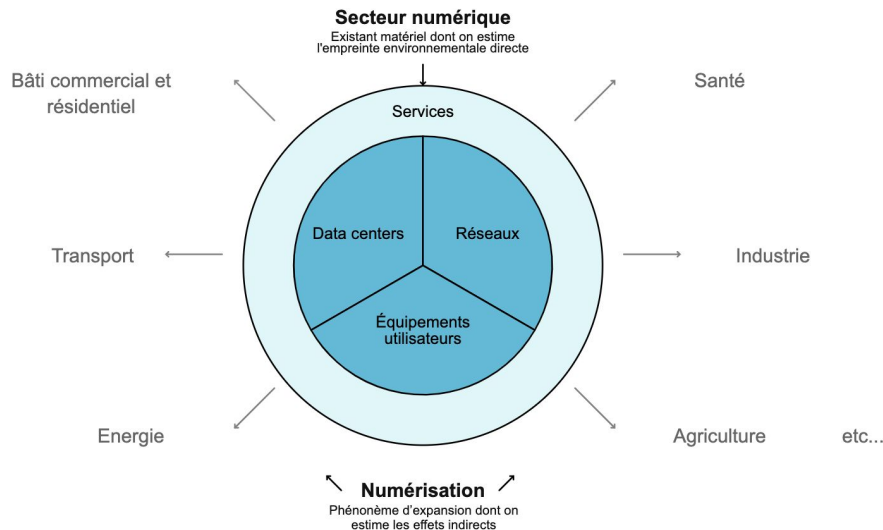
Legend

person
system
external person
external system



Approche réflexive

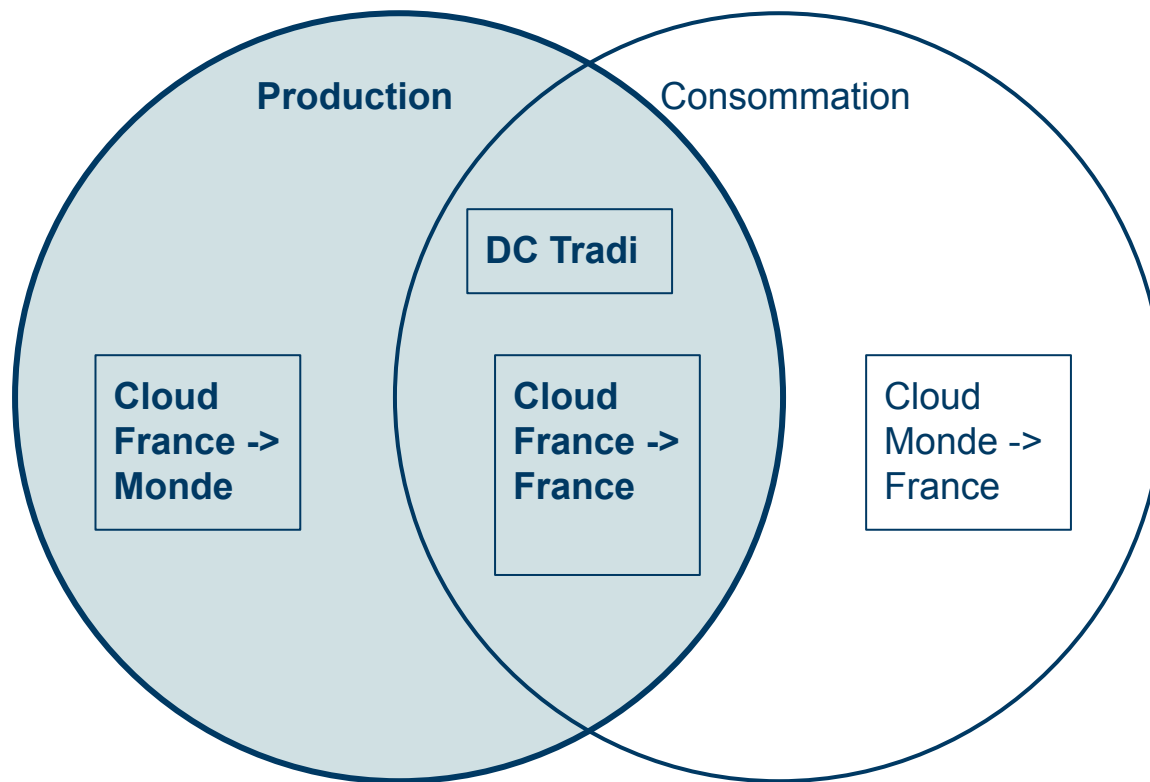
Limites des périmètres étudiés



↑ Périmètre du secteur numérique et de la numérisation d'un point de vue environnemental

<https://gauthierroussilhe.com/articles/secteur-numerique>

Limites des périmètres étudiés



Limites méthodologiques sur les effets indirects



Types d'effets	Mécanismes d'impacts	Mécanisme	Méthodologies
Effets directs	Fabrication	Consommation de ressources & émissions directes émises par la production et la consommation	ACV ISO 14001, ITU 1410,...
	Transport		
	Utilisation		
	Fin de vie		
Effets d'abattement	Optimisation	Réduction d'impacts directs entre un processus de référence et un processus numérisé	ITU 1410, ICTem
	Substitution		
	Information		
Effets rebonds	Rebond direct	Changement technico-social de la production et/ou de la consommation	?
	Rebond indirect		
	Transformations socio-économiques		

Horner, Nathaniel C, Arman Shehabi, and Inês L Azevedo. "Known Unknowns: Indirect Energy Effects of Information and Communication Technology."

A lire:
<https://gauthierroussilhe.com/articles/comprendre-et-estimer-les-effets-indirects-de-la-numerisation>
https://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report.pdf

Limites de déploiement dans les organisations



⇒ Manque de facteurs d'impacts de haut niveau:

- serveurs, workplace type
- applications/services numériques génériques (on prem ou en SAAS)
- data centers (on prem ou cloud)
- systèmes d'informations (en fonction du secteur d'activités, du nombre de collaborateurs, ..)
- ...

⇒ Difficulté d'obtenir facilement un inventaire exhaustif



Ouverture : Les difficultés d'animer une communauté d'experts de nature hétérogène

Qu'est ce qui est commun entre les membres ?



- ⇒ Se connecter avec des pairs
- ⇒ Quête d'impacts, d'expertise, d'efficacité
- ⇒ Nécessité d'ouverture
- ⇒ Communauté de Makers
- ⇒ Peur du greenwashing



Points de vigilance

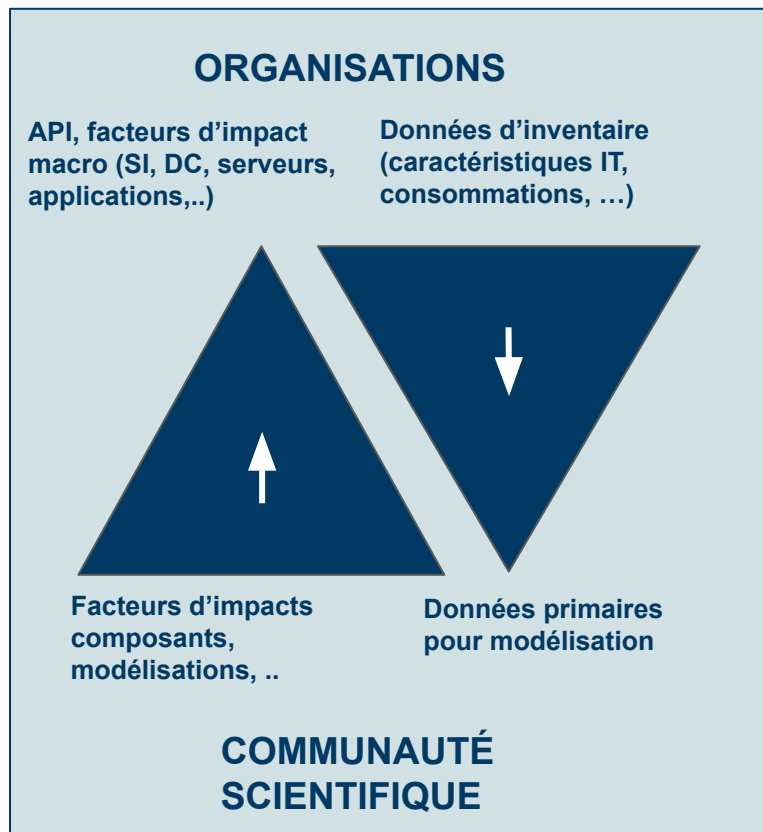
- ⇒ Processus éditorial long
- ⇒ Intérêts industriels
- ⇒ Appropriation des communs
- ⇒ Considération des effets indirects (notamment les effets rebonds)

Comment garantir une bonne qualité scientifique ?



- ⇒ Avec une montée en charge du groupe
- ⇒ Avec une approche collaborative favorisant les initiatives de ses membres
- ⇒ Avec des thématiques très peu matures et sujettes à débat

Comment accélérer l'usage des communs dans les organisations ?



Références



Boavizta, [Comment évaluer l'empreinte de la fabrication d'un serveur, au-delà des émissions de gaz à effet de serre ?](#), 2021

Boavizta, [Les réductions d'émissions de CO2 promises par les Cloud providers sont elles réalistes?](#), 2021

Sarah Boyd, [Life-Cycle Assessment of Semiconductors](#), 2012

Marie GARCIA BARDON, Bertrand PARVAIS, « [The environmental footprint of logic CMOS technologies. A DTCO-based analysis](#) », Imec, 2020.

Jens GRÖGER, Ran LIU, Lutz STOBBE, Jan DRUSHKE, Nikolai RICHTER, « [Green Cloud Computing.Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing](#) », Umwelt Bundesamt, 2021.

Horner, Nathaniel C, Arman Shehabi, and Inês L Azevedo. "[Known Unknowns: Indirect Energy Effects of Information and Communication Technology](#)."

Gauthier Roussilhe, "[Est-ce que le secteur numérique existe ? \(d'un point de vue environnemental\)](#)", 2022

Gauthier Roussilhe, "[Les effets environnementaux indirects de la numérisation](#)", 2022



Merci !

Des questions ?