

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU NUMÉRIQUE

Anne-Cécile Orgerie

*Rectorat de Rennes
23 janvier 2024, Rennes*



Contexte

- Crise climatique
 - Limites planétaires
 - Niveau de vie décent et équitable
- Numérique
 - Souvent présenté comme faisant partie de la **solution** aux problèmes climatiques (optimisations, systèmes *smart*, etc.)
 - Mais fait assurément partie du **problème**

Mon contexte scientifique

- **Comprendre**
- Consommation énergétique
- Systèmes distribués à large échelle
- Parties calcul et communication
- En phase usage



© Léa Castor / INS2I

Commencé il y a quelques années avec le *Grid computing*...

Empreinte carbone

Quelle est la part du numérique dans l'empreinte carbone mondiale ?

- 2,1%
- 3,8%
- 8,6%
- 15,2%

Empreinte carbone

Quelle est la part du numérique dans l’empreinte carbone mondiale ?

2,1 à 3,9% en 2021 (1,2 à 2,2 Gt CO₂eq)

Prévisions : +6% à 10% par an

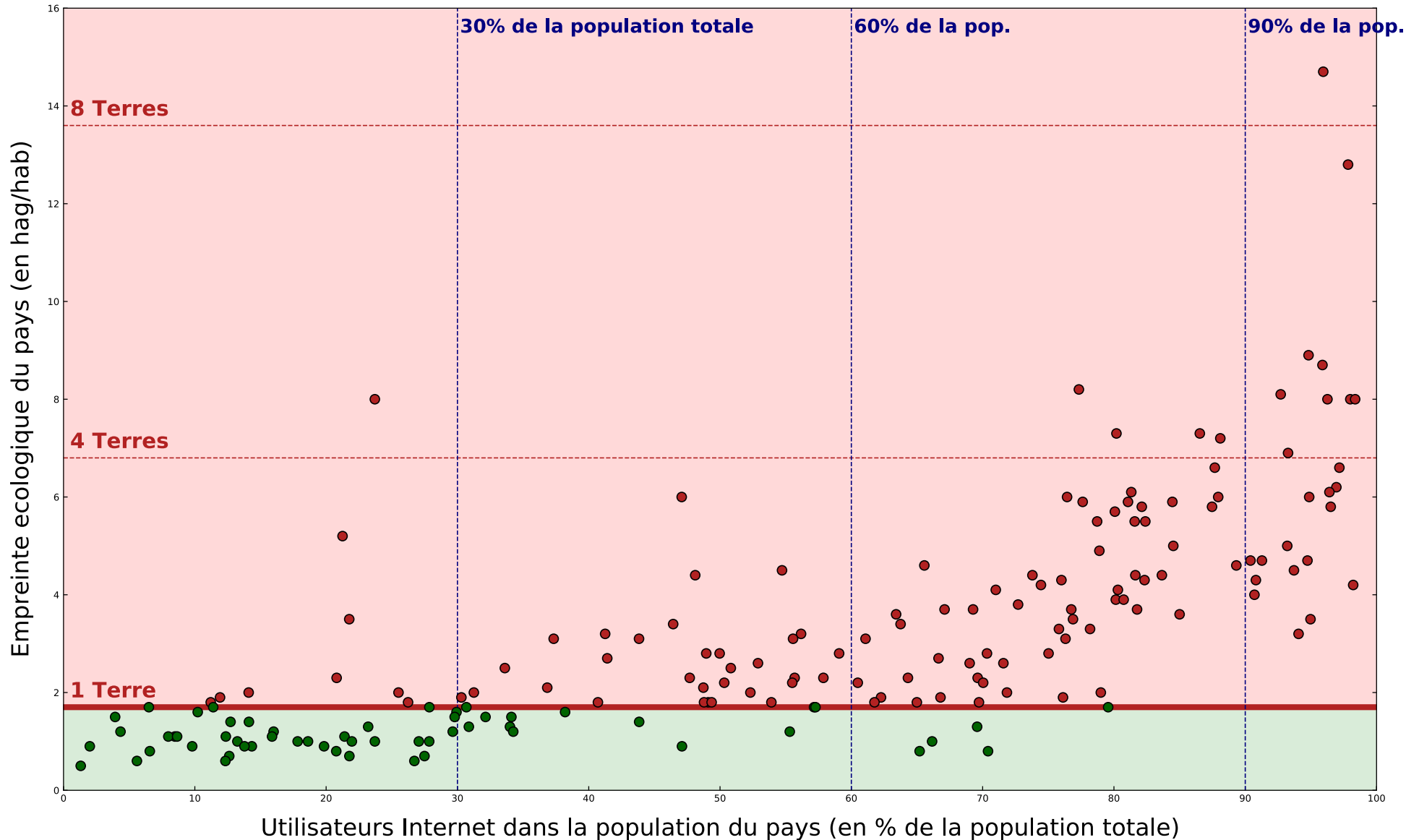
“The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations”, C. Freitag, M. Berners-Lee, K. Widdicks, B. Knowles, G. Blair, A. Friday, Patterns, 2021.

Quelle est la part de l’aviation civile dans l’empreinte carbone mondiale ?

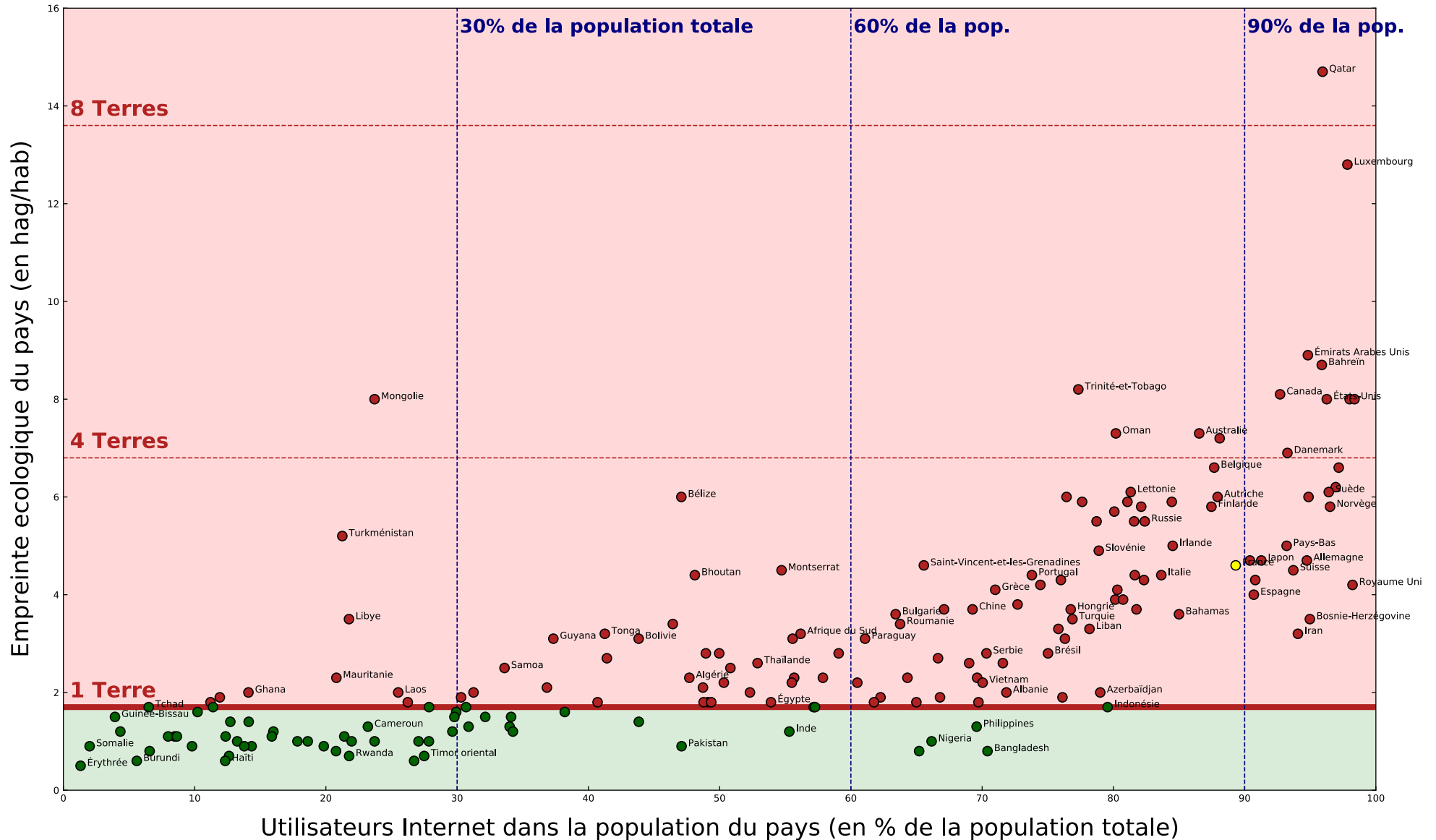
2,4% en 2018

“Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, P. Jaramillo et al, IPCC 2022.

Une planète en forte tension



Une planète en forte tension



Consommation électrique

Quelle est la part du numérique dans la consommation électrique française ?

- 2%
- 5%
- 8%
- 11%

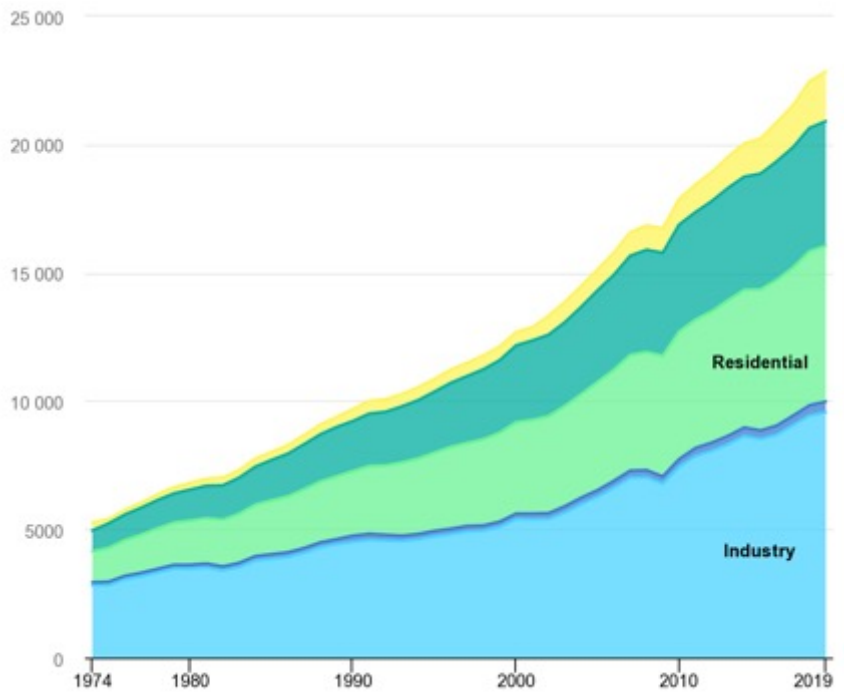
Consommation électrique

Quelle est la part du numérique dans la consommation électrique française ?

11% en 2020 (52 TWh)

Prévisions : 93 TWh en 2050 (+79%)

“Évaluation de l’impact environnemental du numérique en France et analyse prospective”, rapport ADEME – ARCEP, 2022.



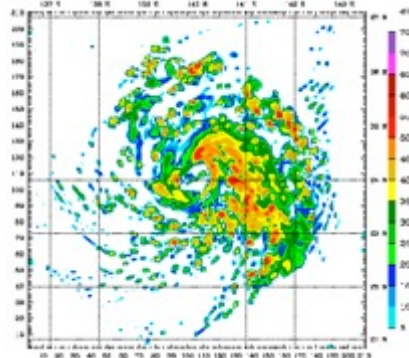
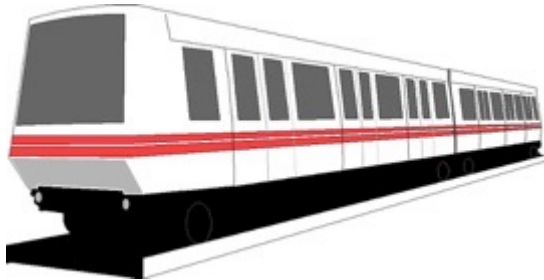
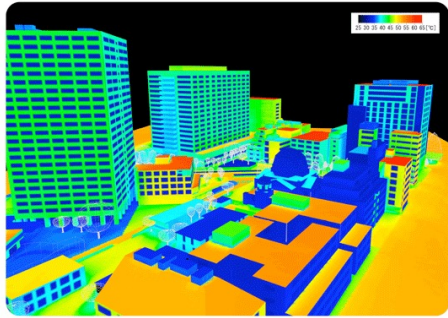
Consommation électrique mondiale en TWh.

En 2019 :

- 22 848 TWh
- +1,7%

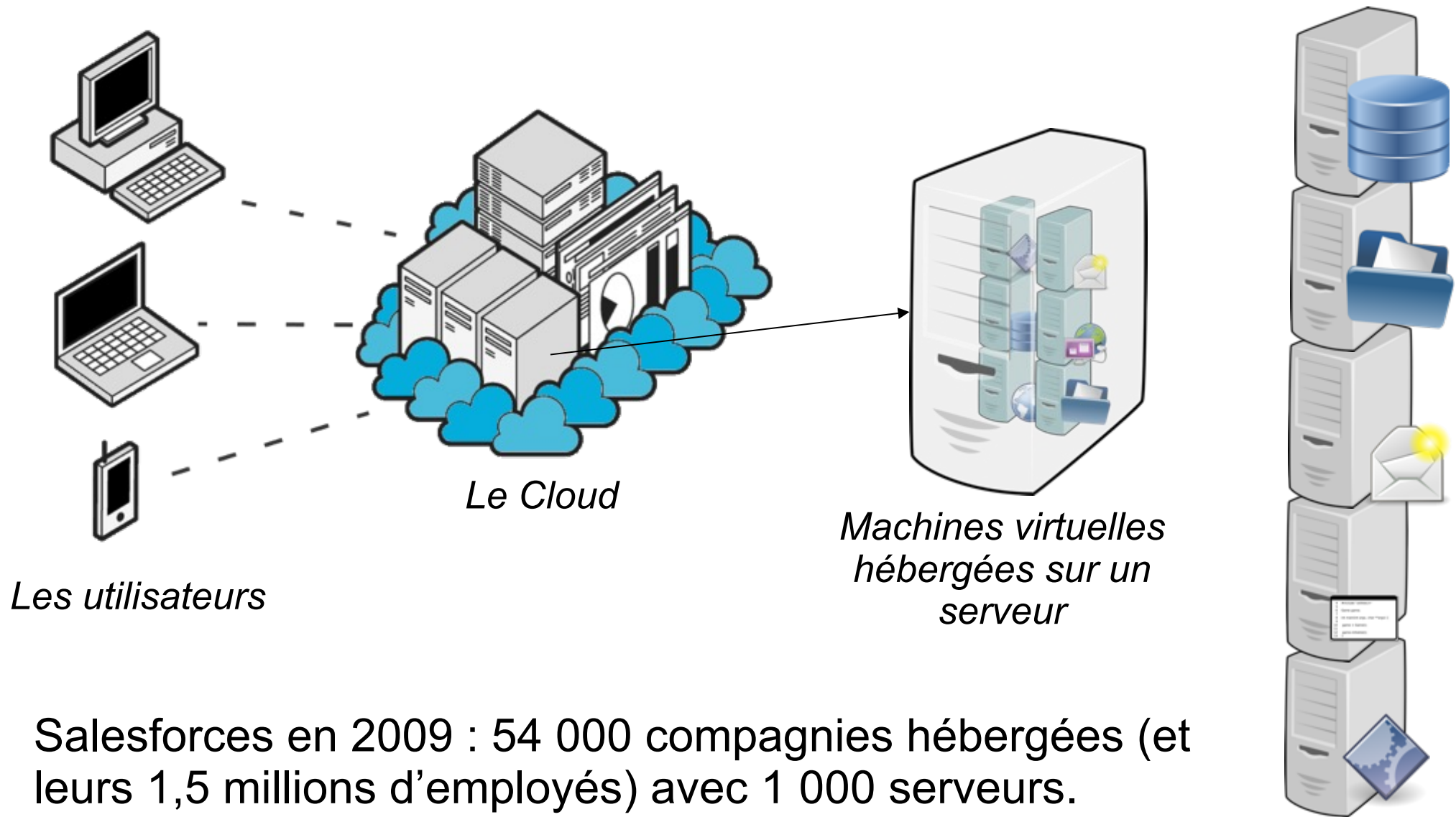
<https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview/electricity-consumption#>

Calculer au 21^{ème} siècle?



STIC : Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication

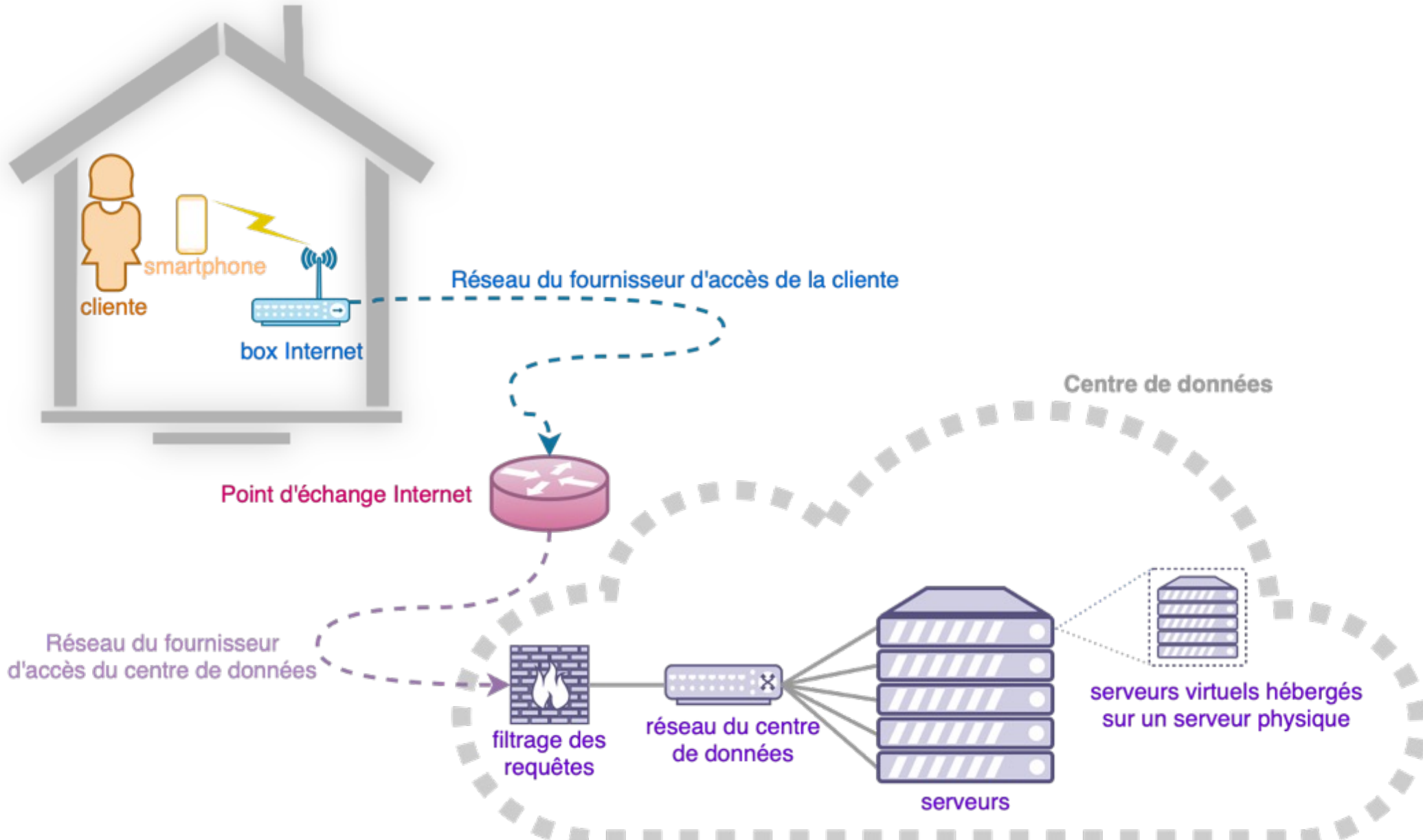
Le Cloud : des ressources virtuelles



Salesforces en 2009 : 54 000 compagnies hébergées (et leurs 1,5 millions d'employés) avec 1 000 serveurs.

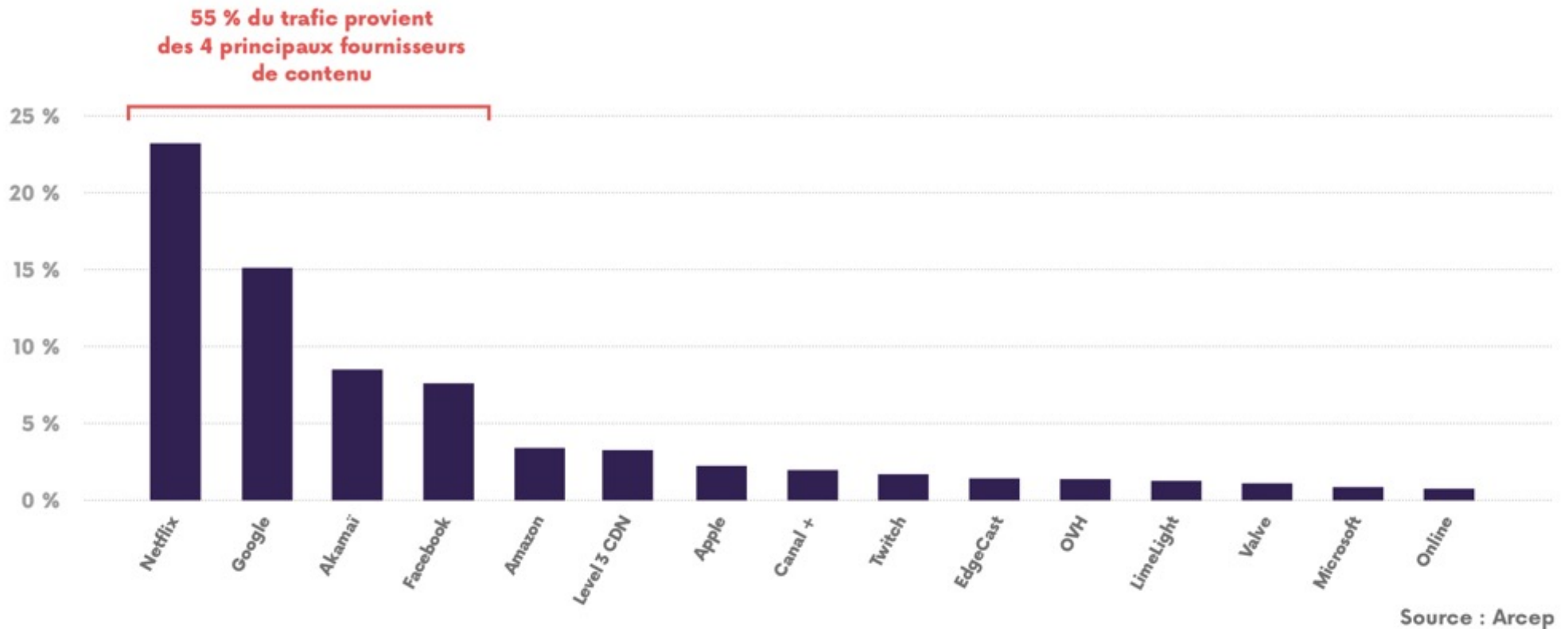
[Source : <https://techcrunch.com/2009/03/23/the-efficient-cloud-all-of-salesforce-runs-on-only-1000-servers>]

Quand utilise-t-on le cloud ?



Trafic Internet en France

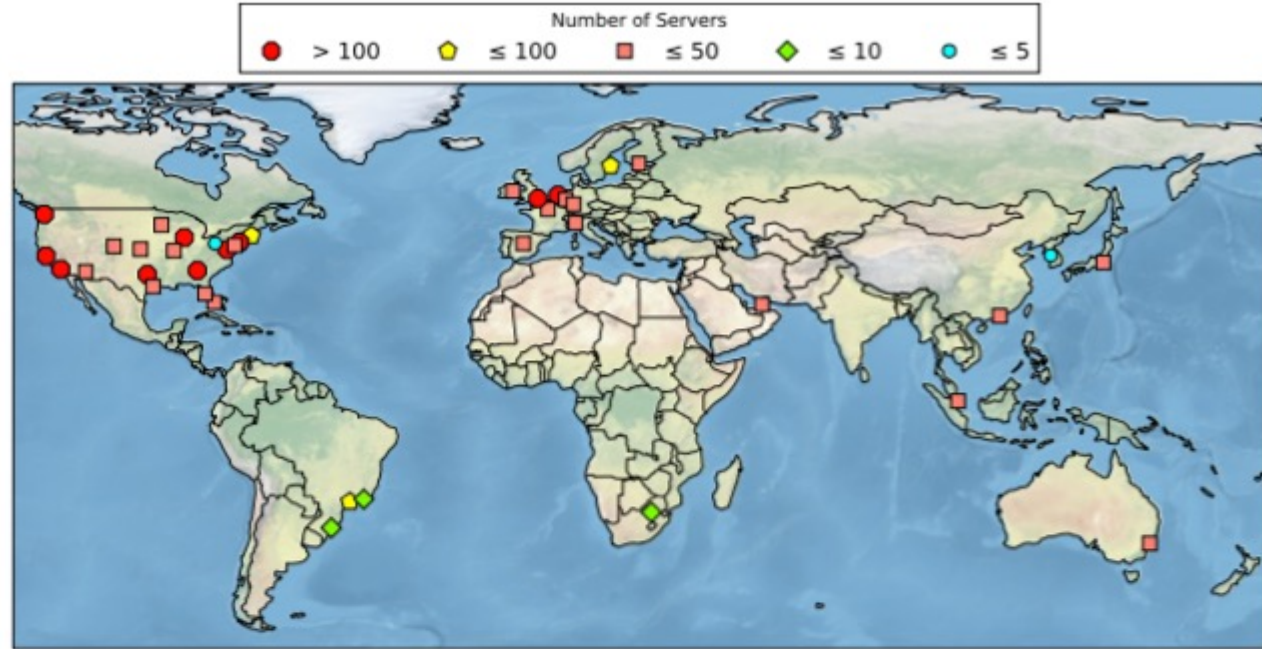
DÉCOMPOSITION SELON L'ORIGINE DU TRAFIC VERS LES CLIENTS DES PRINCIPAUX FAI EN FRANCE (FIN 2019)



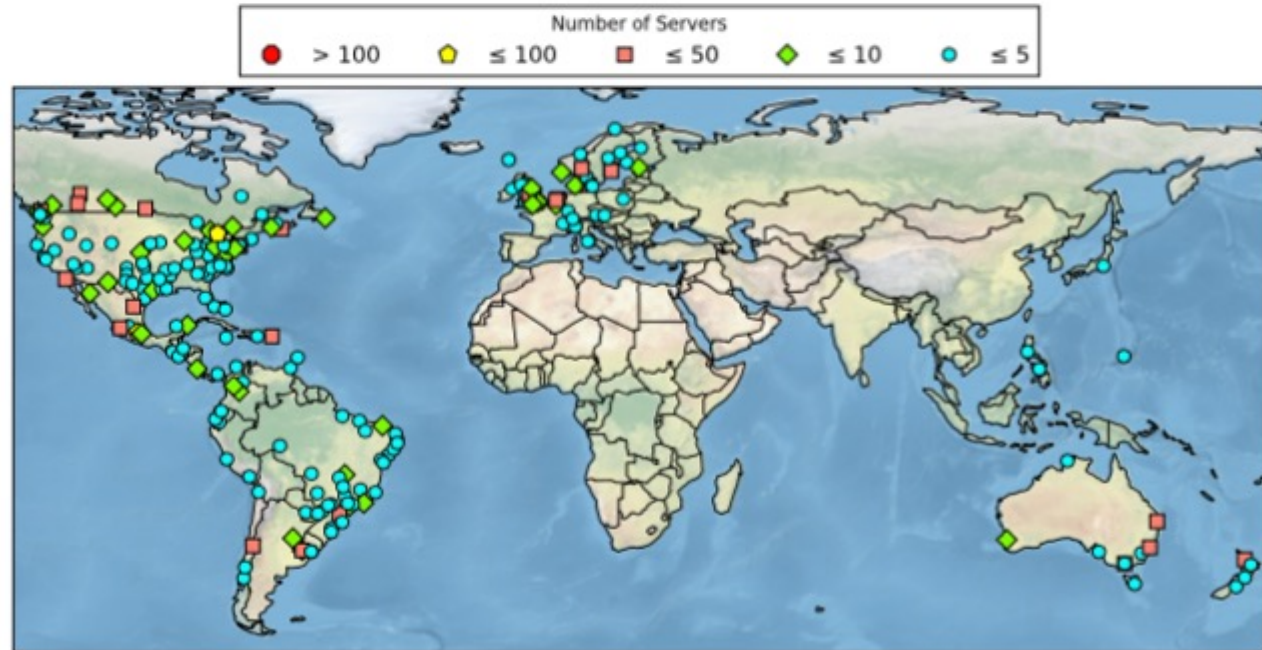
[Source : *Trafic Internet en France selon l'Arcep en 2019.*]

Ressources de Netflix

[Source : Open Connect Everywhere: A Glimpse at the Internet Ecosystem through the Lens of the Netflix CDN, T. Boettger, F. Cuadrado, G. Tyson, I. Castro, S. Uhlig, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2018.]



(a) CDN servers operated by Netflix at IXPs.



(b) CDN servers deployed within ISPs.

Un Cloud



Centre de calcul de Google



Dalles, Oregon

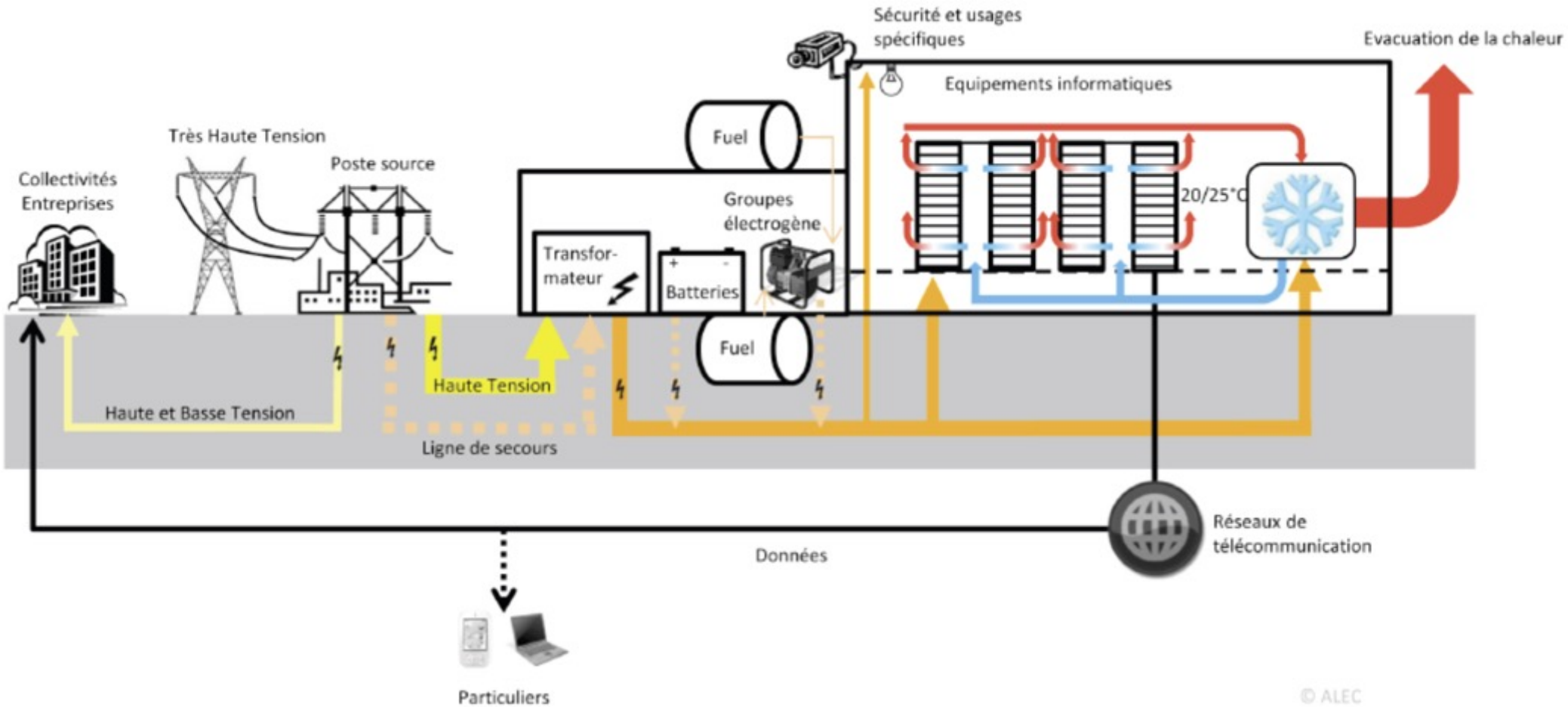
11,5 terrains de football

100 MWatts

100 000 serveurs

[Source : <https://www.google.com/about/datacenters/inside/locations/the-dalles/>]

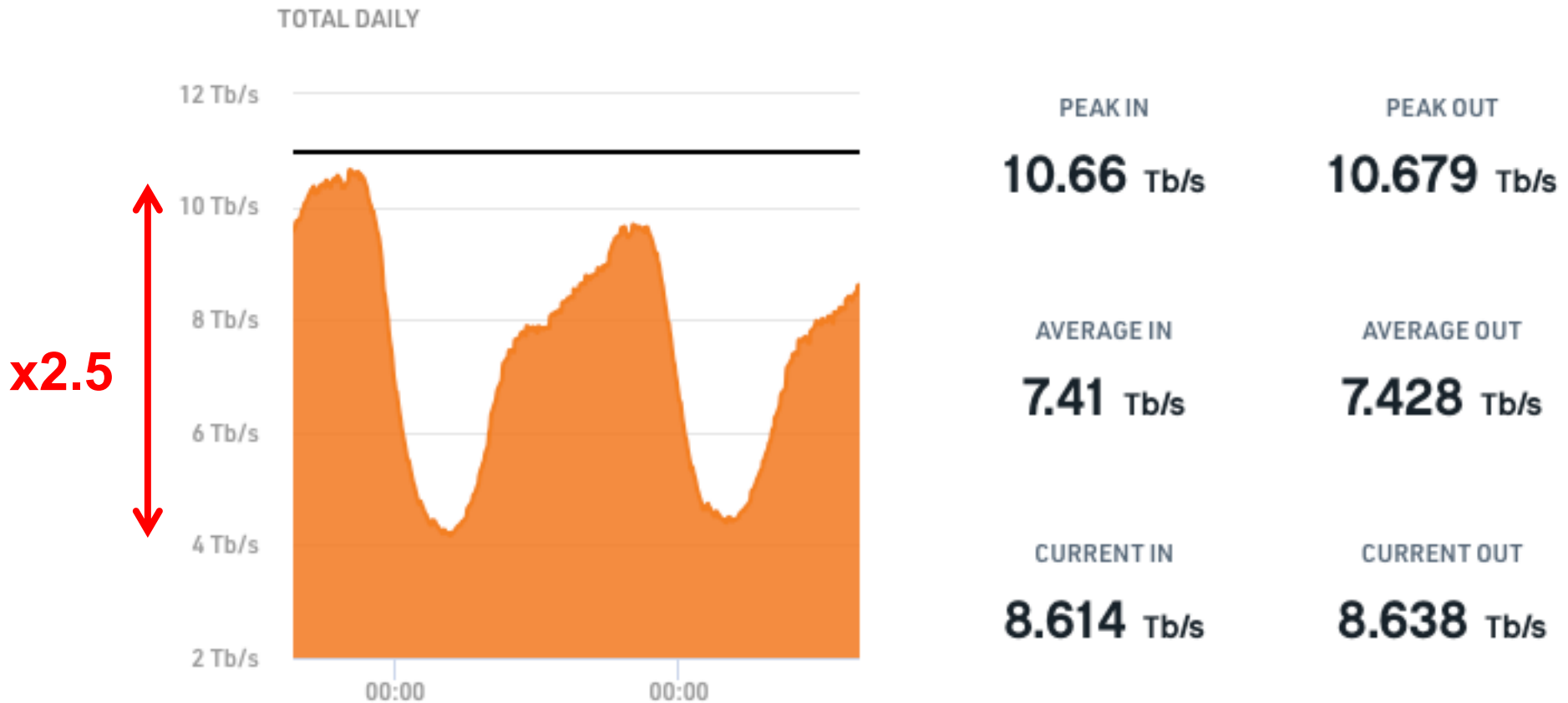
Aperçu d'un centre de calcul



[Source : <http://www.alec-plaine.co.org/wp-content/uploads/2013/10/ALEC-Plaine-Commune-2013-Les-data-centers-sur-Plaine-Commune.pdf>]

Anne-Cécile Orgerie

Dimensionnement pour les pics d'usage

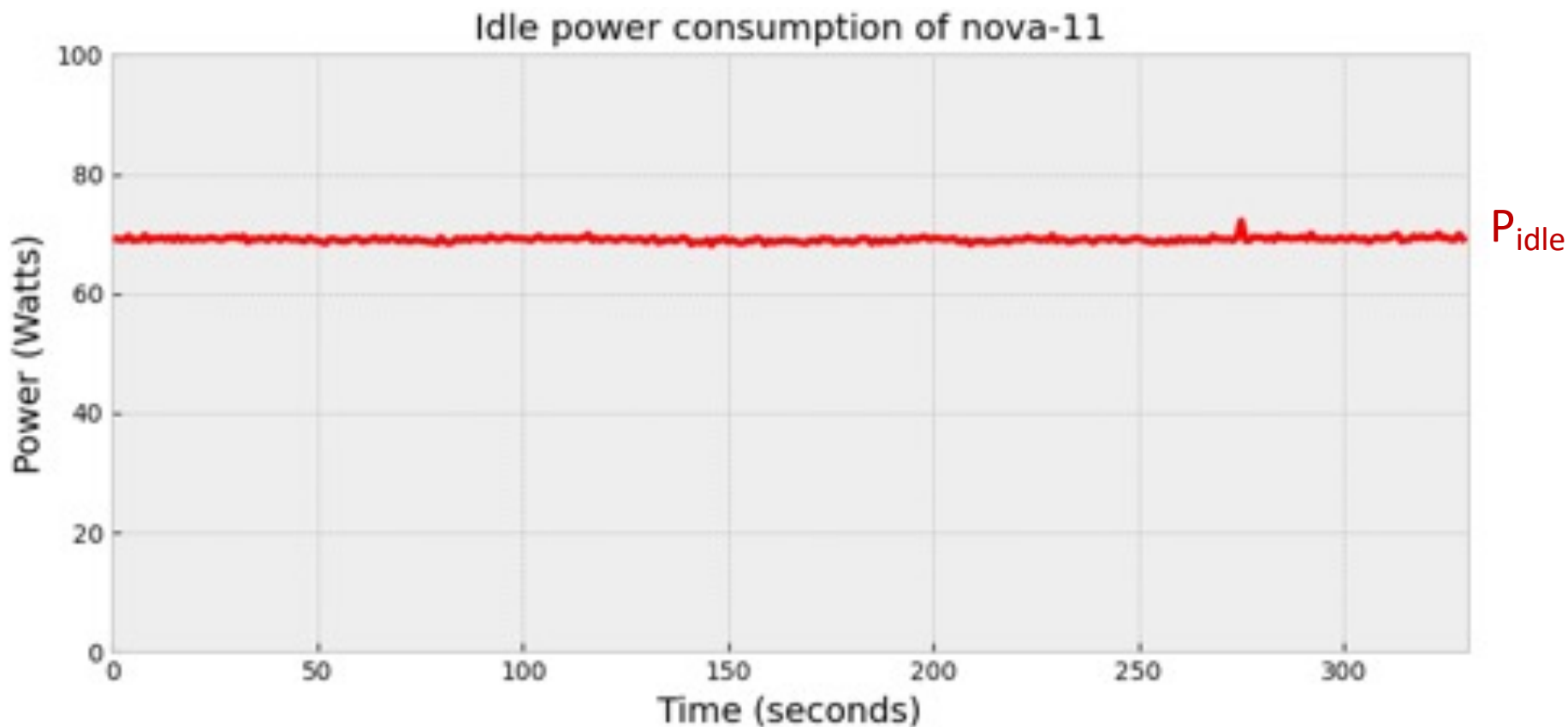


Trafic agrégé sur l'ensemble des ports réseaux du point d'échange Internet d'Amsterdam (AMS-IX) le 8 février 2022.

[Source : <https://www.ams-ix.net/ams>]

Idée fausse #1

Un serveur qui ne fait rien consomme rien ou peu.

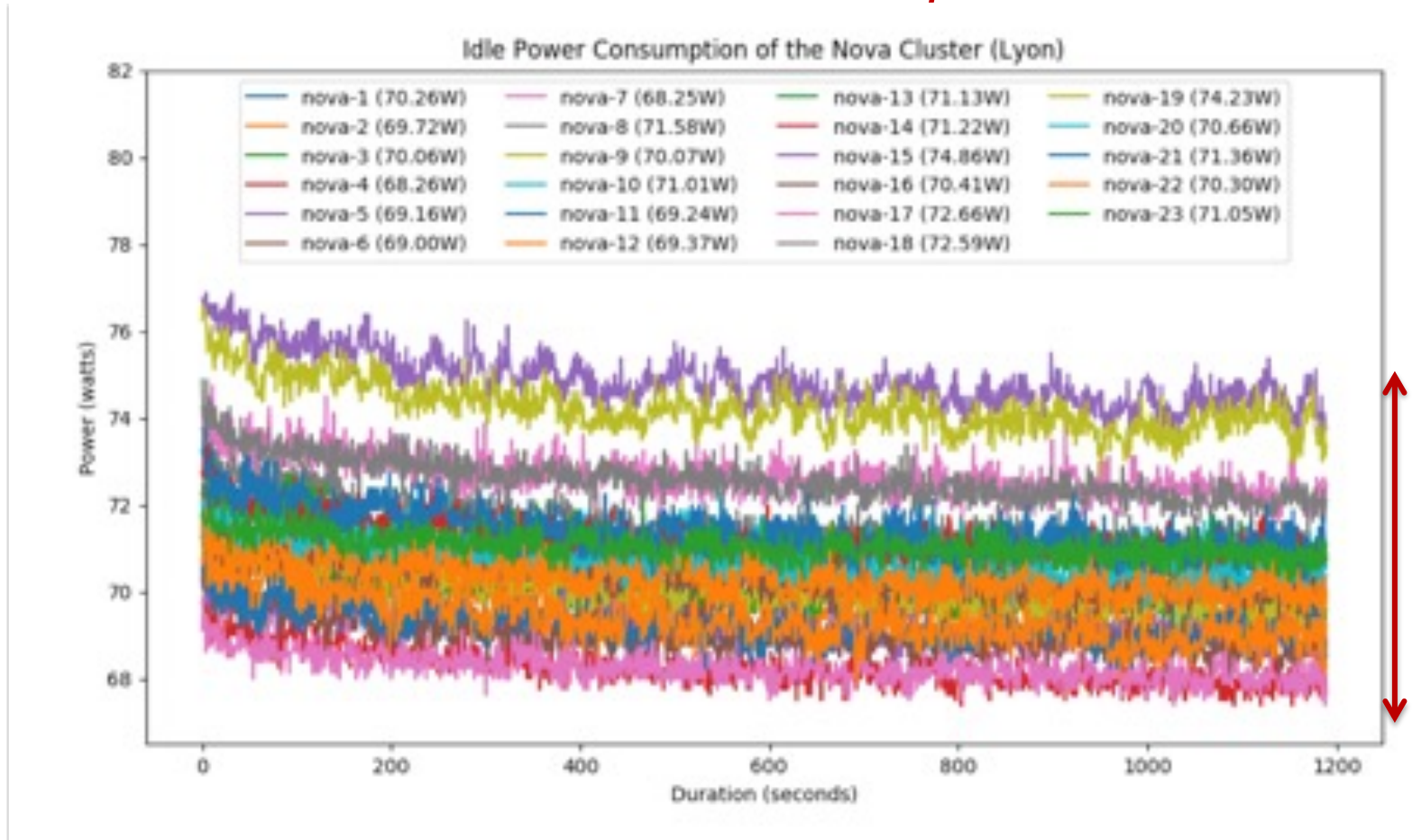


Dell PowerEdge R430 : 2 x Intel Xeon E5-2620 v4, 8 cœurs/CPU, 64 Go RAM, 598 Go HDD (2016)

70 Watts environ pendant une période d'inactivité pour ce serveur.

Idée fausse #2

Un modèle de serveur consomme une puissance donnée.



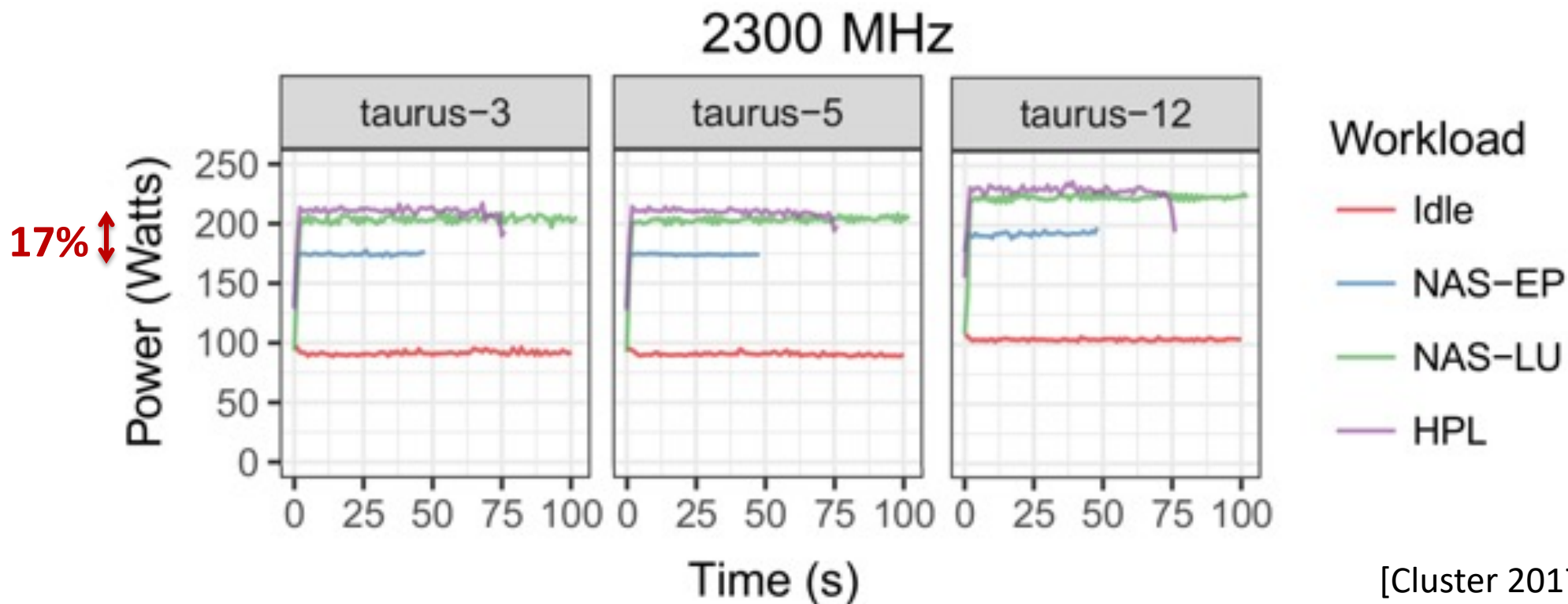
Dell PowerEdge R430 : 2 x Intel Xeon E5-2620 v4, 8 cœurs/CPU, 64 Go RAM, 598 Go HDD (2016)

10% de différence de consommation en période d'inactivité et plus à plein charge.

D'autres idées fausses



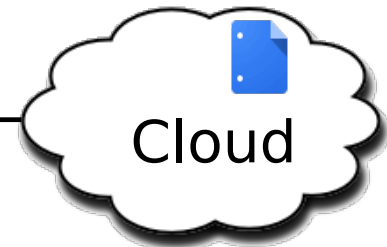
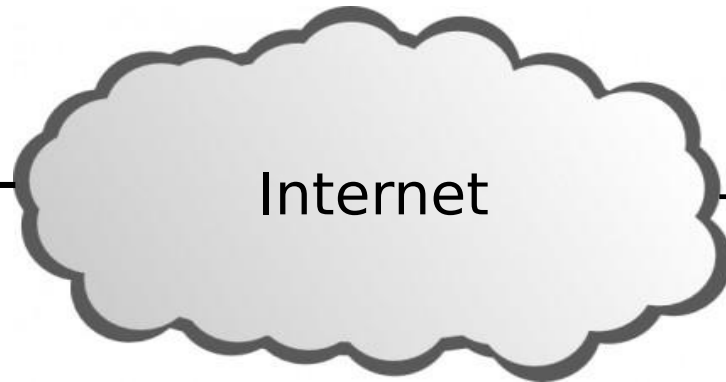
#3 La consommation d'un serveur dépend du taux d'utilisation du CPU.



Dell PowerEdge R720 : 2 x Intel Xeon E5-2630, 6 cœurs/CPU, 32 Go RAM, 299 GB HDD (2012)

17% de différence de consommation pour des applications utilisant 100% du CPU.

Quelle partie consomme le plus ?



Distribution de la consommation énergétique

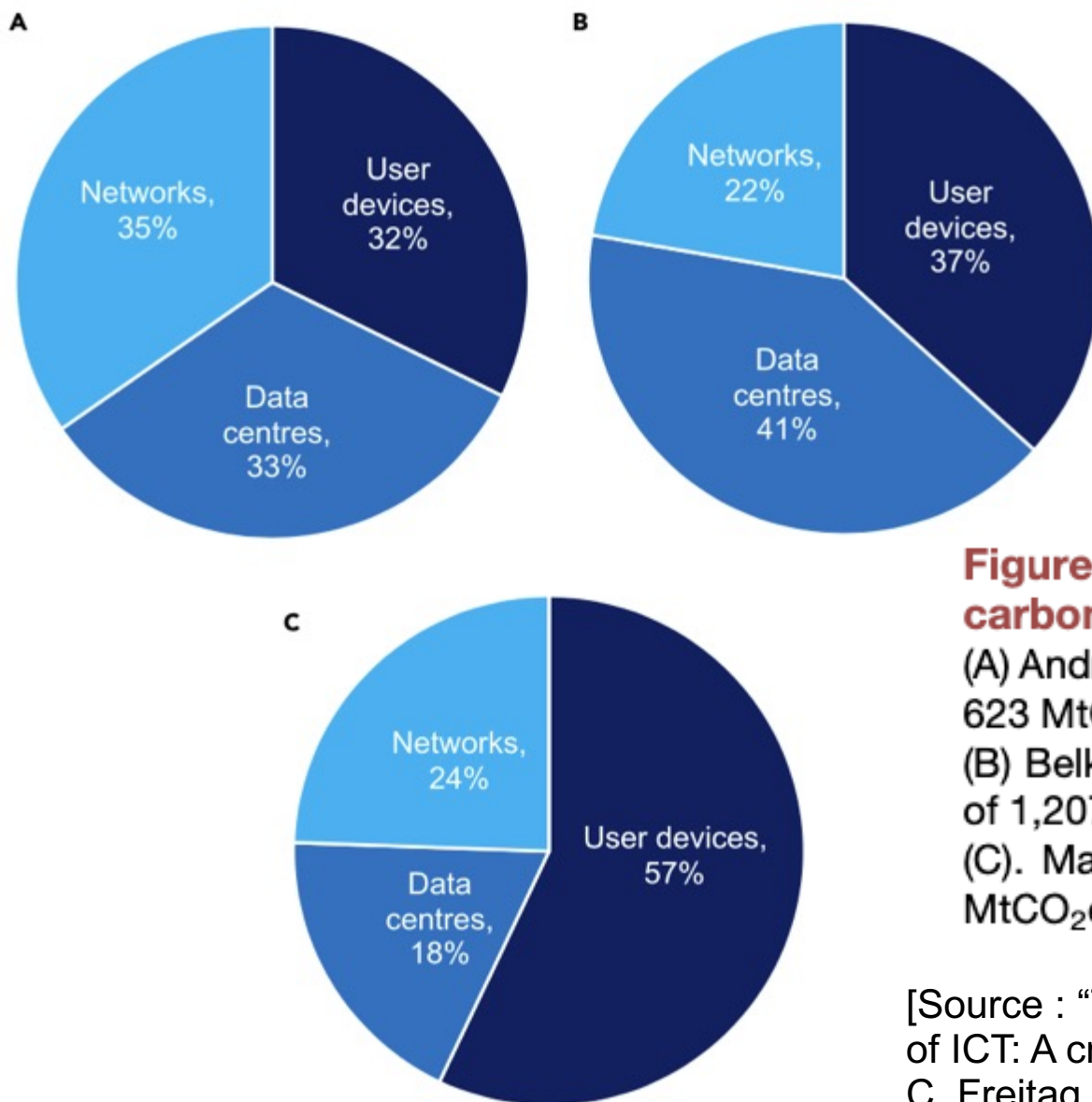


Figure 3. Proportional breakdown of ICT's carbon footprint, excluding TV

(A) Andrae and Edler (2015): 2020 best case (total of 623 MtCO₂e).

(B) Belkhir and Elmeligi (2018): 2020 average (total of 1,207 MtCO₂e).

(C). Malmudin (2020): 2020 estimate (total of 690 MtCO₂e).

[Source : "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, A. Friday, Patterns, 2021.]

Fausse idée #0 – le bon

Le Cloud est neutre en carbone.

FACEBOOK
Sustainability

Net Zero

reached net zero in operational GHG emissions

In 2020, we achieved net zero emissions in our operations by reducing emissions by 94 percent* and supporting carbon removal projects.

*from a 2017 baseline



**2021
Environmental
Sustainability
Report**

100%
renewable energy

In 2020, we matched 100% of the electricity consumption of our operations with renewable energy purchases for the fourth consecutive year.

Google

**Environmental
Report**

Our commitments

Carbon negative

By 2030, we will be carbon negative, and by 2050, we will remove our historical emissions since we were founded in 1975.

Reduce direct emissions

We will reduce our Scope 1 and 2 emissions to near zero by 2025 through energy efficiency work and by reaching 100 percent renewable energy.

**Environmental
Progress
Report**

100%
renewable energy
sourced for all
Apple facilities



Carbon neutral
for corporate operations
since April 2020

Fausse idée #0 – la brute

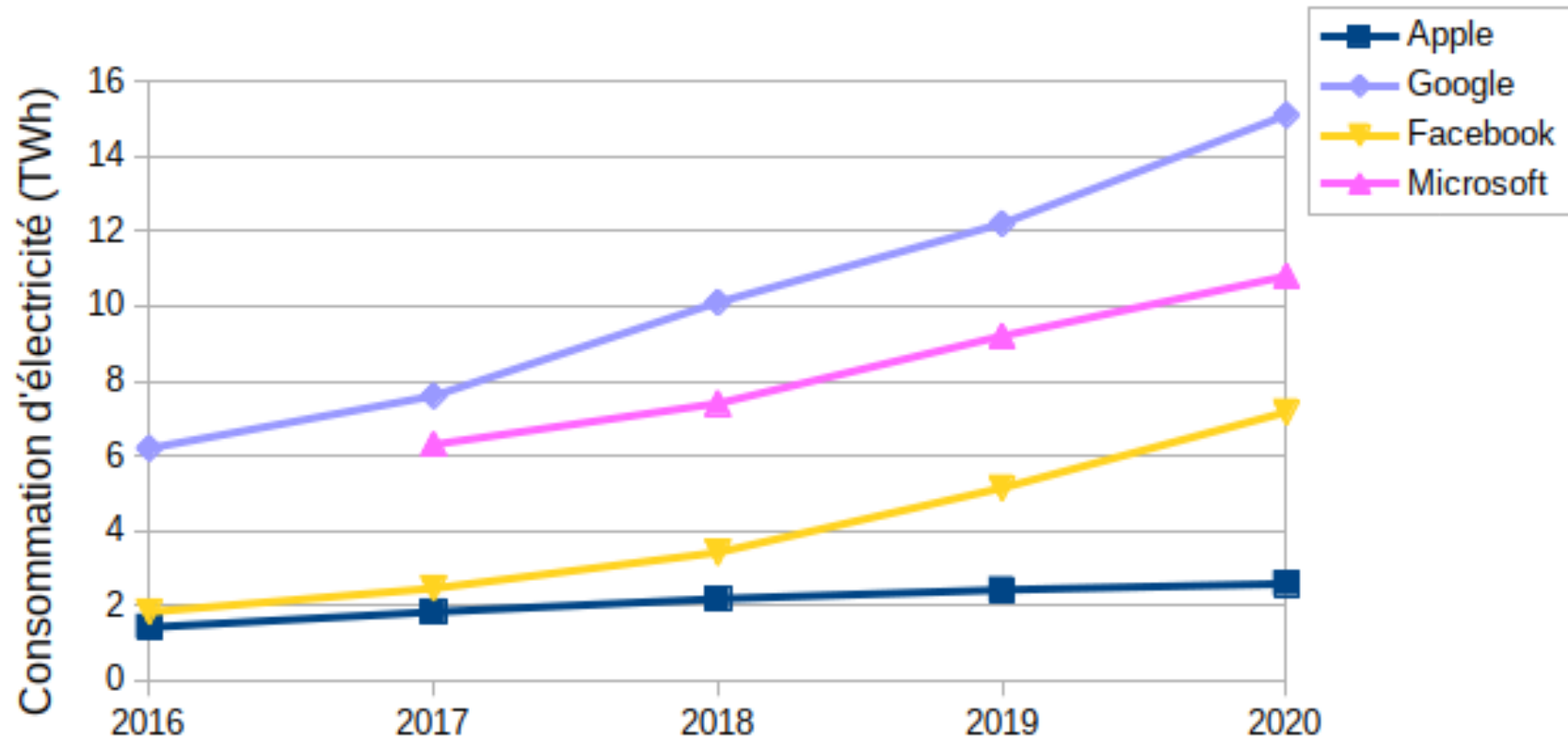


diagramme : Anne-Laure Ligozat

La consommation électrique continue d'augmenter fortement.

[Source : Les « neutralités carbone » des entreprises du numérique, Anne-Laure Ligozat, <https://ecoinfo.cnrs.fr/2022/07/05/carbon-neutralities-of-ict-companies/>, 2022]

Fausse idée #0 – le truand

Empreinte carbone : 3 catégories

- 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...

En 2021, une évaluation partielle des GES de Microsoft indique qu'au moins 77% de leur impact relève du scope 3.

[https://download.microsoft.com/download/7/2/8/72830831-5d64-4f5c-9f51-e6e38ab1dd55/Microsoft_Scope_3_Emissions.pdf]

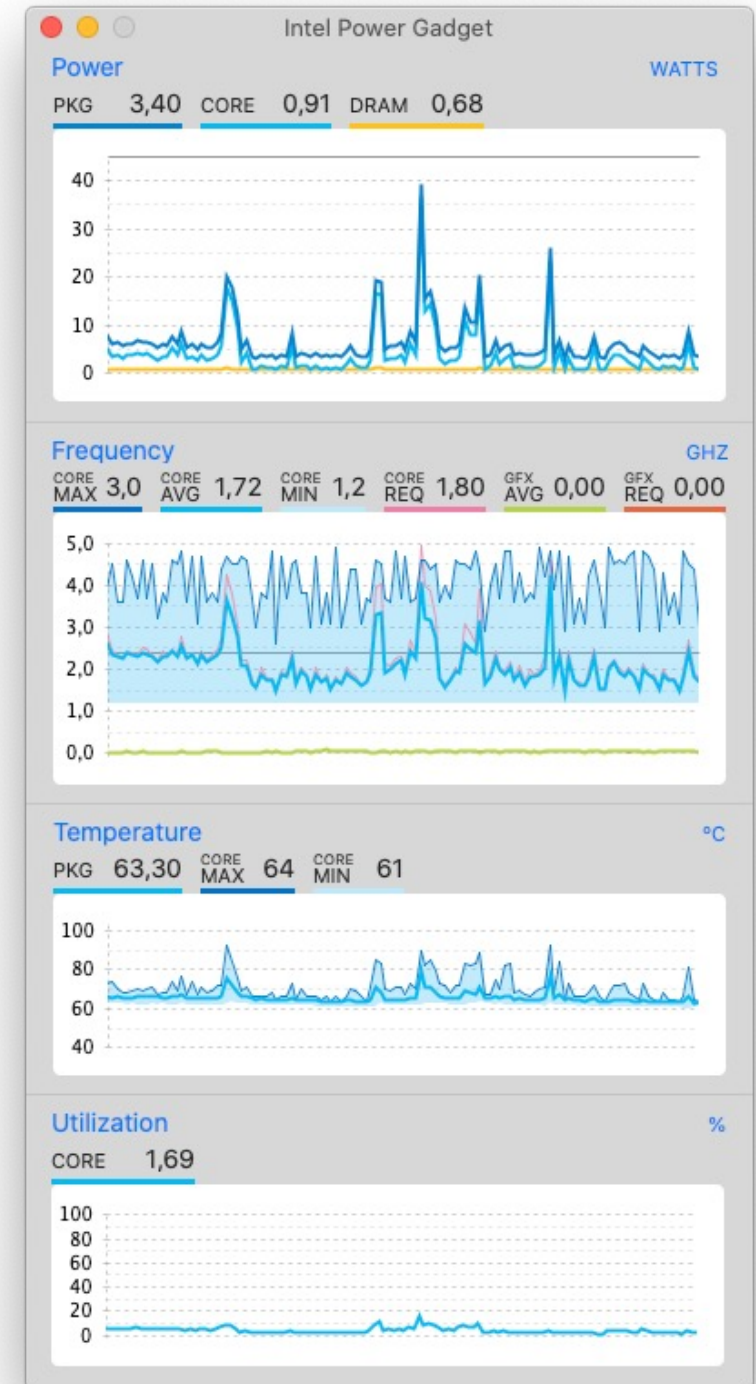
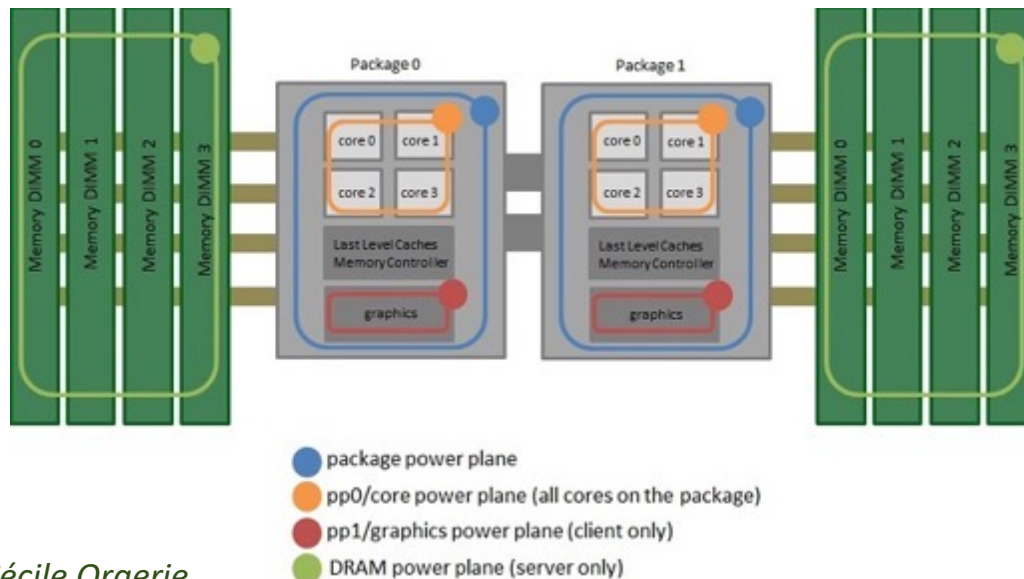
Mesurer est indispensable

- Intel power gadget

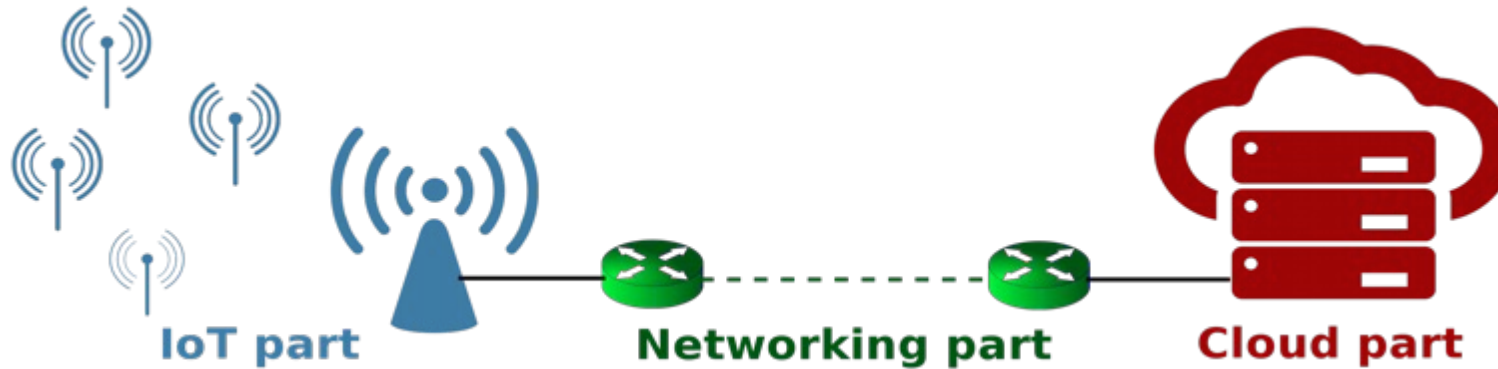
<https://software.intel.com/en-us/articles/intel-power-gadget-20>

- Compteurs matériels RAPL

<https://pypi.org/project/pyRAPL/>



Évaluer la consommation de l'Internet des objets



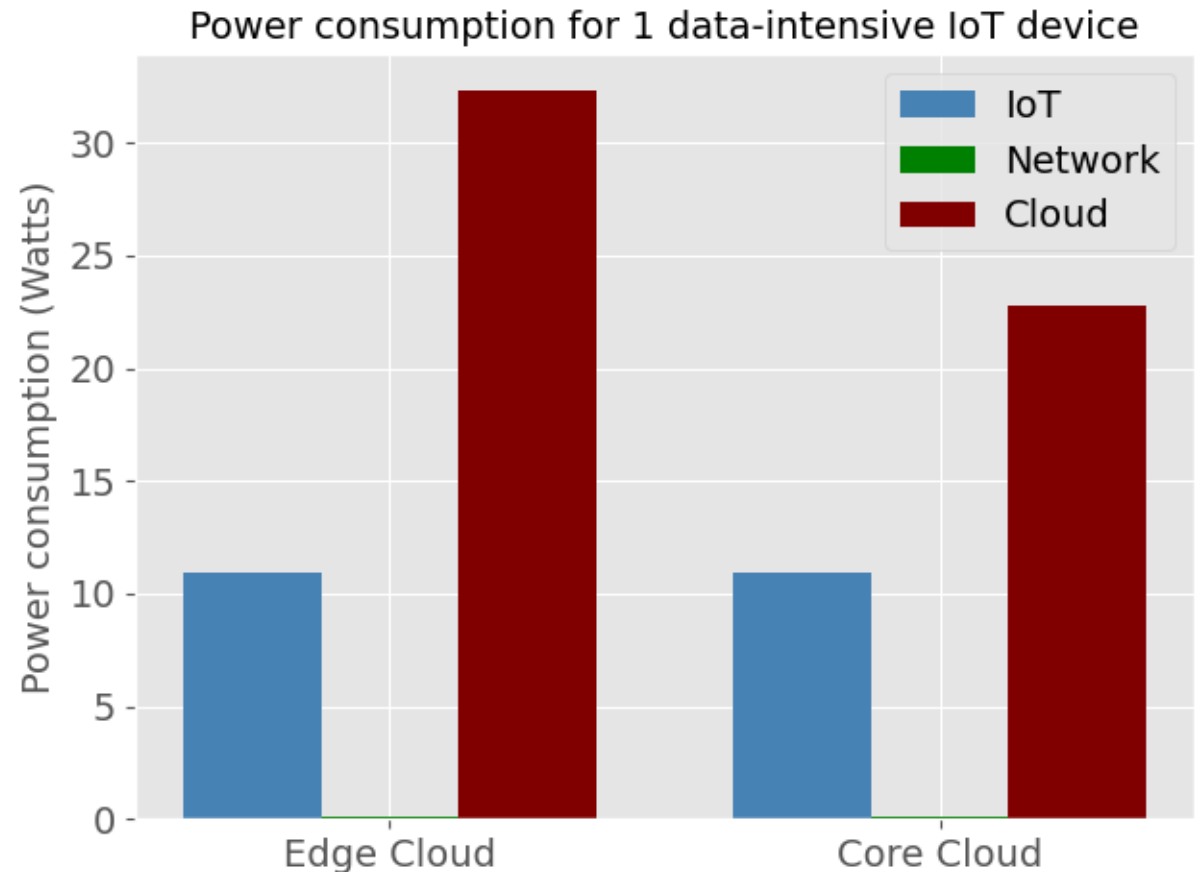
THE STATE UNIVERSITY OF NEW JERSEY
RUTGERS

[FGCS 2018]

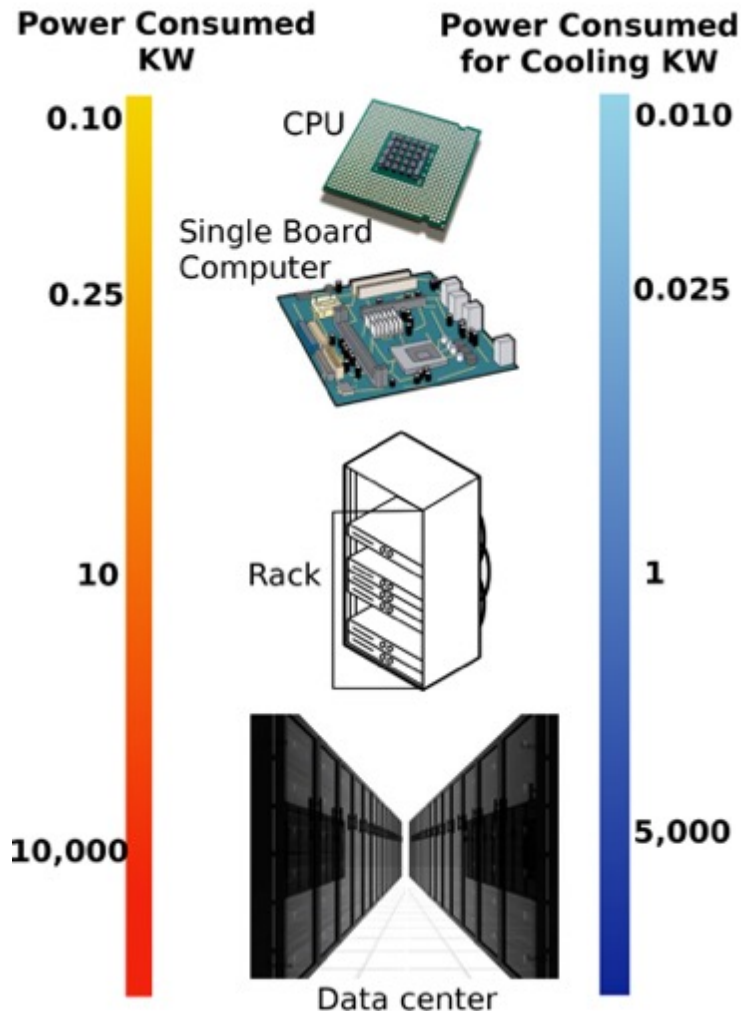
Compromis entre:

- Performance
- Précision de détection
- Consommation énergétique

Ça dépend.



Des économies possibles à tous niveaux



Processeurs basse-consommation
Réduction de l'énergie par opération

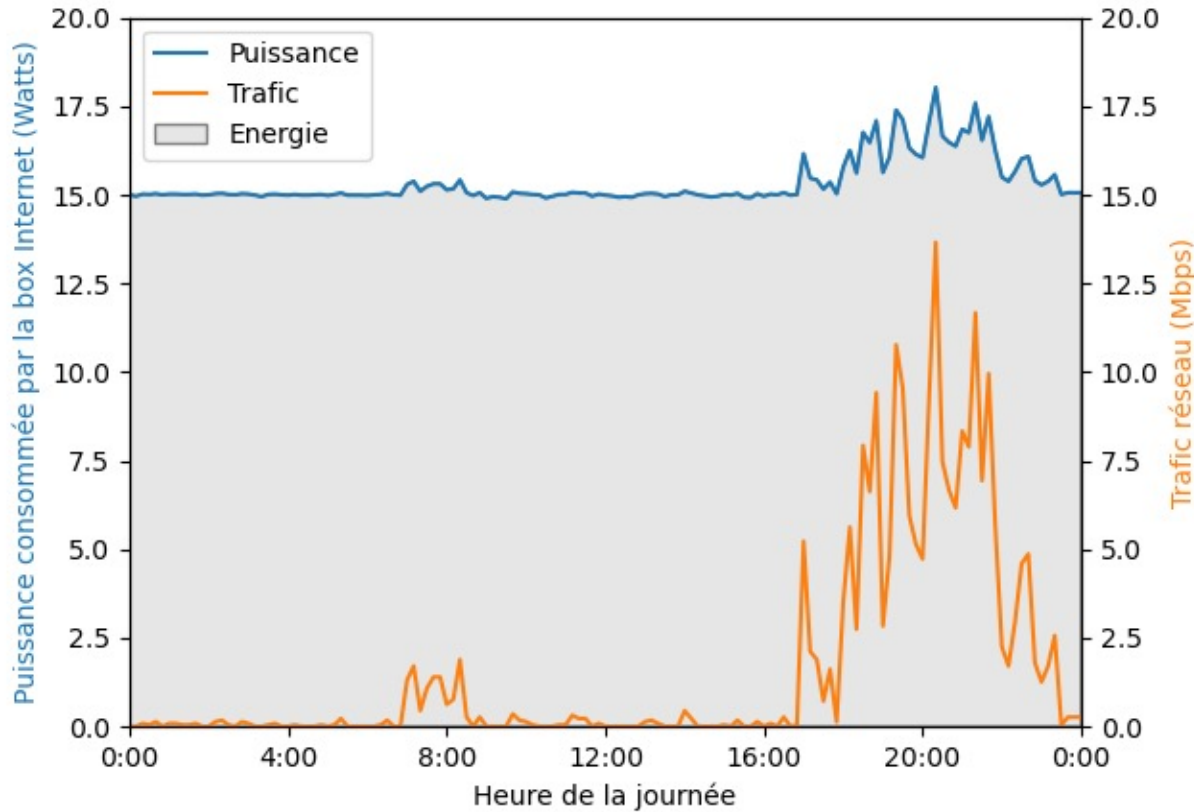
Architectures multi-cœurs
Architectures dédiées (FPGA, GPU)

Placement des données
Utilisation du parallélisme
Optimisation des communications

Gestion des points chauds
Réduction des pics de charge
Adaptation dynamique

Mais est-ce que réduire la facture électrique des centres de calculs permet réellement de réduire la consommation du numérique ?

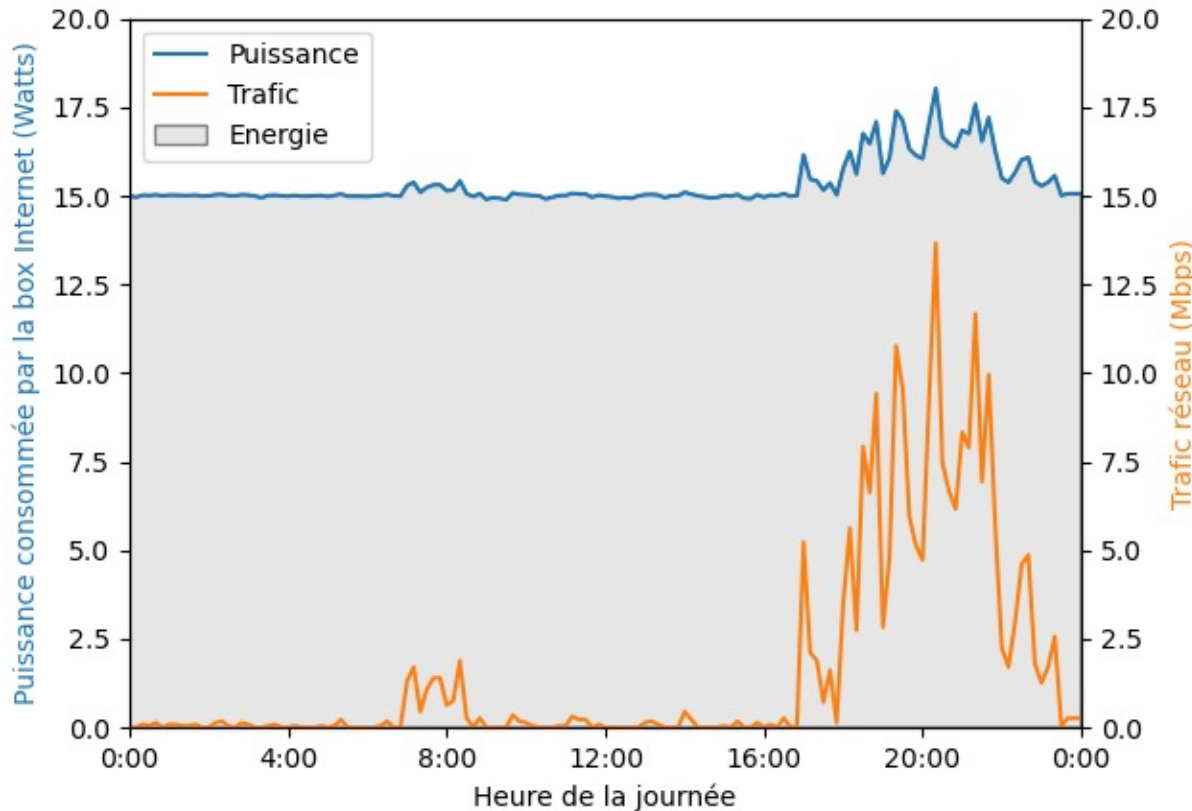
Efficacité énergétique



Efficacité énergétique en Joules/bit ?

Efficacité = énergie / volume de données

Efficacité énergétique



Efficacité énergétique en Joules/bit ?

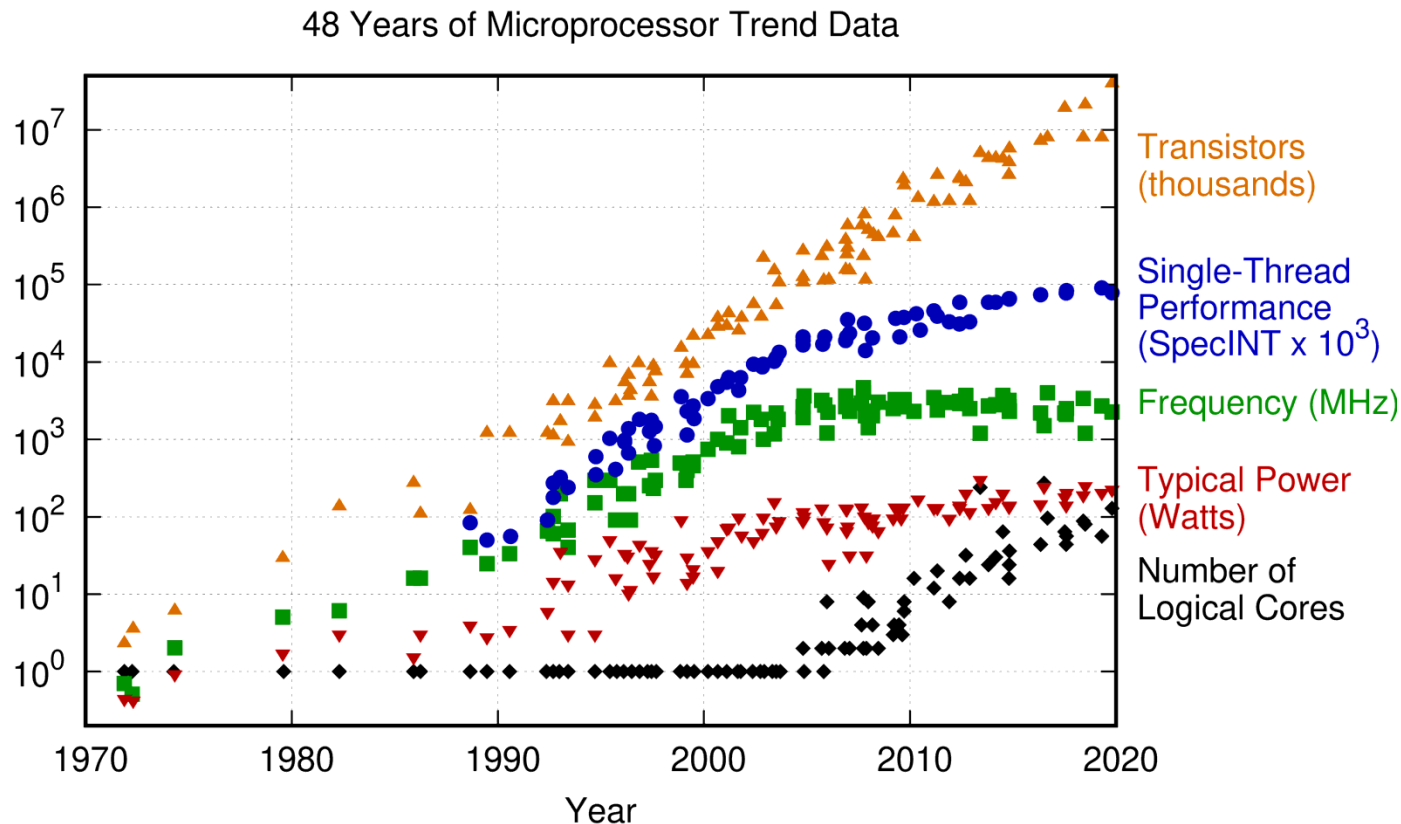
Efficacité = énergie / volume de données

Métriques d'efficacité	Conditions	μJoules/bit
Coût dynamique instantané	À 8h, 0.15 Watts 0.65 Mbps	0.23
Coût total instantané	À 20h, 15.15 Watts 0.65 Mbps	23.3
	À 8h, 16.05 Watts 4.75 Mbps	3.38
Coût journalier total	En moyenne, 15.35 Watts 1.55 Mbps	9.9
Coût minimal total	Au max, 25 Watts 60 Mbps	0.42

2 ordres de grandeur de différence

Lois empiriques

Loi de Moore : le nombre de transistors sur une puce de microprocesseur double tous les deux ans.



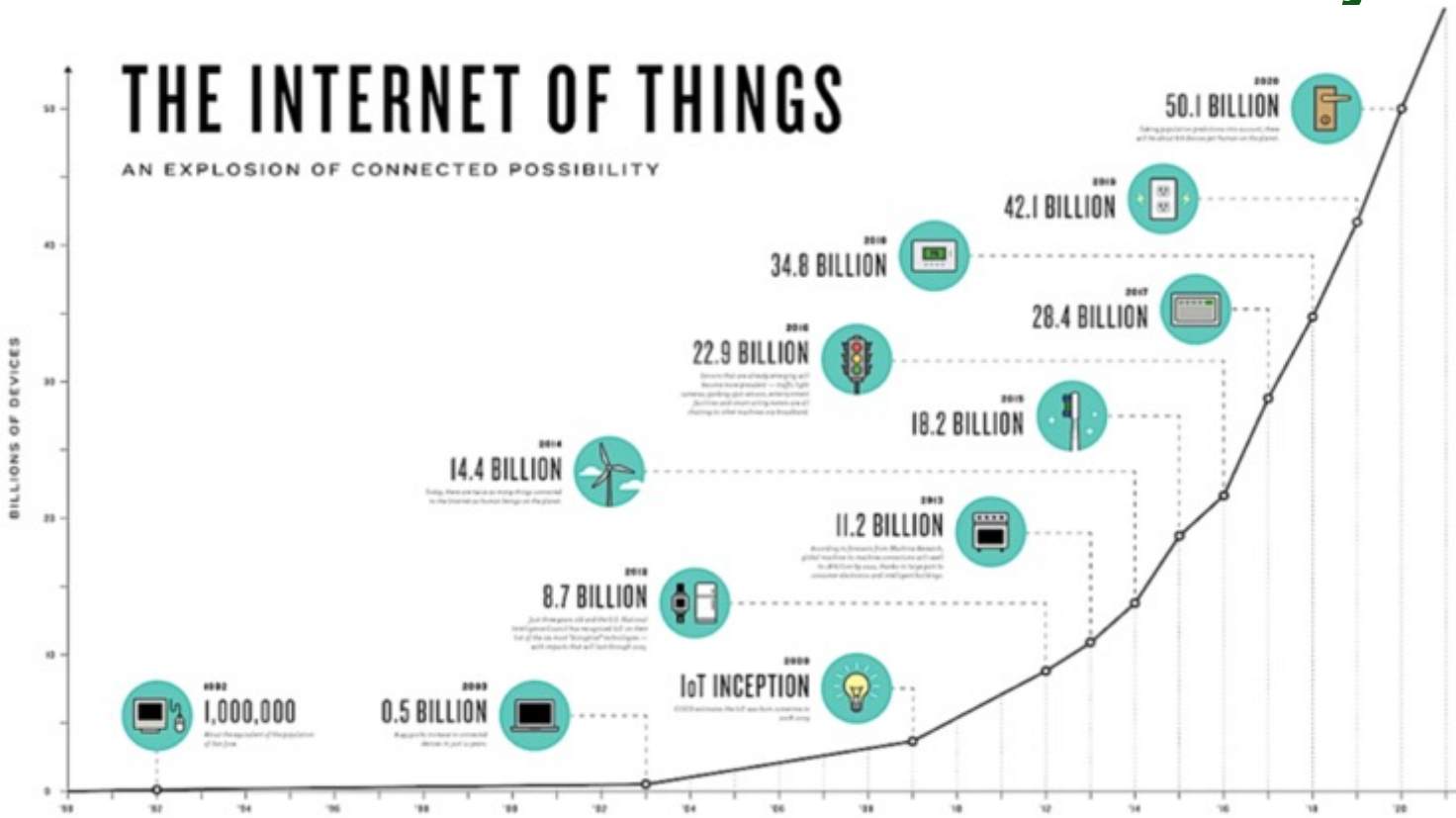
Original data up to the year 2010 collected and plotted by M. Horowitz, F. Labonte, O. Shacham, K. Olukotun, L. Hammond, and C. Batten
New plot and data collected for 2010-2019 by K. Rupp

- Augmenter la fréquence du processeur
- Augmenter le nombre de cœurs par processeur
- Diminuer la finesse de gravure

Limites physiques de dissipation thermique

[Source : Karl Rupp, <https://github.com/karlrupp/microprocessor-trend-data>]

L'Internet des nombreux objets



[Source : <https://www.mesh-net.co.uk/what-is-the-internet-of-things-iot/>]

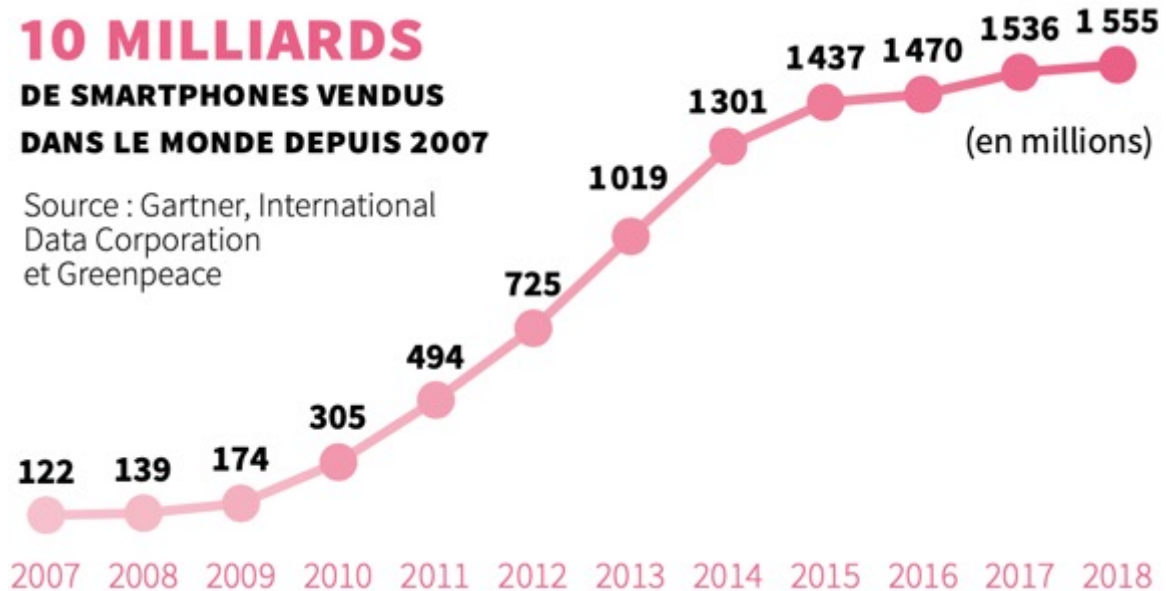


Des objets de plus en plus indispensables

10 MILLIARDS

**DE SMARTPHONES VENDUS
DANS LE MONDE DEPUIS 2007**

Source : Gartner, International
Data Corporation
et Greenpeace

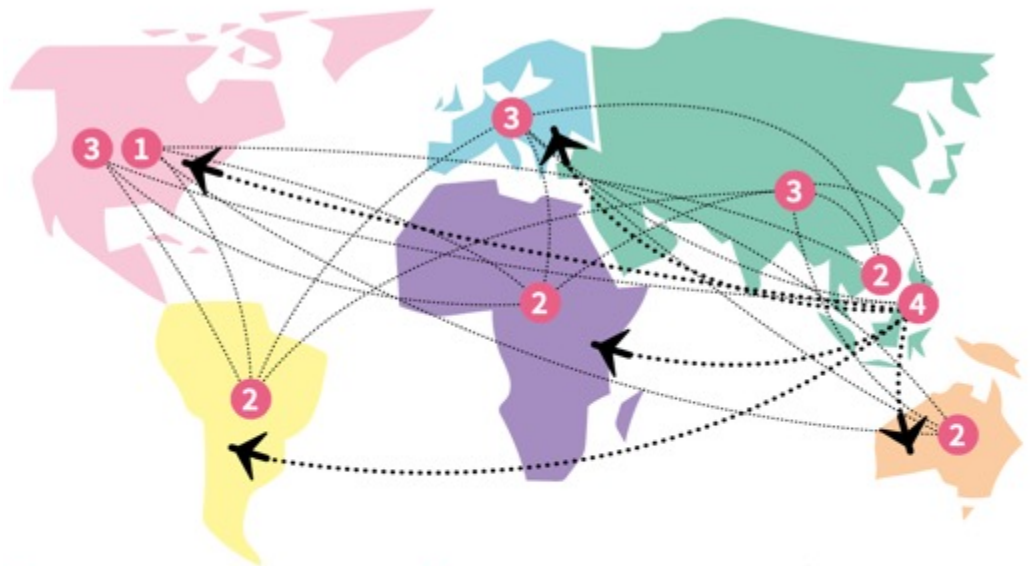


**88 % DES FRANÇAIS
CHANGENT LEUR TÉLÉPHONE
PORTABLE ALORS QU'IL
FONCTIONNE ENCORE...**



Une fabrication complexe

QUATRE TOURS DU MONDE POUR FABRIQUER UN SMARTPHONE



1. Conception le plus souvent aux États-Unis

2. Extraction et transformation des matières premières en Asie du Sud-Est, en Australie, en Afrique centrale et en Amérique du Sud

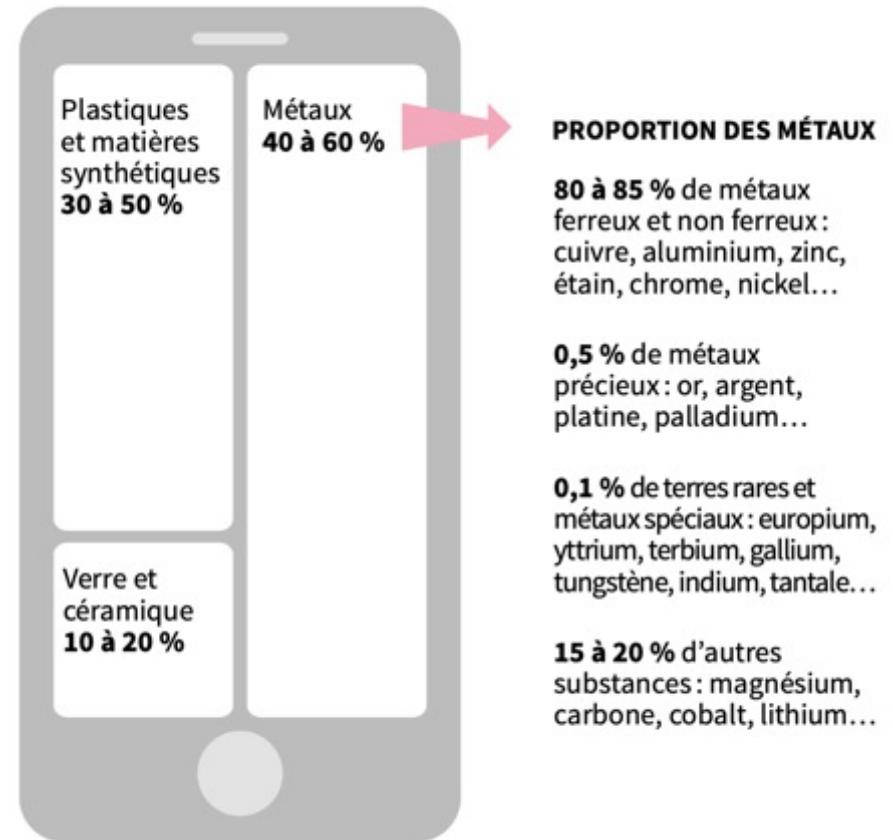
3. Fabrication des principaux composants en Asie, aux États-Unis et en Europe

4. Assemblage en Asie du Sud-Est

↑
Distribution vers le reste du monde, souvent en avion.

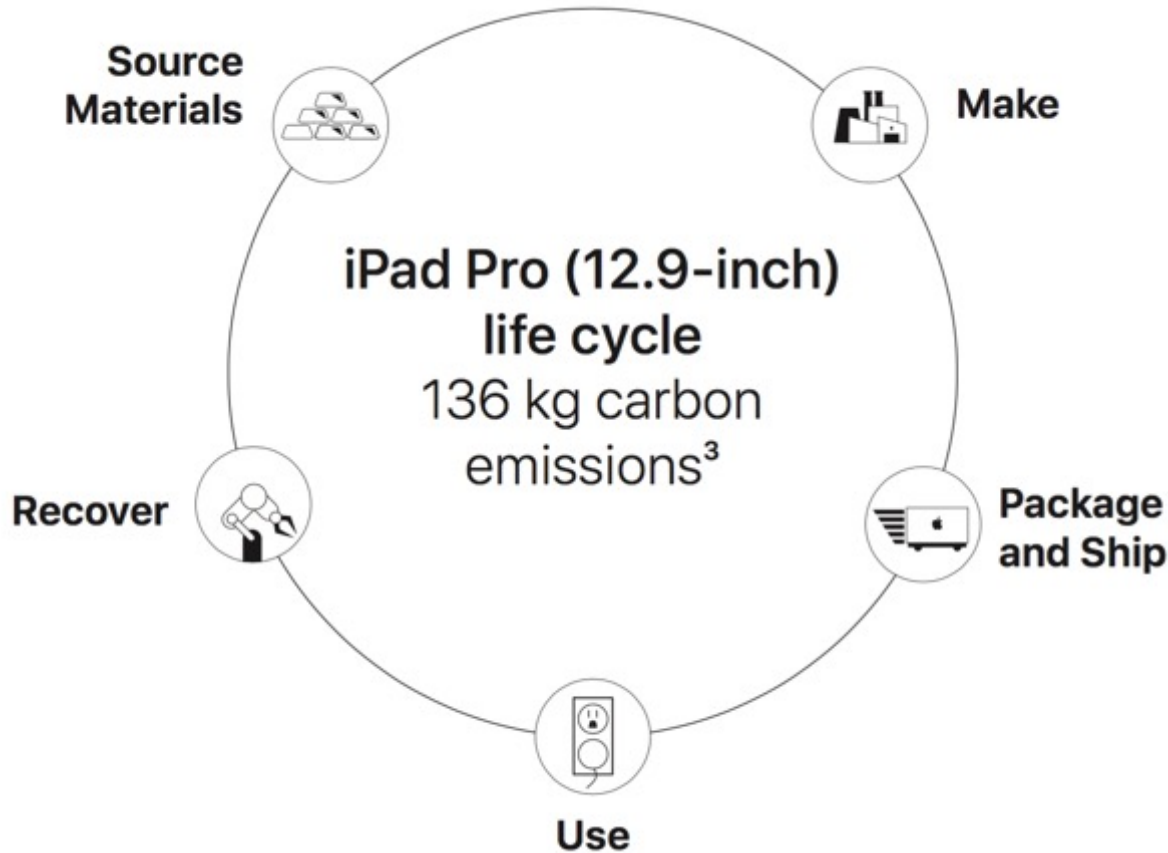
70 MATÉRIAUX POUR FABRIQUER UN SMARTPHONE

RÉPARTITION DU POIDS DES MATÉRIAUX DANS LA COMPOSITION D'UN SMARTPHONE



Source : Oeko-Institut, Ecolinfo et Sénat

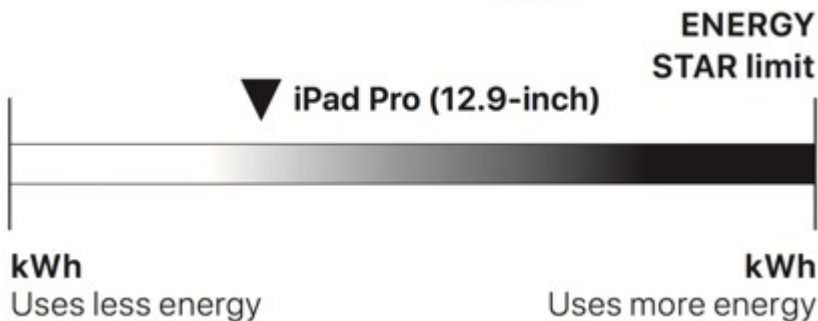
La phase usage : pointe de l'iceberg



iPad Pro (12.9-inch) life cycle carbon emissions

- 83% Production
- 11% Transport
- 6% Use
- <1% End-of-life processing

Pour 3 ans d'utilisation



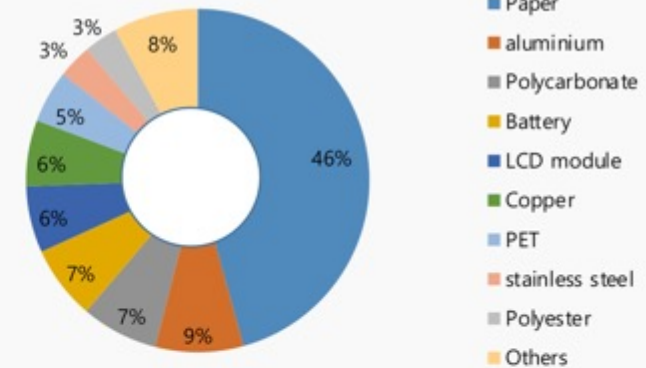
Beaucoup d'autres impacts

Product Features



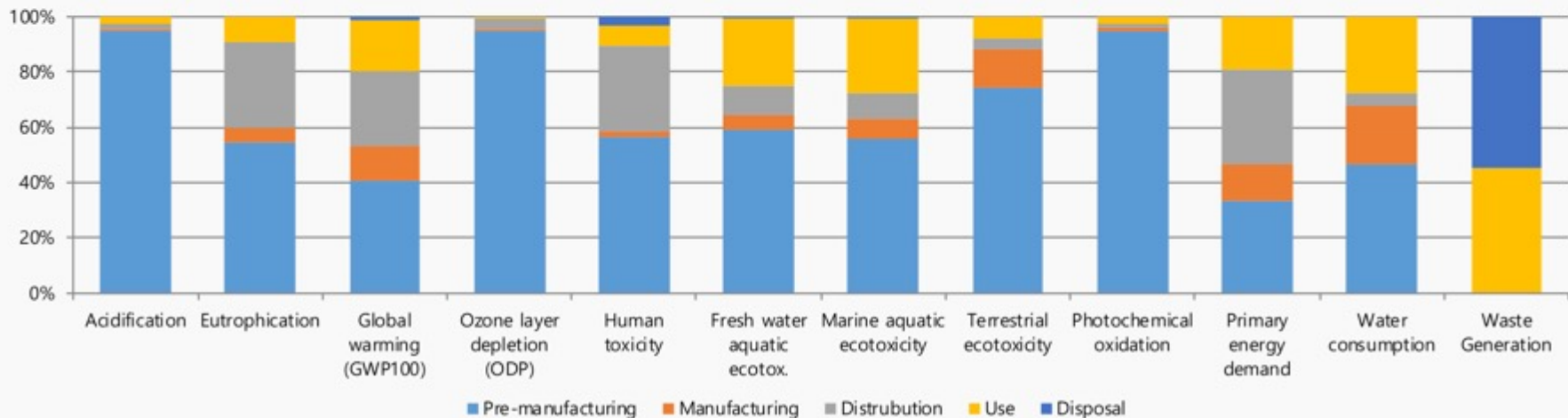
Model name	SM-N950U (Galaxy Note8)
Processor	Qualcomm 2.35GHz, 1.9GHz Octa-Core 64bit
Dimension	162.5 x 74.8 x 8.6 mm
Display	6.3" 2960 x 1440, 16M In-Cell Touch LCD
Battery	Li-Ion 3300 mAh
Camera	12 MP / 5MP
Wt.(g)	186.34g

Material Use



Characterized Environment Impact

[Source : Life Cycle Assessment for Mobile Products, Samsung, 2018.]

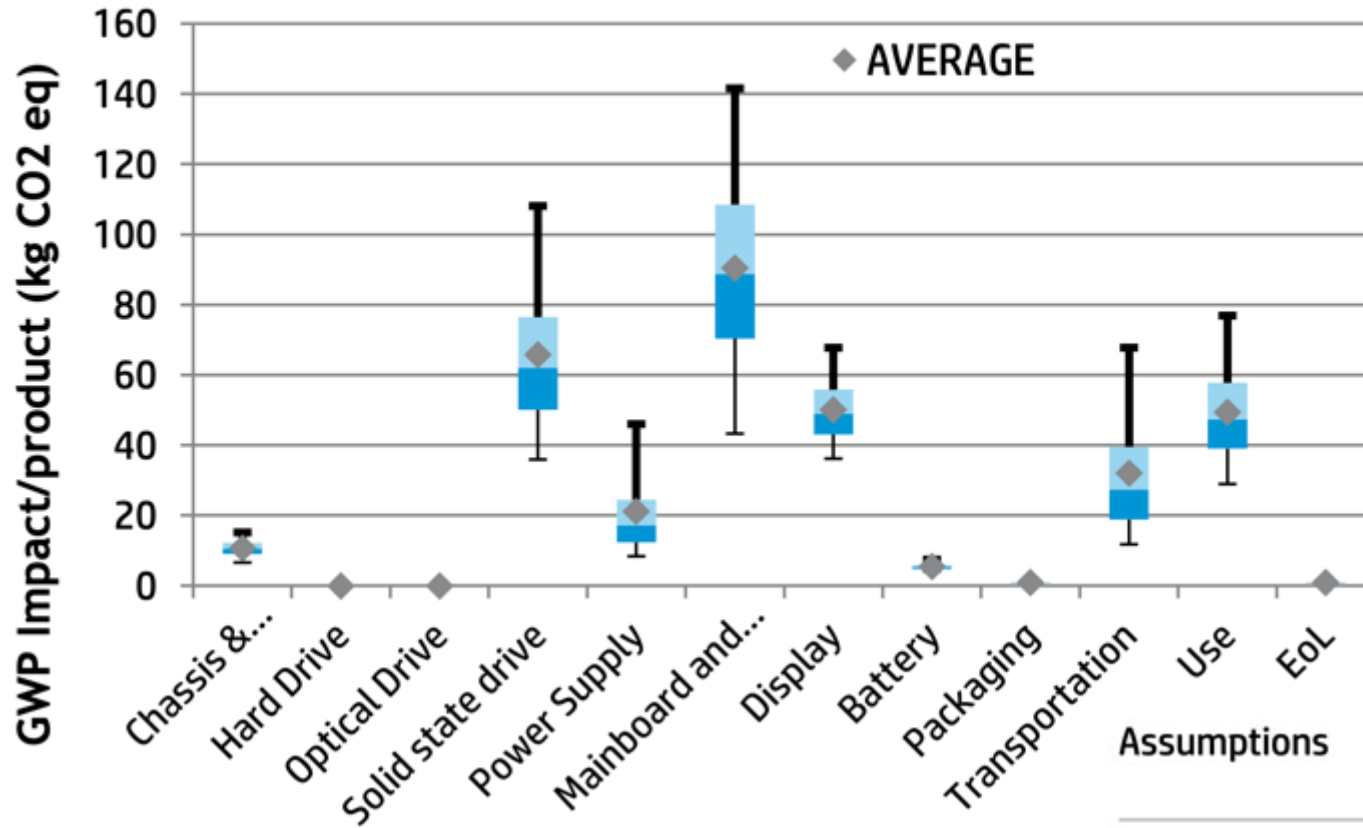


Standard	ISO 14040:2006 and 14044:2006
Database	Ecoinvent 2.2
Method for impact assessment	Life cycle impact assessment classification and characterization factors according to CML 2001 as provided in the SimaPro 7.1.5 LCA tool
LCA software	SimaPro 7.1.5

Pre-manufacturing	Parts and materials constituting the products and its transportation (from supplier to Samsung factory)
Manufacturing	Product assembly by Samsung Electronics (Data collection period : 3 months ahead of assessment)
Distribution	From China or Vietnam to United States
Usage	2 years use
Disposal	Waste treatment of parts and material

Des marges d'incertitudes

GHG emissions [kg CO2 eq]

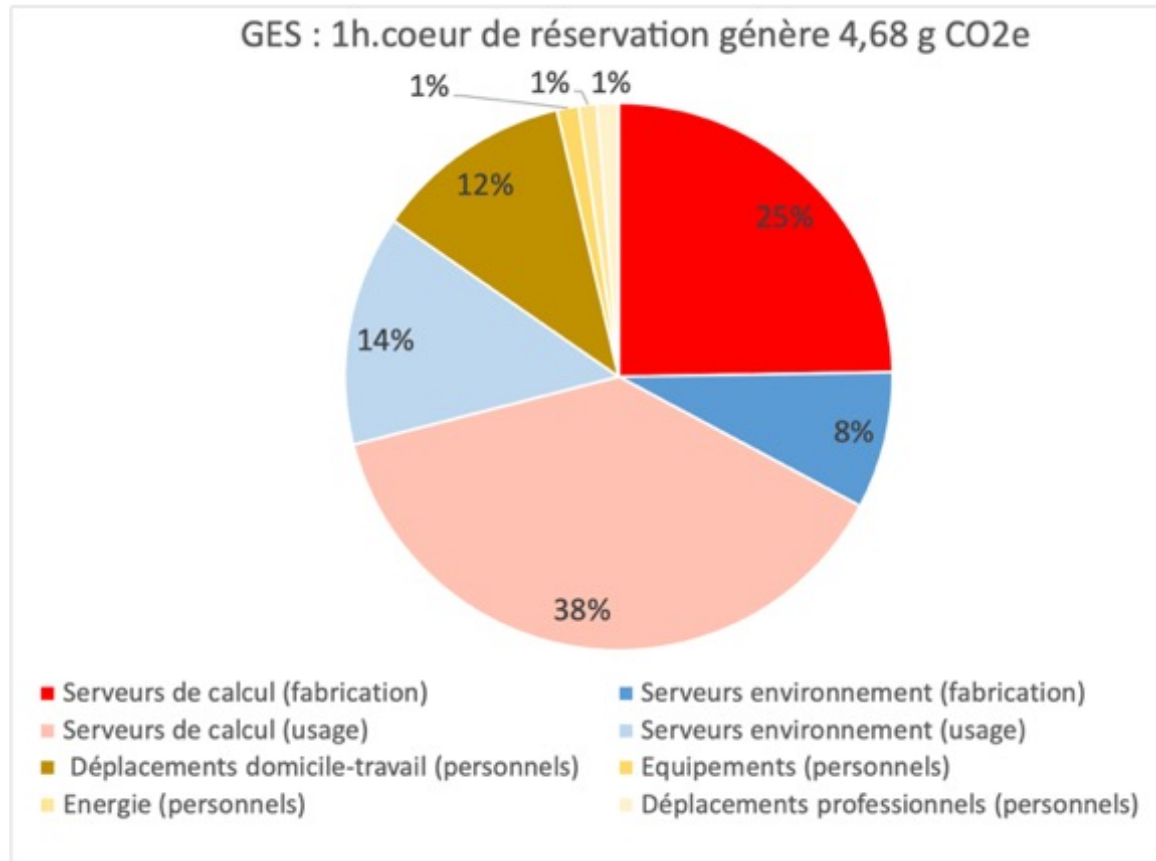


[Source: Product carbon footprint HP mt44, HP, 2018]

Assumptions

Lifetime of product	4 years
Use location	Worldwide
Use energy demand (Yearly TEC)	23.4 kWh
Product weight	1.8 kg
Screen size	14 inches
Final manufacturing location	China

Des périmètres variables

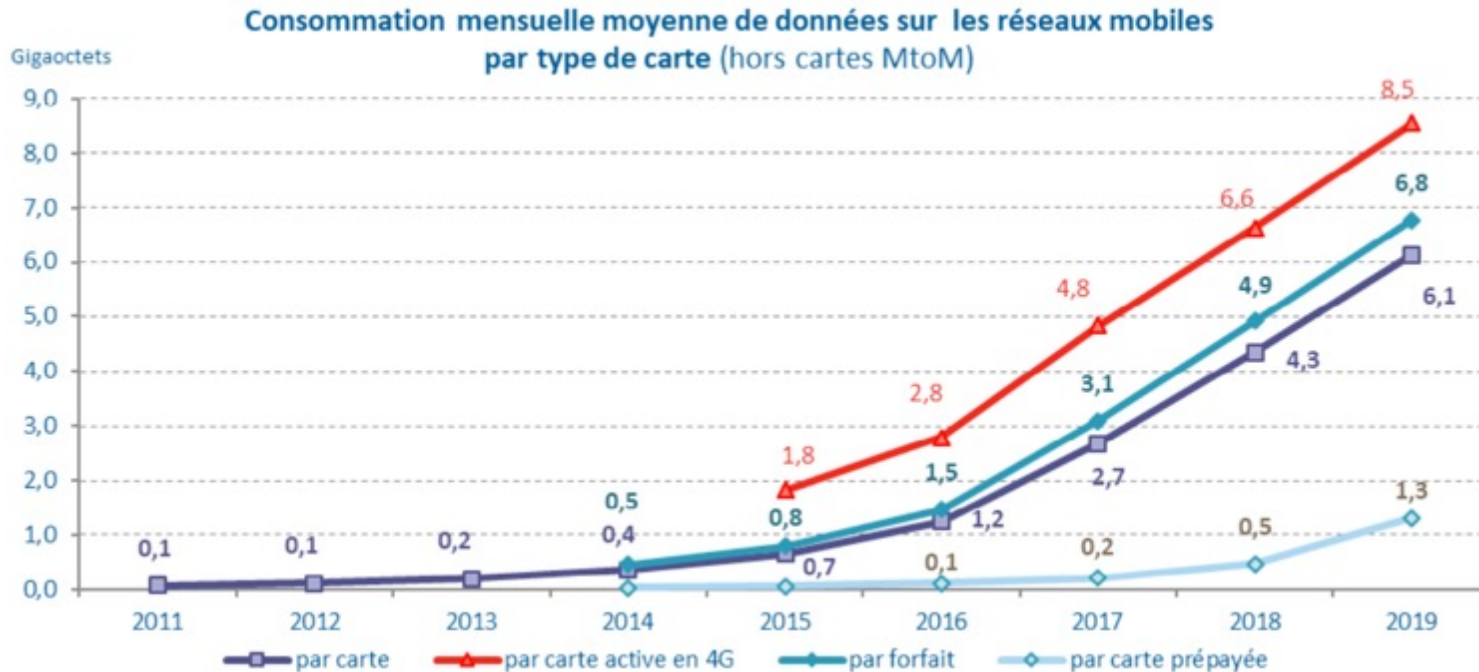


[Source : “Estimation de l’empreinte carbone d’une heure.coeur de calcul”, F. Berthoud, B. Bzezniak, N. Gibelin, M. Laurens, C. Bonamy, M. Morel, X. Schwindenhammer, rapport, 2020]

1 h.coeur → 4.68 g CO₂e

- 15% pour les personnels (incluant trajets pendulaires)
- 85% (3.97 g CO₂e) pour l’équipement (dont 40% pour la fabrication malgré une durée de vie de 7 ans pour les serveurs)

Usages



[Source: Marché des communications électroniques en France - Année 2019, ARCEP]

Au 4^{ème} trimestre 2011 :

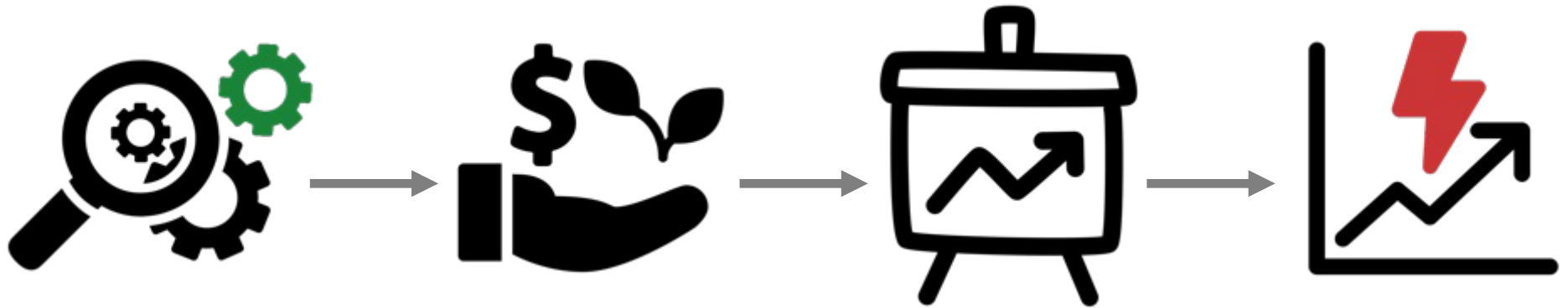
- 65,9 millions de cartes SIM en France (prépayées et abonnements)
- consommation mensuelle moyenne de données par carte SIM : 0,1 Go /mois

Au 4^{ème} trimestre 2021 :

- 80,4 millions de cartes SIM en France
- 10,4 Go /mois (**x100 en 10 ans par carte SIM**)



Augmenter l'efficacité énergétique ≠ réduire la consommation



Optimisations
énergétiques

Réduction du coût
des ressources

Augmentation de
l'utilisation

Augmentation
de l'**énergie**
consommée

Tendances de fond :

- Accélération des taux de renouvellement des équipements
- Explosion des usages et des consommations de données
- Numérisation de tous les secteurs, sans étude préalable des impacts environnementaux

Nombreux impacts du numérique

Des effets directs à chaque étape du cycle de vie

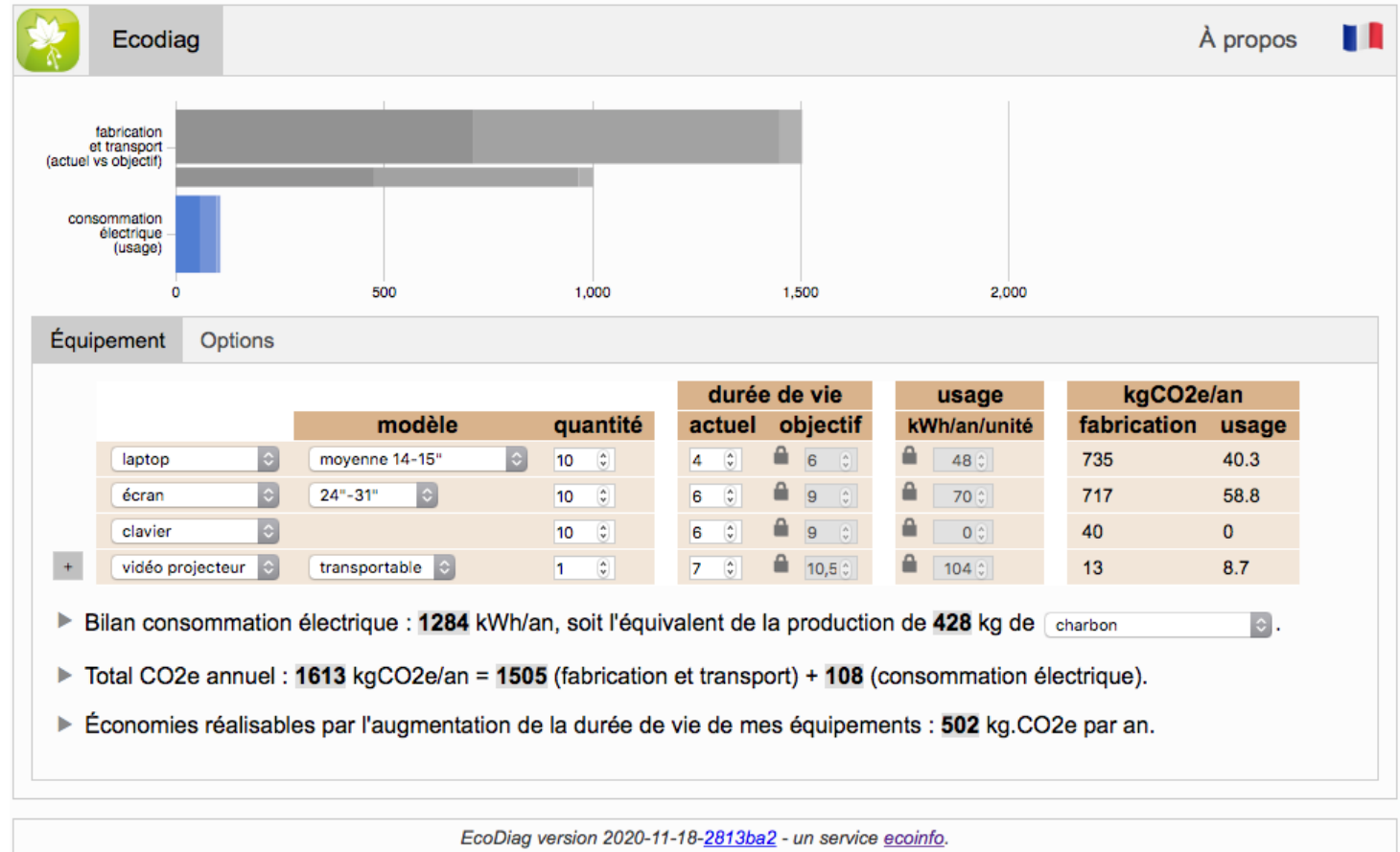
- Extraction : pollution, destruction d'éco-systèmes, conflits armés, épuisement des ressources
 - <https://learninglab.gitlabpages.inria.fr/mooc-impacts-num/mooc-impacts-num-ressources/Partie2/FichesConcept/FC2.3.1-QuelsMinerauxPourUnSmartphone-MoocImpactNum.html>
- Transport
 - <https://learninglab.gitlabpages.inria.fr/mooc-impacts-num/mooc-impacts-num-ressources/Partie2/FichesConcept/FC2.2.1-EmpreinteEnvironnementaleTerminal-MoocImpactNum.html>
- Utilisation : mix électrique
 - <https://interstices.info/le-vrai-cout-energetique-du-numerique/>
- Déchets : collecte insuffisante, recyclage limité
 - <https://learninglab.gitlabpages.inria.fr/mooc-impacts-num/mooc-impacts-num-ressources/Partie2/FichesConcept/FC2.3.3-Recyclage-MoocImpactNum.html>

Nombreux impacts du numérique

Des effets indirects plus ou moins positifs

- Optimisations dans les autres secteurs
 - <https://inria.hal.science/hal-03949261/file/limits22-published.pdf>
 - <https://learninglab.gitlabpages.inria.fr/mooc-impacts-num/mooc-impacts-num-ressources/Partie1/FichesConcept/FC1.4.3-CalculImpactsPositifsNumerique-MoocImpactNum.html>
- Obsolescence
 - <https://learninglab.gitlabpages.inria.fr/mooc-impacts-num/mooc-impacts-num-ressources/Partie2/FichesConcept/FC2.4.4-Obsolescence-MoocImpactNum.html>
- Effets rebond
 - <https://learninglab.gitlabpages.inria.fr/mooc-impacts-num/mooc-impacts-num-ressources/Partie2/FichesConcept/FC2.4.2-EffetsRebonds-MoocImpactNum.html>
- Interdépendance liée au numérique
- Fracture numérique, santé (addictions, etc.)
 - <https://ecoinfo.cnrs.fr/2023/02/27/conf-ecoinfo-ecrans-menaces-sur-la-sante-09-mai-2023/>

ecodiag



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

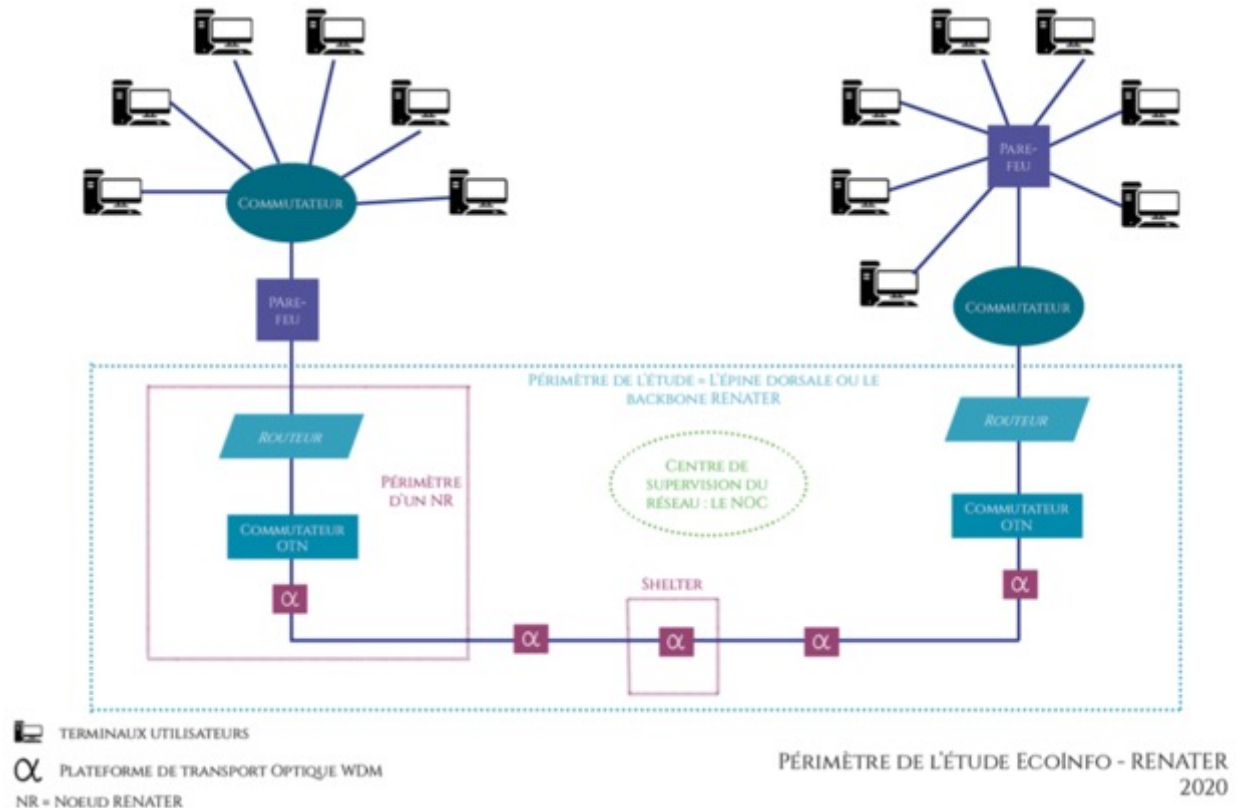
Service en ligne
pour connaître
l'empreinte d'un
ensemble
d'équipements
numériques

Utile pour un parc
informatique

Empreinte du réseau Renater

Quelle est l'empreinte carbone de la transmission d'1 Go sur le réseau RENATER ?

*Unité fonctionnelle :
Transmettre 1 Go de données entre Orsay et Montpellier par une liaison en fibre optique*



<https://ecoinfo.cnrs.fr/2020/12/04/quelle-est-lempreinte-carbone-de-la-transmission-d1-go-sur-le-reseau-renater/>

Référentiel de connaissances

Référentiel de connaissances pour un numérique éco-responsable

Comprendre les impacts environnementaux du numérique, mesurer les impacts, vers un numérique éco-responsable, acteurs du numérique responsable

3.4 Évolution des impacts du numérique

Au-delà de l'impact du numérique à un moment donné, il est nécessaire de comprendre la dynamique d'évolution du secteur dans un contexte où une diminution drastique des impacts écologiques est préconisée par le GIEC.

Notions :

- Développement de l'infrastructure numérique : nombre d'équipements, volumes des données...
- Part croissante des émissions de GES mondiale
- Améliorations techniques : efficacité, intensité, loi de Moore et loi de Koomey, PUE, autonomie des batteries, principe de Landauer etc.
- Prédications vs. projections. Les projections effectuées à partir des modèles ne doivent pas être considérées comme des prédictions. Ils ne capturent, loin s'en faut, pas toute la complexité des évolutions socio-techniques.
- Scénarios prospectifs pour le numérique : connaître et critiquer les scénarios prospectifs incluant un volet numérique : SMART 2020 et 2030 du GeSI, BIO Intellience Service 2008, Shift, Fing, Ademe, etc.

- [1] Cisco. Cisco visual networking index : Forecast and trends, 2017–2022 white paper. Technical report, Cisco, February 2019. Document ID :1551296909190103. URL : <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>.
- [2] Jens Malmödin and Dag Lundén. The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. 10(9) :3027. URL : <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/9/3027>, doi:10.3390/su10093027.
- [3] Shift Project. Lean ICT – pour une sobriété numérique. Technical report, The Shift Project, 2018. URL : <https://theshiftproject.org/article/pour-une-sobriete-numerique-rapport-shift/>.

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02954188>

MOOC



Recherche de cours



INSCRIPTION

CONNEXION

Aide

Français

Accueil

Actualités

Cours

GRADEO

Diplômes

Etablissements

Vous êtes ici: Accueil > Cours > Impacts environnementaux du numérique

Environnement et développement durable

Numérique et technologie

Impacts environnementaux du numérique

Réf. 41025

🕒 Effort : 5 heures 🔄 Rythme: Auto-rythmé

Impact Num est un Mooc pour se questionner sur les impacts environnementaux du numérique, apprendre à mesurer, décrypter et agir, pour trouver sa place de citoyen dans un monde numérique.



2 sessions sont actuellement
ouvertes pour ce cours

Choisir maintenant



<https://ecoinfo.cnrs.fr/2022/01/11/mooc-impacts-environnementaux-du-numerique/>

<http://ecoinfo.cnrs.fr>



SERVICES

THÉMATIQUES

COMMUNICATIONS

LE GDS

EcolInfo

Réduire les impacts environnementaux et sociétaux négatifs des technologies du numérique.

Cet espace est pour vous : enseignant, informaticien, décideur, acheteur, logisticien, en charge du développement durable, et tout particulièrement si vous travaillez dans le secteur de l'enseignement supérieur et de la recherche ou vous êtes simplement curieux ...

Découvrez EcolInfo

Agir vers la sobriété numérique

EcolInfo souhaite ainsi vous accompagner dans l'action et même s'il est difficile de donner des conseils définitifs et absolus, nous allons voir ensemble comment il est possible d'**agir** suivant différents axes pour réduire les impacts des TICs sur notre environnement et appliquer ainsi une forme de sobriété numérique par des comportements et des choix éco responsables (qui tiennent compte des impacts environnementaux du numérique en cherchant à les minimiser).

Newsletter Janvier 2024

Publié: 11/01/2024

Activités d'EcolInfo Actualité EcolInfo L'action Nationale de Formation (ANF les 8R) EcolInfo pour former aux impacts environnementaux du numérique a eu lieu en novembre 2023 à la Rochelle. Vous pouvez trouver les documents et les présentations de cette formation sur...

[Lire la suite...](#)

RECHERCHER

REJOIGNEZ-NOUS



© Léa Castor / INS2I

<http://people.irisa.fr/Anne-Cecile.Orgerie>

