

Cloud Computing

Le numérique et l'environnement

Danilo Carastan dos Santos

`danilo.carastan-dos-santos@univ-grenoble-alpes.fr`

2025

Durabilité

- Selon les Nations Unies
 - Durabilité (*sustainability*) : “la satisfaction des besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins”¹
- Durabilité n'est pas uniquement liée aux impacts environnementaux
- **Objectifs de développement durable** : cadre d'objectifs pour améliorer la vie des gens dans le monde entier et atténuer les effets de l'homme sur le climat.



¹<https://www.un.org/fr/impact-universitaire/durabilite/C3%A9>

Les solutions numériques (y compris les solutions Cloud)

- Cadre de technologies d'information et communication (*Information and Communications Technologies, ICT*)
- Définition d'une solution numérique : “A system encompassing ICT goods, ICT networks and/or ICT services that contributes to meeting a technical, societal or business challenge”¹
- Cela peut inclure : des logiciels, du matériel de traitement et de contrôle des données, infrastructure de réseau de télécommunications, un stockage de données, des écrans, et traitement de données à distance (centre de données et le **Cloud Computing**).

¹Recommendation L.1480 : *Enabling the Net Zero transition: Assessing how the use of information and communication technology solutions impact greenhouse gas emissions of other sectors*. International Telecommunication Union (ITU). <https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1480-202212-I>

Durabilité et le numérique

Deux points de vue

1. Numérique comme solution

- ▶ Transition écologique par la transition numérique (*digital transition*) : le numérique pour optimiser l'utilisation de ressources des activités humaines

- Exemple : réunion en visioconférence au lieu qu'en présentiel

2. Numérique comme problème

- ▶ Illusion du “dématérialisé”, ce qui n'est pas physique, virtuel, coût zéro

- Le numérique est pourtant bien physique et consommateur de ressources

- ▶ Accélérateur des nouvelles modes de consommation et d'usage

- Exemple : *streaming*¹ et publicité ciblée par systèmes de recommandation

- Les deux points de vue s'entremêlent

¹<https://youtu.be/whML39I7Q7Y?t=1593>

Focus sur l'impact environnemental

- Synthèse sur les composants principaux :
 1. Indicateurs d'impact
 2. Phases du cycle de vie
 3. Périmètre

Indicateurs d'impact

Quelques exemples

- Les plus souvent utilisés
 1. Consommation d'énergie primaire (électricité, carburants)
 2. Changement climatique (émissions de gaz à effet de serre)
- Moins souvent utilisés, mais également importants
 1. Utilisation d'eau
 2. Épuisement des ressources abiotiques : Épuisement des ressources naturelles non fossiles (métaux rares)
 3. Radiations ionisantes : Dommages à la santé humaine et aux écosystèmes liés aux émissions de radionucléides

Indicateurs d'impact

Changement climatique

- Mesuré en kilogrammes de CO2 équivalent émis dans l'atmosphère
- Équivalent CO2 :
 - ▶ Il existe plusieurs gaz à effet de serre, avec un potentiel de réchauffement global (*global warming potential*¹, GWP) spécifique
 - ▶ CO2 est la référence (GWP = 1).
 - ▶ Un gaz avec un GWP = 2 signifie qu'il a deux fois plus de potentiel de réchauffement global
 - ▶ Exemples de GWP : protoxyde d'azote (N2O) = 273
 - 1 kg de protoxyde d'azote émis dans l'air équivaut à 273 kg de CO2 émis dans l'air

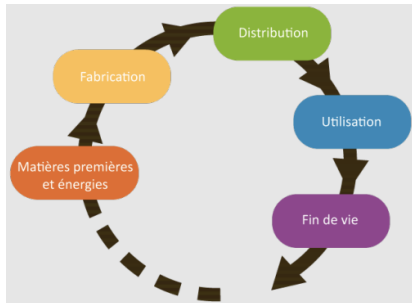
¹https://fr.wikipedia.org/wiki/Potentiel_de_r%C3%A9chauffement_global

Émissions liées à l'électricité

Mix énergétique

1. <https://ourworldindata.org/electricity-mix>
2. <https://app.electricitymaps.com/map/24h>

Phases du cycle de vie



- Phase d'utilisation est largement prise en compte.
- Les autres phases sont souvent négligées
- **Question** : Quelles parties d'une solution numérique appartiennent à quelle phase du cycle de vie ?

Périmètre

Deux concepts :

1. Scope

- ▶ Scope 1 : Émissions directes provenant de sources détenues ou contrôlées
- ▶ Scope 2 : Émissions liées à la consommation d'énergie
- ▶ Scope 3 : Émissions liées à la chaîne de valeur

2. Ordre¹

- ▶ Premier ordre : Impacts liés au cycle de vie de la solution
- ▶ Deuxième ordre : Conséquences directes après le déploiement de la solution
- ▶ Effets d'ordre supérieure : Conséquence d'impacts de deuxième ordre, souvent dû aux changements de modes de consommation, de comportement, style de vie, etc. Effets rebond.

¹<https://www.greendigitalcoalition.eu/assets/uploads/2024/04/EGDC-Net-Carbon-Impact-Assessment-Methodology-for-ICT-Solutions.pdf>

Mise en situation

Développement d'une plate-forme de *streaming* (1 sur 3)

- Indicateur : émissions de CO2
- Phases du cycle de vie
 - ▶ **Matières premières** : extraction de métaux pour fabriquer l'infrastructure informatique (serveurs, réseau, etc.)
 - ▶ **Fabrication** : manufacture du matériel informatique (CPU, mémoire, stockage, GPU, routeurs réseau, fibre optique, tours réseau mobile)
 - ▶ **Distribution** : livraison du matériel informatique
 - ▶ **Utilisation** : électricité consommée pendant le par la plate-forme (développement + usage par les clients + infrastructure réseau) multipliée par le mix énergétique de l'électricité
 - ▶ **Fin de vie** : élimination ou recyclage de du matériel informatique

Mise en situation

Développement d'une plate-forme de *streaming* (2 sur 3)

- Périmètre
 - ▶ **Scope 1** : Pas d'émissions
 - ▶ **Scope 2** :¹ Émissions liées à la consommation d'électricité du développement + potentiel hébergement du service sur place (phase d'utilisation)
 - ▶ **Scope 3** : Émissions liées à l'électricité consommée par les clients, infrastructure réseau et hébergement externe (phase d'utilisation). Émissions liées aux phases matières premières, fabrication et fin de vie

¹Scope 2 est le composant le plus pris en compte actuellement

Mise en situation

Développement d'une plate-forme de *streaming* (3 sur 3)

- **Ordre**
 - ▶ **Premier ordre** : Émissions liées à tous les composants mentionnés dessus
 - ▶ **Deuxième ordre** : Émissions liées à la consommation des médias physiques (DVD) (réduction d'émissions). Émissions liées à la demande des clients (augmentation d'émissions)
 - ▶ **Effets d'ordre supérieur** : Émissions liées aux changements de comportement induits par le service :
 - Streaming sur téléphone portable + réseau mobile
 - Addiction aux vidéos courtes
 - Consommation induite par la publicité ciblée, via des publicités intégrées dans le service ou des influenceurs
 - Changement d'infrastructure pour répondre à la demande (4G → 5G → 6G → ...)

L'effet rebond

- Concept provenant du domaine de l'économie : Paradoxe de Jevons¹
- À mesure que les améliorations technologiques augmentent l'efficacité avec laquelle une ressource est employée, la consommation totale de cette ressource peut augmenter au lieu de diminuer
- Pensée générale : un service est plus efficace → le service devient moins cher/plus pratique/plus attractif → le service est plus utilisé → la consommation de ressources augmente
- **Question ouverte** : Trouver un service numérique où des optimisations particulières n'ont pas été accompagnées d'effets rebond²

¹https://fr.wikipedia.org/wiki/Paradoxe_de_Jevons

²<https://cacm.acm.org/opinion/>

Les outils existants (1 sur 2)

- Phase d'utilisation (consommation électrique dans l'infrastructure informatique sur place)
 - ▶ Wattmètres physiques et logiciels¹
 - Possible uniquement sur en Cloud privé ou sur un service IaaS (*infrastructure as a service*)
- Les autres phases
 - ▶ Base IMPACTS numérique de l'ADEME²
 - ▶ Datavizta³
 - ▶ Ecoinvent⁴ (base payante)
 - ▶ Certaines phases, notamment la fin de vie et distribution (transport), parfois ne sont pas prises en compte

¹Contenu abordé en détail dans l'UE Eco-Conception Web en M2 MIAGE

²<https://base-empreinte.ademe.fr/documentation/base-impact?>

[idDocument=167](#)

³<https://dataviz.boavizta.org/>

⁴<https://ecoinvent.org/>

Les outils existants (2 sur 2)

- Les effets d'ordre supérieur et effets rebond
 - ▶ Analyses qualitatives *ad-hoc* (évaluation au cas par cas)
 - ▶ Domaine de recherche récent
- Services fournis par les *hyperscalers*
 - ▶ AWS : Customer carbon footprint tool¹
 - ▶ GCP : Carbon footprint²
 - ▶ Azure : Emissions impact dashboard³
 - ▶ **Question** : Quels sont les indicateurs et le périmètre couverts par les services des hyperscalers ?

¹<https://aws.amazon.com/fr/aws-cost-management/aws-customer-carbon-footprint-tool/>

²<https://cloud.google.com/carbon-footprint>

³<https://www.microsoft.com/en-us/sustainability/emissions-impact-dashboard>

Que peut-on faire ?

Quelques pistes

- Interroger la pertinence des solutions
 - ▶ Trop futile ? Trop gadget ?
 - ▶ Risque de surconsommation/superattractivité/addiction ?
- Mesurer et estimer les impacts dans tout le cycle de vie et le périmètre le plus large possible
- Informer les utilisateurs/clients de ces mesures et estimations
- Éviter de :
 - ▶ Promettre une livraison de service immédiate, quel que soit le nombre de clients et d'usages
 - ▶ Promettre un stockage illimité dans l'espace et dans le temps
 - ▶ Supposer la disponibilité éternelle de certains matériels, logiciels et fournisseurs cloud
 - ▶ Concevoir des services permettant des extensions fonctionnelles illimitées

Contenu Supplémentaire

- International Telecommunication Union (ITU). L.1480 : Enabling the Net Zero transition: Assessing how the use of information and communication technology solutions impact greenhouse gas emissions of other sectors (2022)¹
- European Green Digital Coalition (EGDC). Net-Carbon Impact Assessment Methodology (2024)²
- Perasso, E. L., Vateau, C., & Domon, F. (2022). Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective. ADEME³
- Maraninchi, F. (2022). Let us not put all our eggs in one basket. Communications of the ACM, 65(9), 35-37

¹<https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1480-202212-I>

²<https://www.greendigitalcoalition.eu/>

[net-carbon-impact-assessment-methodology-for-ict-solutions/](https://www.greendigitalcoalition.eu/net-carbon-impact-assessment-methodology-for-ict-solutions/)

³https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/etude-numerique-environnement-ademe-arcep-volet02_janv2022.pdf