

Quels indicateurs pour évaluer l'empreinte numérique ?

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Introduction | 3 |
| I - Comment mesurer notre impact environnemental ? | 4 |
| 1. Exercice : Question 1 | 4 |
| 2. Exercice : Question 2 | 4 |
| 3. Exercice : Question 3 | 4 |
| 4. Exercice : Question 4 | 4 |
| 5. Exercice : Question 5 | 5 |
| 6. Et l'impact du numérique ? | 5 |
| 7. Exercice : Question 6 | 5 |
| 8. Exercice : Question 7 | 5 |
| II - Fiches concept | 7 |
| 1. Les indicateurs, de la définition à leur construction | 7 |
| 1.1. Définition | 7 |
| 1.2. À propos des indicateurs environnementaux | 8 |
| 1.3. Zoom sur deux indicateurs environnementaux simples | 8 |
| 1.4. Un exemple d'indicateur environnemental synthétique : l'Empreinte Écologique (EE)..... | 9 |
| 1.5. Enseignements pour l'évaluation environnementale | 10 |
| 2. Le numérique et l'environnement en quelques chiffres | 11 |
| 3. Numérique et électricité : mesures, proportionnalité et efficacité énergétique .. | 14 |
| 3.1. Métriques électriques | 14 |
| 3.2. Mesurer la consommation d'un équipement numérique | 15 |
| 4. Résultats chiffrés : quelle fiabilité ? | 17 |
| Contenus annexes | 20 |
| Bibliographie | 22 |
| Webographie | 23 |
| Crédits des ressources | 25 |

Introduction

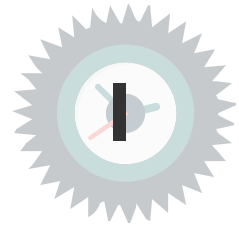


Mesurer, c'est passer de la perception que nous délivrent nos sens à une information objective que l'on peut analyser, discuter, comparer, qui nous aide à comprendre. Si l'on ressent une sensation de froid, connaître notre température corporelle, la température ambiante, l'humidité permet de mieux comprendre d'où vient cette sensation.

Nous sommes aujourd'hui à l'ère de la data, nous disposons de données de toutes sortes : mesures acquises par des capteurs performants, informations collectées avec ou sans notre consentement, ... Le numérique nous offre une formidable capacité de collecter, stocker et traiter ces données. Et cela nous aide à comprendre notre impact sur l'environnement.

Alors, que sait-on de l'impact environnemental de l'homme sur le climat ? Et que nous disent ces indicateurs sur l'impact environnemental du numérique ?

Comment mesurer notre impact environnemental ?



Vous avez l'impression que les étés sont de plus en plus chauds ? D'autres doutent du réchauffement climatique à la première vague de froid ?

Est-ce que la science sait vraiment ce qu'il en est ? Et comment le sait-elle ? Que faut-il mesurer pour savoir si la planète chauffe ou pas ? Et pour savoir ce qui y contribue ?

Cette activité illustre l'usage du numérique pour renseigner des indicateurs pertinents et introduit le sujet de la crise environnementale.

1. Exercice : Question 1

L'effet de serre provoque le réchauffement de la planète

- Vrai
- Faux

2. Exercice : Question 2

Les activités humaines produisent-elles des gaz à effet de serre ?

- Vrai
- Faux

3. Exercice : Question 3

Afin de comparer les effets sur le réchauffement global des différents gaz à effet de serre, les scientifiques ont choisi un gaz de référence. Lequel ?

- Le CO₂ (dioxyde de carbone)
- Le N₂O (protoxyde de carbone)
- Le CH₄ (méthane)

4. Exercice : Question 4

À ce jour, quel est approximativement le réchauffement global généré par les activités humaines depuis la révolution industrielle [1850 - 1900] ?

- +0,1°C
- +0,5°C
- +1°C

5. Exercice : Question 5

Si ces émissions continuent à la vitesse actuelle, quand atteindrons-nous un réchauffement de +1,5°C depuis le début de la révolution industrielle ?

- Entre 2030 et 2052
- Entre 2052 et 2075
- Entre 2075 et 2100

6. Et l'impact du numérique ?

Mais qu'en est-il de l'impact environnemental du numérique lui-même ? Quels sont les indicateurs pertinents ? Les grandeurs qui nous permettront de considérer l'évolution de ces impacts et de prendre les décisions ?

C'est ce que nous allons voir maintenant.

Les principaux indicateurs utilisés pour évaluer l'impact du numérique sur l'environnement sont :

- **Empreinte carbone.** Quantité de **GES** émise sur toutes les phases de cycle de vie de l'équipement ou du service (en kg eq CO₂).
- **Stress hydrique. Épuisement de la ressource en eau**, exprimé en équivalent m³, correspondant à l'usage direct et indirect de l'eau par le consommateur ou le producteur.
- **Déplétion des minéraux. La rareté des ressources minérales** (métaux notamment), plusieurs dizaines de minéraux sont considérés dans cet indicateur. La méthode tient compte du taux d'extraction et du stock disponible et l'unité est le kg antimoine équivalent (kg Sb).
- **Consommation électrique. Quantité d'électricité consommée** lors de l'utilisation d'un équipement, d'un service (en kWh).
- **Énergie primaire consommée. Quantité d'énergie primaire** nécessaire pour produire l'énergie finale utilisée tout au long du **cycle de vie** d'un équipement (en kWh).

7. Exercice : Question 6

Quelle est la consommation électrique mondiale liée aux usages numériques ?

- Moins de 1 %
- Autour de 10 %
- Plus de 30 %

8. Exercice : Question 7

Quelle est la part du numérique dans l'empreinte carbone moyenne d'un français ?

- Moins de 10 %
- Entre 10 % et 20 %
- Plus de 20 %

Comment mesurer notre impact environnemental ?

Dans cette activité, nous avons introduit les principaux indicateurs du réchauffement climatique, l'équivalent CO₂ et l'augmentation de température globale, ainsi que les principaux indicateurs utilisés pour évaluer l'impact environnemental du numérique.

Nous avons donné deux estimations de l'impact du numérique : la part du numérique dans la consommation mondiale d'électricité et dans l'empreinte carbone moyenne d'un français. Ce n'est qu'un début, nous en verrons bien d'autres.

Crédits (cf. p.20)

Fiches concept



La fiche *Les indicateurs, de la définition à leur construction* (cf. p.7) vous explique ce qu'est un indicateur, comment on le construit et quels sont les principaux indicateurs environnementaux ?

La fiche *Le numérique et l'environnement en quelques chiffres* (cf. p.11) vous donnent quelques chiffres internationaux et français sur les équipements numériques, et quelques illustrations de taux d'équipement et de numérisation en France.

La fiche *Numérique et électricité : mesures, proportionnalité et efficacité énergétique* (cf. p.14) vous explique quelles sont les métriques utilisées pour analyser la consommation électrique des équipements numériques en phase d'usage et comment mesurer la consommation d'un équipement numérique.

La fiche *Résultats chiffrés : quelle fiabilité ?* (cf. p.17) vous propose de réfléchir sur la fiabilité des chiffres et sur le degré de confiance qu'on peut leur accorder. Alerte aux chiffres, alerte au "greenwashing" ! À partir de 3 exemples : un article, une application et une étude.

1. Les indicateurs, de la définition à leur construction

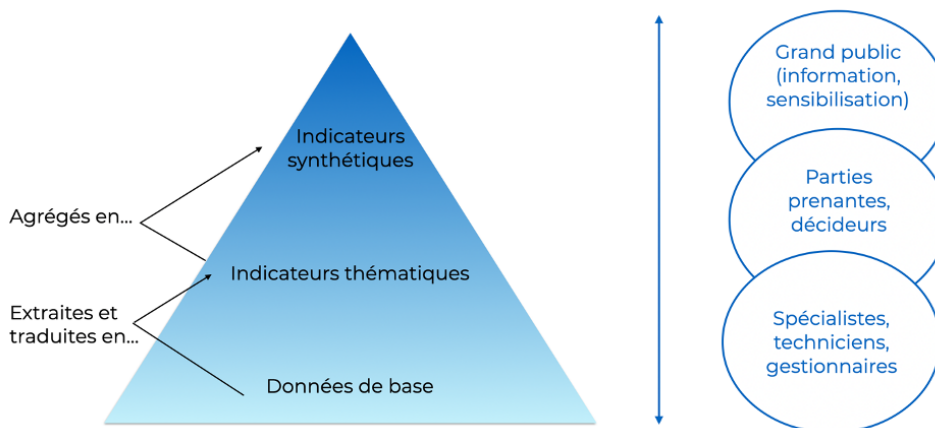
1.1. Définition

Un indicateur est la traduction chiffrée d'un phénomène ou d'un concept (*Boutaud, 2015*)*. Les indicateurs peuvent avoir pour but de :

- **simplifier une information** en la rendant compréhensible par un public cible,
- **décrire une situation** et **permettre des comparaisons** dans l'espace et dans le temps.

Un indicateur est une construction : il nécessite des matières premières, les données de base, et un mode d'emploi, en l'occurrence, des conventions de calcul (*Boutaud, 2015*)*. Ces conventions de calcul sont choisies à chaque étape de la conception de l'indicateur et sont déterminantes dans l'interprétation que l'on pourra en tirer.

On distingue généralement les **indicateurs simples**, qui se basent sur un petit nombre de données et dont le champ est limité (ex : taux de chômage) et les **indicateurs synthétiques** (ou composites) qui agrègent plusieurs dimensions. Ces derniers sont en général à destination du grand public à des fins d'information ou de sensibilisation.



Typologie des indicateurs

1.2. À propos des indicateurs environnementaux

Il existe un très grand nombre d'indicateurs environnementaux et chaque organisation construit généralement un tableau de bord propre à ses besoins spécifiques.

Les indicateurs peuvent être classés en fonction de l'enjeu écologique auquel ils correspondent. Par exemple le ministère de l'écologie a sélectionné 22 indicateurs essentiels pour suivre 4 enjeux écologiques majeurs : le changement climatique, la perte de biodiversité, la raréfaction des ressources et la multiplication des risques sanitaires environnementaux (Vey et Hesse, 2019)*. Le rapport sur l'état de l'environnement en France (Morard et Joassard, 2019)* propose par ailleurs un état des lieux encore plus complet en mettant en regard les indicateurs avec les limites planétaires (CRDD, 2021)*.

Une autre façon d'organiser les indicateurs est la grille de lecture « Forces motrices - Pressions -- État - Impacts -- Réponses ». Elle permet de distinguer les indicateurs qui caractérisent :

- les activités humaines à l'origine des pressions (modes de production, de consommation, inégalités, démographie...),
- les pressions elles-mêmes (consommations de ressources et émissions de polluants),
- l'état actuel de l'environnement (ex : concentration en polluants dans l'air, le sol ou l'eau),
- les conséquences écologiques, sociales et économiques de la dégradation de l'environnement,
- les mesures prises pour réduire l'ampleur du problème.

1.3. Zoom sur deux indicateurs environnementaux simples

Émissions de gaz à effet de serre

Les **gaz à effet de serre (GES)** sont des composants gazeux qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et contribuent ainsi à l'effet de serre. Les principaux GES contribuant au réchauffement climatique sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), l'ozone troposphérique (O₃), ainsi que certains halocarbures industriels (utilisés notamment pour la production de froid/climatisation...).

Ces gaz ont chacun un temps de subsistance dans l'atmosphère et un pouvoir de réchauffement différent. C'est pourquoi il est utile de les pondérer pour les exprimer en une unité commune : **l'équivalent CO₂**.

La méthode du **Bilan Carbone** peut être utilisée pour comptabiliser les émissions de GES directes et indirectes d'une organisation ou d'un territoire (ADEME, Bilan GES)*.

Empreinte en eau

L'**empreinte en eau** (water footprint) mesure l'eau douce appropriée (consommée ou polluée) par une entité donnée qui peut être l'humanité toute entière, un pays, une entreprise, un ménage, un produit etc. Cet indicateur, exprimé en m³, peut être décliné selon les besoins en mesure d'intensité, par exemple m³/€, m³/tonne de produit, m³/ha.

Il comprend trois composantes :

- l'**eau « verte »** correspond aux précipitations qui sont directement consommées par les plantes (évapotranspiration),
- l'**eau « bleue »** correspond aux prélèvements dans les masses d'eau superficielles ou souterraines (adduction d'eau potable, irrigation, consommation d'eau par l'industrie...)
- l'**eau « grise »** correspond au volume d'eau qui serait nécessaire pour diluer les polluants finissant dans une masse d'eau afin d'atteindre des standards de qualité donnés (ex : concentration en azote, demande chimique/biologique en oxygène...).

1.4. Un exemple d'indicateur environnemental synthétique : l'Empreinte Écologique (EE)

La conception d'un indicateur environnemental synthétique est complexe. L'*OECD (2008)** a proposé de suivre un certain nombre d'étapes qui sont explicitées ci-dessous et mises en pratiques dans l'exemple de l'empreinte écologique.

Conception d'un indicateur

Voici les **étapes de conception d'un indicateur** :

- La définition de l'objectif visé, du public cible, et des dimensions à prendre en compte
- L'identification des données de base et la mise au point des indicateurs simples permettant de représenter chaque dimension
- La normalisation des indicateurs représentant chaque dimension afin de les rendre comparables
- L'agrégation des indices correspondant à chaque dimension.

On distingue deux grandes familles de méthodes :

- celles qui consistent à agréger puis comparer (par exemple la moyenne pondérée)
- celles qui consistent à comparer les alternatives deux à deux sur un critère unique puis à agréger ces comparaisons.

On retiendra que la moyenne pondérée, qui est de très loin la plus utilisée, a des inconvénients très importants souvent non perçus par les concepteurs : notamment elle autorise une compensation entre critères (une mauvaise performance dans un critère peut être contre-balançée par une très bonne performance sur un autre critère) ce qui a tendance à pénaliser les alternatives « équilibrées » comme le montre l'exemple ci-dessous :

| | Pablo | Lara | Juan |
|----------|-------|------|------|
| Français | 10 | 3 | 6 |
| Math | 3 | 10 | 6 |

Illustration de l'agrégation multicritère : avec une moyenne pondérée, Juan ne peut jamais être classé premier, quels que soient les coefficients choisis !

- L'analyse d'incertitude et de sensibilité pour mesurer l'impact des choix méthodologiques effectués sur la valeur finale de l'indicateur composite
- Et enfin la diffusion et la valorisation des résultats

L'empreinte écologique

Objectif et périmètre : L'Empreinte Ecologique (EE) est un indicateur développé par *Global Footprint Network^{1*} qui vise à mesurer la surface bioproductive nécessaire à une population pour (i) lui fournir les ressources de biomasse qu'elle consomme, (ii) absorber ses émissions de CO₂. Les questions de pollutions (air/sol/eau), d'épuisement de ressources non renouvelables, d'épuisement de ressources en eau, ou encore de biodiversité sont en dehors du périmètre d'analyse. Les dimensions prises en compte sont finalement : l'empreinte carbone (entendue comme la surface de forêt nécessaire pour absorber les émissions de CO₂), l'empreinte forêt, l'empreinte de terres cultivées, l'empreinte de pâturages, l'empreinte de pêche et l'empreinte de terrains bâtis (il est en effet considéré que l'artificialisation des sols a lieu sur des terres arables). Pour ses promoteurs, l'EE est destinée au grand public mais également aux décideurs.

¹ <https://www.footprintnetwork.org/>

Calculs effectués pour chaque type de surface : L'EE propose de calculer l'empreinte de consommation de chaque pays. Cette empreinte de consommation est reliée aux empreintes de production, d'importation et d'exportation par l'équation suivante :

$$EE_c = EE_p + (EE_i - EE_e)$$

Empreinte Ecologique (EE) de consommation ...de production ...des importations nettes (importations moins exportations)

L'empreinte écologique

Prenons l'exemple de la forêt. L'empreinte de production (exprimée en hectare mondiaux de forêts) est calculée en divisant la quantité de bois extraite dans un pays donné (m^3) par la productivité biologique moyenne (photosynthèse) des forêts au niveau mondial (m^3/ha mondial moyen).

Pour éviter les doubles comptages, seules les matières premières sont considérées dans le calcul de l'empreinte de production. En revanche, tous les types de produits (transformés ou non) sont inclus dans les empreintes d'import et d'export. En présence d'un produit transformé, il faut déterminer combien de matières premières ont été utilisées pour le produire. Il est fréquent d'être confronté à la présence de coproduits : par exemple, pour faire du lait, une vache produit aussi des veaux. Il est alors nécessaire de répartir les empreintes imputées à la vache entre ces coproduits pour ne pas faire de doubles comptages et on peut pour ce faire utiliser différentes méthodes (par exemple allocation biophysique en fonction du contenu en énergie ou en protéines de chaque produit, ou encore allocation économique en fonction de la valeur de chaque produit).

Enfin, une biocapacité est également associée à chaque type de surface. Elle représente ce que la nature peut produire comme ressources/absorber comme CO₂ chaque année, c'est-à-dire la valeur maximale soutenable pour l'empreinte. La différence entre empreinte et biocapacité fournit ainsi une mesure du dépassement écologique.

Ces principes, décrits plus en détails dans (Boutaud et Gondran, 2010)* et (Lin et al., 2019)*, sont appliqués à tous les types de surface.

Agrégation des différentes empreintes et biocapacités : Pour additionner les différents types d'empreinte (forêts, cultures...), celles-ci sont exprimées en une unité commune, l'hectare global, correspondant théoriquement à un hectare de productivité biologique moyenne. En pratique, chaque type de surface reçoit un coefficient de pondération correspondant à son potentiel pour la production de nourriture (les terres cultivées ont un plus grand potentiel que les forêts qui ont un plus grand potentiel agronomique que les pâturages).

Attraits et critiques de l'Empreinte Écologique : Le succès de cet indicateur auprès du grand public tient à sa capacité à définir un dépassement écologique : on peut ainsi communiquer autour du « jour du dépassement » ou encore du nombre de planètes qui seraient nécessaires pour soutenir notre consommation de façon durable. Il s'agit par ailleurs d'un excellent moyen de se familiariser avec la comptabilité environnementale. Cependant, il est reproché à l'EE d'être trop simplificatrice (force est de constater qu'il est impossible de résumer les problèmes étudiés à une seule dimension) et surtout de sous-estimer fortement l'ampleur du dépassement écologique, ce qui empêche d'en faire un indicateur fiable pour la décision publique (voir par exemple (Giampietro, 2014)*).

1.5. Enseignements pour l'évaluation environnementale

Nous pouvons tirer de ces exemples certains points clés pour l'évaluation environnementale en général :

- La perspective du producteur vs. celle du consommateur sont deux moyens d'allouer les pressions environnementales émises à travers le monde. La responsabilité du producteur comptabilise les pressions directement émises par le système étudié (et donc théoriquement mesurables physiquement, même si en pratique il existe des manques de données et des

incertitudes). Les engagements climatiques pris par les pays lors des COP adoptent cette vision. La responsabilité du consommateur comptabilise les pressions émises n'importe où dans le monde pour satisfaire la consommation du système étudié. Son calcul n'est pas univoque car il nécessite des règles d'allocation qui peuvent être diverses (physiques, monétaires etc.). Les deux perspectives éclairent des aspects différents du problème (modes de production vs. modes de consommation) et méritent d'être analysées en parallèle.

- Éviter les doubles comptages, notamment via des méthodes d'allocation
- Définir un dépassement écologique en comparant les pressions exercées à la capacité de charge de l'environnement local ou global. Cela s'appelle étudier la durabilité environnementale absolue (*Bjørn et al., 2019*)* et cela pose par ailleurs des questions normatives incontournables : pour déterminer le dépassement écologique d'un pays faut-il considérer que la capacité de charge mondiale est répartie équitablement entre chaque être humain ou varie selon les dotations en ressources naturelles propres à chaque pays ?

2. Le numérique et l'environnement en quelques chiffres

Le numérique, kesako ?

Un équipement numérique, par définition, est un équipement qui manipule des données numérisées, c'est à dire binaires.

"Le Numérique" regroupe toutes les activités humaines permises par ces équipements, associées à des champs aussi divers que communications, achats, services, loisirs, culture, divertissements, vidéo, musique, bureautique, utilisation des données massives, calculs, etc...

Les équipements numériques, selon *greenit.fr (2019)**, sont classés selon 3 catégories allant du grand public aux entreprises.

| Terminaux | Réseau | Datacentre |
|------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Smartphones | Box particuliers + entreprises | Serveurs |
| Téléphones mobiles | Point d'accès WIFI | Autres équipements informatiques |
| Téléphones filaires | Équipements actifs réseau (routeurs) | |
| Tablettes | Core network | |
| Ordinateurs portables | Boîtiers CPL | |
| Ordinateurs de bureau | | |
| Écrans | | |
| Vidéo-projecteurs | | |
| Boîtiers TV (décodeur) | | |
| TVs | | |
| Consoles de jeu | | |
| Imprimantes | | |
| Objets connectés | | |

Des données éparpillées et difficiles à estimer

Le nombre d'appareils actuellement en utilisation est difficile à estimer. Les chiffres de vente sont accessibles à travers les bases de données de commerce, mais les articles sont regroupés par typologie (aussi appelées nomenclatures) et décrivent seulement les échanges marchands. Pour estimer le nombre d'appareils réellement en fonctionnement, leur durée de vie entre en jeu (*Greenit, 2019*)*. Une source plus simple provient des déclarations des ménages lors des sondages ou enquêtes (*Baillet et al., 2019** ; *Insee, 2019*)*. Enfin, ces chiffres peuvent être corroborés par le nombre d'abonnements (box internet, forfaits téléphoniques, etc) et les métadonnées transmises aux entreprises par les terminaux (lors de toutes les connexions internet). Les chiffres présentés ici sont donc une estimation issue du rapport "Empreinte environnementale du numérique mondial" de *Greenit (2019)**, d'après une méthodologie d'inventaire basé sur les chiffres de vente et de durée de vie, et de recueil de données auprès d'entreprises publiques et privées.

L'empreinte environnementale du numérique mondial

En 2019 (*Greenit, 2019*)*, dans le monde, le numérique représente 34 milliards d'équipements (éq.) pour 4.1 milliards d'utilisateurs (8 éq./utilisateur) hors petits accessoires, soit 223 millions de tonnes de matériel.

- Terminaux utilisateurs : 3,5 milliards de smartphones, 3,8 d'autres téléphones, 3,1 milliards de dispositifs d'affichages (TV, écrans, vidéo-proj), 19 milliards d'objets connectés (en fait selon les études entre 3 et 30 milliards).
- Réseaux : 1,1 milliard de box DSL/fibre, 10 millions d'antennes relais 2G à 5G, 200 millions d'autres équipements actifs réseau WAN (réseau étendu hors les murs) et LAN (réseau local dans les murs).
- Datacentre : 67 millions de serveurs.

Empreinte relative à l'empreinte globale de l'humanité (*phase de fabrication des terminaux - phase de fabrication tous équipements*)

- 4,2% consommation d'énergie primaire soit 6800 TWh (30% - **35%**)
- 3,8% gaz à effet de serre soit 1400 millions de tonnes équivalent CO₂ (39% - **44%**)

L'empreinte environnementale du numérique concernant la consommation d'eau douce et de ressources abiotiques, bien que mal quantifiée, est pressentie comme majeure et concentrée lors de la phase de fabrication.

Cela représente environ 5,5% de la consommation d'électricité mondiale.

Le numérique en France

En 2020 (*Bordage et al., 2020*)*, en France, on compte 631 millions d'équipements utilisés par 58 millions de personnes, soit environ 11 équipements par utilisateur si on considère la population totale et 15 si on se rapporte seulement à la tranche des 15-70 ans. Hors cœur de réseau physique (câbles, fibres optiques, etc), leur masse représente environ 7 millions de tonnes.

Le parc utilisateurs (terminaux) comporte 116 millions d'ordinateurs et d'écrans, 98 millions de smartphones, 87 millions de téléviseurs, 23 millions de tablettes, 15 millions de consoles de jeu vidéo, 14,5 millions d'imprimantes, 180 millions d'objets connectés (montres, enceintes, domotique, etc).

En 2019, la consommation du numérique français représente environ 40 TWh d'électricité soit 8,3% du total français (473TWh).

En France, la consommation d'énergie pendant la phase d'usage (toute ce qui se passe pour l'équipement entre sa livraison initiale et sa mise au rebut) est moins carbonée que dans le monde, modifiant les proportions des impacts environnementaux entre les phases de fabrication et d'usage.

En 2020, Empreinte du numérique français relative à l'empreinte totale de la France : (*phase de fabrication des terminaux - phase de fabrication tous équipements*)

- 6,2% consommation d'énergie primaire soit 180 TWh d'énergie primaire (37% - **64%**)

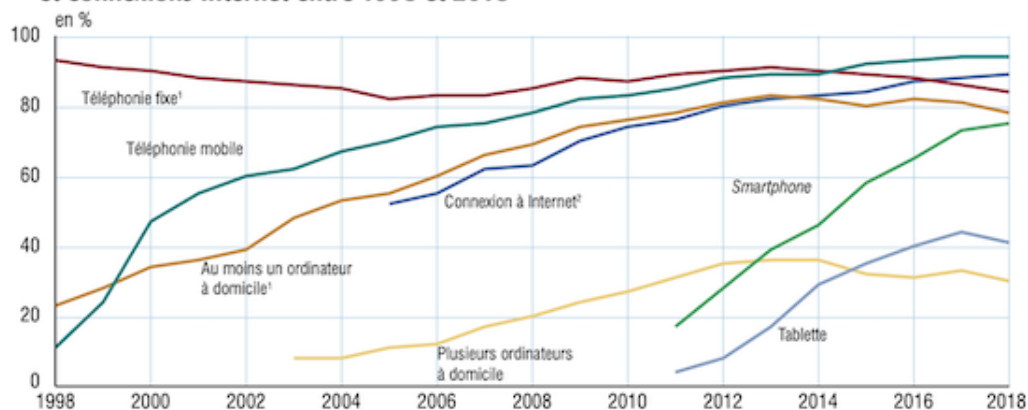
- 3,2% réchauffement global soit 24 millions de tonnes CO2eq (76% - **86%**)

Par personne (58 millions d'utilisateurs), cela représente chaque jour :

- 8,5 kWh d'énergie primaire soit 1 radiateur électrique de 1000 Watts allumé 8h
- 1.13 kg de gaz à effet de serre soit 6 kms en voiture

Selon le rapport "L'économie et la société à l'ère du numérique" de l'*Insee* (2019)* page 135, en 2017, 84% des ménages français (17 sur 20) ont accès à internet à leur domicile. Voir figure 1 ci-dessous:

1. Évolution du taux d'équipement en téléphonie fixe, mobile, smartphones, ordinateurs et connexions Internet entre 1998 et 2018



1. Avant 2003, la courbe porte sur les 18 ans ou plus ; après 2003, sur les 12 ans ou plus. 2. Proportion de personnes se connectant à Internet (réseau fixe + mobile).
 Champ : France métropolitaine, ensemble de la population de 12 ans ou plus.
 Source : Crédoc, enquêtes sur les Conditions de vie et les Aspirations.

Selon le rapport Digital 2019 France (*Kemp, 2019*)*, par jour, en moyenne, les français.es passent...

- 4h38 sur internet,
- 1h17 sur les réseaux sociaux
- 2h59 consommation vidéo (tv, streaming, vod)
- 0h37 musique streaming

Une chance pour l'environnement ?

Selon le Baromètre du numérique 2019 (*Baillet et al., 2019*)*,

Seules 38% des personnes interrogées en 2019 pensent que les technologies numériques représentent une chance pour l'environnement. Ainsi, 80% des Français.es sont d'accord avec l'idée de diminuer l'impact de leurs équipements sur l'environnement (par exemple en les gardant plus longtemps ou en achetant des équipements d'occasion ou reconditionnés) et 69% avec l'idée de réduire l'impact de leurs usages (par exemple en privilégiant le téléchargement de contenu plutôt que le streaming). De la même manière, une majorité de la population affirme être prête à accepter un supplément de prix de l'ordre de 5% pour diminuer la consommation électrique de leur ordinateur et pour favoriser leur recyclage.

Bibliographie



- *The shift project, 2018**
- *République Française, 2020**

3. Numérique et électricité : mesures, proportionnalité et efficacité énergétique

3.1. Métriques électriques

Afin d'analyser la consommation électrique des équipements numériques en phase d'usage, il est nécessaire de manipuler deux métriques différentes : la puissance électrique et l'énergie.

Puissance électrique

Le watt (W) est l'unité de mesure de la puissance électrique. Cette unité correspond au débit de production ou de consommation de l'énergie. Le nom watt est un hommage à l'ingénieur mécanicien et mathématicien écossais James Watt (1736-1819) qui a travaillé sur l'amélioration des machines à vapeur.

Il est calculé avec la formule suivante : P (puissance en watt) = U (tension en volt) \times I (courant en ampère) (Des astuces pour convertir les watts en kWh, Engie)¹. Un watt équivaut à un joule par seconde.

Le joule² (J) est une unité permettant de mesurer l'énergie, le travail et une quantité de chaleur. Le nom Joule est un hommage au physicien anglais James Prescott Joule (1818-1889) qui a, entre autres, proposé la première loi de thermodynamique.

- Le kilowatt (kW), soit 1 000 watts, est fréquemment utilisé pour les gros serveurs ou les baies de calcul ou de stockage.
- Le mégawatt (MW), soit un million de watts peut être utilisé pour les grands systèmes numériques (de type datacentres ou centres de calcul hautes performances) qui peuvent avoir une puissance de plusieurs dizaines de MW (*Eustache et Ferret, 2014*)*.
- Le gigawatt (GW), soit un milliard de watts est utilisé pour qualifier une production électrique massive. Par exemple, la puissance moyenne de production d'un réacteur nucléaire français est de l'ordre de 1 GW.
- Puis viennent le térawatt (TW, mille milliards de watts), le pétawatt (PW, 10^{15} watts), l'exawatt (EW, 10^{18} watts), le zettawatt (ZW, 10^{21} watts), le yottawatt (YW, 10^{24} watts).

Énergie électrique

Le wattheure (Wh) est une unité de mesure énergétique. Elle permet de mesurer une quantité de travail réalisée sur une période donnée. Un Wh c'est la quantité d'énergie produite en une heure par une machine d'un watt ou la quantité d'énergie consommée en une heure par un système avec une puissance d'un watt.

Il est calculé avec la formule suivante : $Wh : W * h$

- Le kilowattheure (kWh), soit 1 000 wattheures est fréquemment utilisé comme mesure de la consommation des foyers. Votre compteur électrique compte des kWh !
- Le mégawattheure (MWh soit un million de wattheures) peut être utilisé pour quantifier la consommation d'un équipement numérique sur une année. Par exemple, un serveur de calcul alimenté en permanence et qui aurait une puissance constante de 300 watts, utiliserait sur une année 2.628 MWh d'électricité.
- Le gigawattheure (GWh soit un million de kWh) peut être utilisé pour mesurer la consommation de grands systèmes numériques ou la production de centrale électriques. Par exemple, une éolienne de 1 MW de puissance fournirait en moyenne mondiale 2 GWh d'énergie sur une année (2000 heures de vent par an) (*Jancovici, 2014*)*.

¹ Des astuces pour convertir les watts en kWh, Engie

² <https://fr.wikipedia.org/wiki/Joule>

- Le terawattheure (TWh) peut être utilisé pour mesurer la production de centrales électriques massives. Par exemple, un réacteur nucléaire français produit de l'ordre de 8 tWh par an.

Ainsi

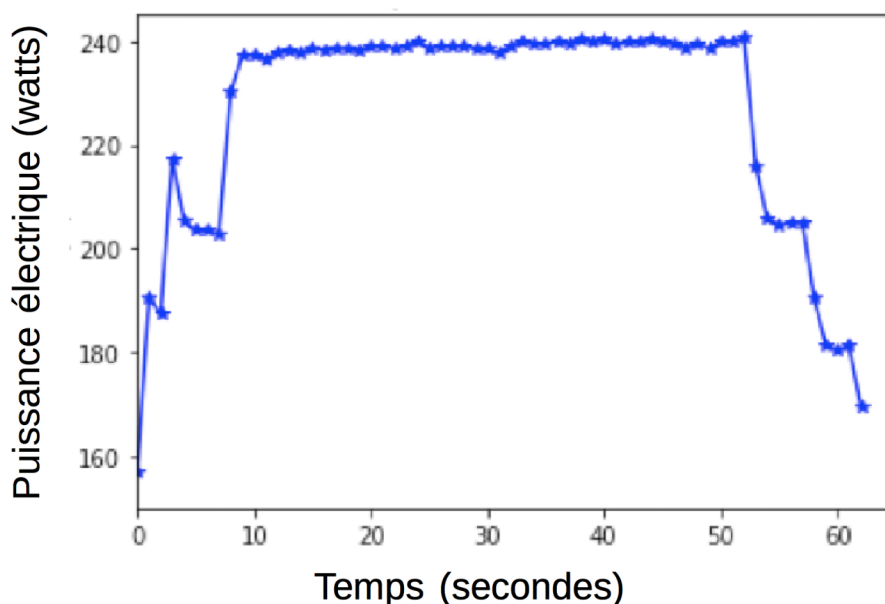
- une lampe de 60 W qui reste allumée pendant 1 heure consomme $60 \text{ Wh} = 60 * 1$ soit 0,06 kWh
- un four de 900 W qui fonctionne pendant 5 minutes consomme $75 \text{ Wh} = 900 * 5/60$ soit 0,075 kWh (Des astuces pour convertir les watts en kWh, Engie)¹

Conclusion, il ne faut pas confondre la puissance électrique (exprimée en watts) avec l'énergie (exprimée en joules ou Wh) (Des astuces pour convertir les watts en kWh, Engie)².

3.2. Mesurer la consommation d'un équipement numérique

Si on désire observer et analyser finement la consommation électrique des équipements informatiques, on ne peut pas se contenter de mesures de type compteur électrique (qui nous donne des kWh). Il faut profiler la consommation électrique pendant une période de temps (dépendant du service rendu). Cette mesure doit être assez fine et précise afin de restituer les variations dues à l'usage de l'équipement.

Ainsi on peut observer la consommation d'un équipement de type ordinateur de bureau lors du lancement d'une application intensive. La figure illustre ce profil énergétique de l'ordinateur en affichant la puissance électrique (watts) et le temps (secondes). On peut observer que cet ordinateur est en attente au début de l'expérience et utilise une puissance électrique de l'ordre 160 watts. Une fois démarrée l'application, sa consommation augmente pendant le temps de chargement et s'établit ensuite aux alentours de 240 watts.



Consommation électrique d'un ordinateur de bureau

Ce profilage peut être réalisé à l'aide de deux types d'outils :

- outils matériels de type wattmètre : qui mesurent la consommation sur la prise électrique
- outils logiciels : qui estiment la consommation électrique d'applications en fonction de l'usage des ressources internes (nombres d'opérations de calcul, nombre d'accès à la mémoire, nombre d'entrées-sorties...) ou à l'aide de capteurs internes.

¹ <https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/conseils-souscription-contrat-electricite/convertir-watts-en-kwh.html>

² <https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/conseils-souscription-contrat-electricite/convertir-watts-en-kwh.html>

Proportionnalité énergétique

On a pu observer dans le profilage de consommation du serveur que cette consommation varie entre 160 watts (quand le serveur est alimenté, le système d'exploitation est en activité, mais aucune application n'est exécutée) et 240 watts (quand une application intensive est en train d'être exécutée sur le serveur). Cette variation reflète une certaine proportionnalité énergétique qui varie en fonction de l'usage de la ressource informatique. Plus on utilise ce serveur plus la puissance électrique utilisée augmente. Malheureusement, lorsque la charge de travail diminue, cette puissance électrique ne tend pas vers zéro watt mais vers une valeur assez haute (160 watts dans notre exemple). En 2007, Luis André Barroso* a observé la consommation de serveurs dans un datacentre de chez Google et s'est ainsi rendu compte que cette consommation avec une charge de travail proche de 0 tend vers 50% du pic électrique du serveur.

Cette mauvaise proportionnalité énergétique provient des types de consommation qui existent dans une ressource numérique :

- la consommation électrique statique : qui est utilisée par tout ce qui est alimenté de manière fixe dans un équipement numérique : carte mère, ventilateurs, disques durs magnétiques...
- la consommation électrique dynamique : qui dépend de l'usage de l'équipement provoqué par les logiciels exécutés : système d'exploitation, protocoles, services, applications...

Il existe certains cas où la consommation électrique est quasi-constante quel que soit l'usage de l'équipement informatique (par exemple des équipements réseaux filaires tels que des commutateurs réseaux).

Efficacité énergétique

Observer la consommation énergétique d'un équipement ne suffit pas, il faut mettre cette consommation en rapport avec le service applicatif rendu. C'est ce que l'on nomme l'efficacité énergétique (ou efficacité énergétique). L'efficacité énergétique se mesure en usage des ressources (nombre d'entrées sorties par seconde, nombre de calculs par seconde, nombre de requêtes traitées par seconde) par puissance électrique utilisée ou unité d'énergie consommée.

Par exemple dans le monde des centres de calcul haute performance, le volume de calculs effectués sur des nombres réels par seconde (*floating point operation per second* : *flops*) est le principal indicateur de performance. Plus un système supporte de flops, plus il est rapide et plus théoriquement sa performance est élevée. Ainsi le Top500¹ répertorie tous les 6 mois, les 500 plus grands centres de calcul haute performance. La métrique de comparaison est le nombre de flops. Par exemple, dans le Top500 de juin 2021², la plus grosse machine est le superordinateur japonais Fugaku qui utilise 7 millions de cœurs de calcul et qui affiche une performance soutenue de 442 Pétaflops. Cette liste ne reflète pas le service rendu par ces machines face à leur consommation énergétique. Ainsi la liste Green 500³, propose de trier les 500 plus grands systèmes en fonction d'une métrique d'efficacité énergétique : les flops par watt. Dans la liste de juin 2021⁴, la meilleure machine du Green 500 est la machine MN-3. Elle utilise 1664 cœurs de calcul, est en 335^{ème} position dans le Top 500 et réalise 1.8 Pétaflops de calcul. Cette machine a la meilleure efficacité énergétique. Pour chaque watt d'électricité utilisé par cette machine, 29.7 Gflops de calcul sont réalisés.

¹ <https://www.top500.org/lists/top500/2021/06/>

² <https://www.top500.org/lists/top500/2021/06/>

³ <https://www.top500.org/lists/green500/2021/06/>

⁴ <https://www.top500.org/lists/green500/2021/06/>

4. Résultats chiffrés : quelle fiabilité ?

« Donnez-nous des chiffres ! », c'est une requête fréquente des journalistes qui cherchent à montrer du sensationnel, c'est une requête fréquente du public qui cherche à comparer et c'est une requête fréquente des scientifiques qui cherchent à comprendre, à mesurer, à évaluer, à modéliser.

Et pourtant, les chiffres ne disent pas tout et il arrive qu'ils ne disent pas ce qu'on imagine : il faut un minimum « d'expertise » pour comprendre et interpréter les chiffres. La question se pose aussi de leur fiabilité et du degré de confiance qu'on peut leur accorder.

Dans la thématique des impacts environnementaux du numérique, les chiffres sont partout : des émissions de gaz à effet de serre (GES) pour la fabrication d'un smartphone, au pourcentage d'électricité mondiale consommé par le numérique en passant par le nombre d'années de réserve d'indium. Il y a aussi le pourcentage de gaz à effet de serre économisé grâce au numérique dans le secteur du transport, la quantité d'eau douce utilisée par la fabrication d'une tablette ...

Est-ce que ces chiffres sont fiables ?

Il faut distinguer plusieurs aspects :

- **Questions de méthodologie** : un chiffre dépendra toujours du périmètre pris en considération (quels types d'équipements notamment), des années de référence, des très nombreuses hypothèses posées, des extrapolations, du modèle étudié, des données d'entrée prises en compte pour les calculs, de tout ce qui n'a pas été pris en compte, des choix réalisés pour la modélisation, etc. Autrement dit, la fiabilité d'un chiffre est d'autant plus grande que la qualité des données d'entrée est bonne et que la méthodologie est robuste.

- **Questions d'incertitudes** : les incertitudes associées à un résultat sont de différentes natures. Il y a par exemple les incertitudes liées aux approximations que l'on fait dans les mesures, les estimations, etc. Et puis il y a les incertitudes liées aux méthodes employées ou au modèle utilisé, par exemple si le modèle oublie d'intégrer une donnée importante ou quand on fait une moyenne de moyennes. Dans tous les cas les incertitudes se cumulent dans les calculs.

Enfin, lorsqu'elle est calculée cette incertitude est rarement communiquée au public. Si on prend l'exemple simple de données statistiques synthétisées en un seul chiffre (leur moyenne), les écarts à la moyenne¹ seront masqués.

En résumé : la fiabilité d'un chiffre est d'autant plus forte que les incertitudes sont faibles et qu'elles sont communiquées.

- **Questions de transparence et d'ouverture des données** : enfin, la confiance que l'on pourra accorder aux chiffres est d'autant plus forte que la qualité des données, les méthodologies et les incertitudes sont partagées par tous, mises à jour par des systèmes de révision croisée et dans tous les cas avec une totale transparence.

Autrement dit, dans ce domaine, un chiffre communiqué seul n'est pas suffisant. Il doit être accompagné de tous les éléments permettant au lecteur d'estimer sa fiabilité et ses conditions de calcul. L'usage du chiffre devrait différer grandement en fonction de ces éléments.

Nous illustrerons ceci au travers de trois exemples : le premier tiré de la littérature scientifique, le 2^{ème} issu du monde des logiciels et le 3^{ème} issu d'une étude indépendante. Ces exemples illustrent des faiblesses couramment observées dans le vaste monde de la génération de données chiffrées.

Exemple 1 : un article sur la consommation électrique mondiale des réseaux de communication

Article : *Lambert et al., 2012**

L'article précise la méthodologie utilisée et analyse la fiabilité des résultats en indiquant clairement les sources d'incertitudes. Cet article scientifique, publié dans un journal scientifique a fait l'objet d'une révision (review) par deux « reviewers » en général de façon anonyme. L'article scientifique doit

¹ https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89cart_type

permettre à son lecteur de retrouver les sources de toutes les données et les données elles-mêmes, et aussi de reproduire le résultat ou l'expérience (en théorie parce que en pratique c'est en général très compliqué). On parle alors de recherche reproductible (Suggestion de vidéo science étonnante sur le processus de revues par les pairs)¹.

Ici l'article est en open access, c'est-à-dire gratuitement accessible par tous.

Alors, évidemment, la lecture ou la compréhension sont moins simples parce que tout doit être (en principe) posé, argumenté, justifié et vérifiable. Dans le cas présent on a accès aux hypothèses, aux sources des données, à la modélisation.

Le résultat est peut-être critiquable, mais lorsque c'est le cas, un nouvel article viendra probablement corriger, compléter dans un avenir plus ou moins proche et c'est aussi ce qui fait progresser la science.

Exemple 2 : un applicatif bien pratique Carbonalyser

Carbonalyser² : une extension de navigateur (ou add-on) qui permet à un utilisateur de visualiser la consommation électrique et les émissions de gaz à effet de serre associées à sa navigation internet.

En réalité, aucun opérateur de réseau, aucun prestataire, aucun logiciel n'est en capacité aujourd'hui de mesurer la consommation énergétique précise du transport des données en temps réel et de leur traitement spécifique. Le calcul est donc construit à partir de données globales, moyennées et d'hypothèses qui sont explicitées clairement dans la méthodologie. Le code source et l'ensemble des données ayant servi au calcul sont d'ailleurs en accès libre.

Les auteurs précisent d'ailleurs « *Carbonalyser n'est pas un outil d'évaluation ou d'audit. Il s'agit d'un support de sensibilisation individuelle, qui permet d'aider à visualiser un certain aspect de nos usages en ligne, au travers de comparaisons et d'indications sur la consommation électrique et émissions associées. Ces résultats ne sont donc pas des mesures de l'impact véritable des activités en ligne, mais des indicateurs d'ordre de grandeurs moyens obtenus par extrapolation d'un modèle macroscopique construit sur des moyennes statistiques mondiales. Carbonalyser n'est à utiliser que pour alimenter des réflexions individuelles sur ses propres usages ou pour inspirer la mise au point d'outils d'évaluation précise des impacts des activités en ligne.* »

Dans cet exemple, les résultats sont estimés à partir d'un modèle accessible et transparent même si le modèle est imparfait.

Exemple 3 : Une étude sur l'empreinte mondiale du numérique (greenit.fr)

Article : *Bordage, 2019**

Pour calculer la quantité de GES émis par le numérique, les auteurs précisent le périmètre du numérique (types d'équipements pris en compte), puis à partir d'hypothèses sur la durée d'utilisation de chaque type et des volumes de vente calculent (sur la base de données partiellement non publiques comme les valeurs moyennes d'émission de GES pour la fabrication, le transport de ces équipements ou leur consommation annuelle moyenne) la part du secteur du numérique dans les émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial.

Ici, il n'y a pas transparence sur les données de base, les hypothèses ne sont pas explicitées et les sources (notamment données d'entrée) en partie non disponibles. Enfin, les incertitudes ne sont pas chiffrées. Pour autant cette étude a le mérite d'être une des rares à donner des chiffres clés et a été très largement communiquée et reprise.

En conclusion

À retenir des remarques préalables de cette fiche et des exemples, dans le domaine des impacts environnementaux du numérique : un chiffre est le résultat d'une estimation dans des conditions spécifiques, avec une méthodologie spécifique, des incertitudes, des sources ; Le chiffre ne représente que ce qu'il représente avec toutes les limites associées. Il est donc important de prendre connaissance de l'ensemble de ces limites et parfois la conclusion est la non fiabilité du chiffre en question ; par

¹ <https://www.youtube.com/watch?v=NkdczX1Sq-U>

² <https://theshiftproject.org/carbonalyser-extension-navigateur/>

exemple les estimations des impacts potentiellement positifs du numérique sont basés sur tellement d'extrapolations et d'hypothèses exagérément optimistes qu'elles n'ont pas vraiment de sens (Ademe, 2016* ; Roussilhe, 2021)*.

Souvent dans ce domaine les chiffres doivent être pris comme des ordres de grandeur. Aussi les décimales n'ont en général aucun sens. Par exemple le numérique dans son ensemble (hors objets connectés) génère environ 4% des GES : c'est peut-être 2% ou 6% mais pas 50%, ni 0,4%.

Un ordre de grandeur, qu'est-ce que c'est ?

La définition de Wikipédia¹ est : un ordre de grandeur est un nombre qui représente de façon simplifiée mais approximative la mesure d'une grandeur physique².

L'ordre de grandeur se mémorise plus facilement qu'une valeur précise et suffit pour de nombreux usages.

Scientifiquement, un ordre de grandeur correspond à une fourchette de valeurs. Celle-ci est, communément, d'un dixième à dix fois la grandeur. Ainsi, un objet dont la longueur est de l'ordre de 1 m (une table) est plus grand qu'un objet dont la longueur est de l'ordre de 1 dm (un crayon) et plus petit qu'un objet dont la longueur est de l'ordre de 10 m (un camion).

Connaître, avoir en tête ces ordres de grandeur (et les conditions / limites) peut être suffisant pour opérer des choix politiques ou prendre des résolutions législatives tout à fait pertinentes. À contrario, être en mesure d'exercer son esprit critique sur les chiffres communiqués à grand renfort de publicité est nécessaire pour ne pas faire des choix contre productifs !

Enfin, et vous l'aurez compris, dans l'immense majorité des cas, la comparaison de deux chiffres issus d'études différentes n'est pas faisable du fait des différences très probables d'hypothèses, de périmètres et de données d'entrée. Par contre, utiliser la même méthodologie, les mêmes conditions etc. au cours du temps pour comparer les progrès réalisés par exemple sur les GES émis par une structure donnée est très pertinent.

À retenir : qualité des données d'entrée, robustesse et transparence des méthodologies de calcul, ouverture et accessibilité, explicitation de toutes les hypothèses, précautions de communication sont les règles de base de toute communication de données chiffrées pour progresser ensemble sur la connaissance de nos impacts environnementaux.

¹ <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=ordre+de+grandeur+wikipedia>

² https://fr.wikipedia.org/wiki/Grandeur_physique

Contenus annexes



1. Crédits

Auteurs

- Françoise Berthoud, CNRS / GRICARD / EcoInfo
- Julie Cornet, animatrice et formatrice, Compagnie du Code
- Martine Olivi, chargée de recherche chez Inria

Équipe pédagogique

- Tatiana Khomenko, Laurence Farhi, Inria Learning Lab
- Sophie de Quatrebarbes, S24B pour Class'Code

Graphismes

- Illustrations : Mikaël Cixous, 4 minutes 34
- Photographies de Guillaume Clémencin : Nicolas Ledu

Une coproduction Class'Code / Inria



Avec le soutien du ministre de l'éducation nationale de la jeunesse et des sports.



**MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION
NATIONALE,
DE LA JEUNESSE
ET DES SPORTS**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Cette ressource a été produite dans le cadre du Mooc Impacts environnementaux du numérique¹ sous licence CC BY 4.0² FR 2021 www.fun-mooc.fr³

¹ <https://www.fun-mooc.fr/fr/cours/impacts-environnementaux-du-numerique/>

² <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>

³ <https://www.fun-mooc.fr/fr/>

Bibliographie



Aurélien Boutaud, Natacha Gondran. *L'empreinte écologique*. La Découverte, 2010

M. Giampietro. *Footprints to nowhere*. *Ecological Indicators*, 2014, 46.

Webographie



Ademe. *Potentiel de contribution du numérique à la réduction des impacts environnementaux : état des lieux et enjeux pour la prospective*, 2016. Disponible sur le site de l'Ademe [06/02/2022]

Bilans GES. ADEME. Disponible sur le site de l'ADEME [03/02/2022].

Julie Baillet, Patricia Croutte, Victor Prieur. *Baromètre du numérique 2019* [en ligne]. Crédoc, 2019. Disponible sur credoc.fr [03/02/2022]

Luiz André Barroso et Urs Hölzle. *The Case for Energy-Proportional Computing*, IEEE Computer, Vol. 40, No. 12, Décembre 2007. Disponible en ligne [06/02/2022]

Anders Bjørn, Katherine Richardson, Michael Zwickly Hauschild. *A framework for development and communication of absolute environmental sustainability assessment methods* [accès limité]. Journal of Industrial Ecology, 2019, vol. 23, n° 4. Disponible sur accès sur le site de l'éditeur [03/02/2022].

Frédéric Bordage. *Empreinte environnementale du numérique mondial*, 09/2019. Disponible sur le site GreenIT.fr [06/02/2022]

Frédéric Bordage, Lorraine de Montenay, Olivier Vergeynst. *iNUM : impacts environnementaux du numérique en France* [en ligne]. Greenit, 2020. Disponible sur greenit.fr [03/02/2022]

Aurélien Boutaud. *Qu'est-ce-qu'un indicateur ?* [en ligne]. Millénaire 3. 2015. Disponible sur le site de M3 [03/02/2022].

Centre ressource du développement durable. *Les limites planétaires, un socle pour repenser nos modèles de société* [en ligne]. CERDD, 17/06/2021, MAJ 14/09/2021. Disponible sur le site du CERDD [03/02/2022].

Patrick Eustache et Robert Ferret. *Électricité : bases et applications aux datacentres*, Cours réalisé pour formation ANF EcoInfo, Septembre 2014. Disponible en ligne [06/02/2022]

Rapport Empreinte environnementale du numérique mondial [en ligne]. Greenit, 2019. Disponible sur greenit.fr [03/02/2022]

L'économie et la société à l'ère du numérique 2019 [en ligne]. Insee. 2019. Disponible sur insee.fr [03/02/2022]

Jean-Marc Jancovici. *Pourrait-on alimenter la France en électricité uniquement avec de l'éolien ?*, Juillet 2014. Disponible en ligne [06/02/2022]

Simon Kemp. *Rapport Digital 2019 France* [en ligne]. 2019. Disponible sur dataportal.com [03/02/2022]

Sofie Lambert, Ward Van Heddeghem, Willem Vereecken, Bart Lannoo, Didier Colle, and Mario Pickavet, "Worldwide electricity consumption of communication networks," Opt. Express 20, B513-B524 (2012). Disponible sur osapublishing [06/02/2022]

David Lin, Laurel Hanscom, Jon Martindill, Michael Borucke, Lea Cohen, Alessandro Galli, Elias Lazarus, Golnar Zokai, Katsunori Iha, D. Eaton, Mathis Wackernagel. *Working Guidebook to the National Footprint and Biocapacity Accounts* [en ligne]. Global Footprint Network, 2019. Disponible sur le site [03/02/2022].

Valéry Morard, Irénée Joassard, avec la collaboration de Benoit Bourges. *Rapport de synthèse, l'environnement en France 2019*. Commissariat général au développement durable, 2019 [en ligne]. Disponible sur le site développement durable.gouv [03/02/2022].

OECD. *Handbook on Constructing Composite Indicators, Methodology and User Guide* [en ligne]. OECD, 2008. Disponible sur le site de l'OECD.

Données douanières françaises nationales et régionales [en ligne], 2020. Disponible sur lekiosque.finances.gouv.fr [03/02/2022]

Gauthier Roussilhe. *Que peut le numérique pour la transition écologique ?* [en ligne], 2021. Disponible sur le site de l'auteur

“Lean ICT: Towards digital sobriety”: *Our new report on the environmental impact of ICT* [en ligne]. The shift project, 2018. Disponible sur theshiftproject.org [03/02/2022]

Frédéric Vey, Anne-Sophie Hesse. *Indicateurs de la stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable : comparaison internationale situation 2018* [en ligne]. Commissariat général au développement durable - Service de la donnée et des études statistiques, Document de travail n° 42, juin 2019. Disponible sur le site [développement durable.gouv](https://developpement-durable.gouv.fr) [03/02/2022].

Crédits des ressources



Typologie des indicateurs p. 7

Source : D'après Aurélien Boutaud (2015)

Illustration de l'agrégation multicritère : avec une moyenne pondérée, Juan ne peut jamais être classé premier, quels que soient les coefficients choisis ! p. 9

Source : Adapté de A. Rolland

L'empreinte écologique p. 10

Source : D'après Global Footprint Network

Consommation électrique d'un ordinateur de bureau p. 15

<https://gitlab.inria.fr/learninglab/mooc-impacts-num/mooc-impacts-num-ressources/-/raw/master/docs/Partie1/FichesConcept/Images/profil.pngZoom>