

# Impact du numérique sur l'environnement

---

« Le numérique s'inquiète enfin de ses impacts sur l'environnement et ne se considère plus uniquement comme faisant partie de la solution mais également faisant partie du problème du changement climatique »

Anne-Cécile Orgerie (CNRS)

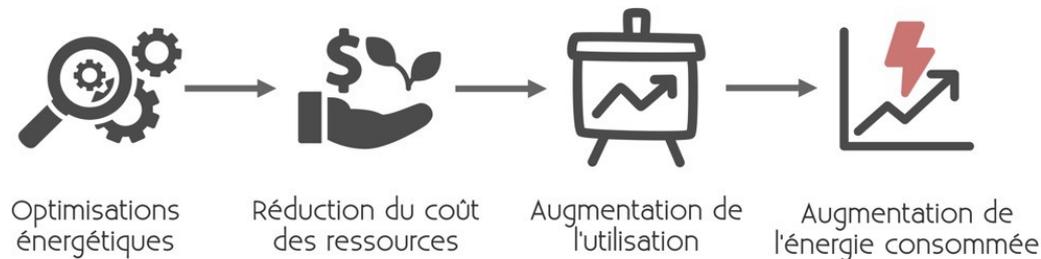
<http://ecoinfo.cnrs.fr>



# Idée reçue

---

« TIC réduisent émissions de gaz à effet de serre » (2% pour réduire 98%)



- « Effets rebonds » de la mise en œuvre sur
  - consommation énergétique et émissions de gaz à effet de serre
  - épuisement des ressources non renouvelables
  - rejet de substances toxiques
  - accroissement des déchets, ...
- Impacts de la fabrication et de la fin de vie des appareils
  - production = 3,5 x empreinte carbone liée à son utilisation prof. en France
- Impacts sociaux de leur fabrication dans les pays émergents

# La galaxie numérique : bienvenue dans le réel

Que cache le numérique, devenu indispensable et évident à l'usage, mais dont le fonctionnement reste souvent obscur ? Ce qui est certain, c'est qu'il n'a rien d'immatériel et que ses impacts environnementaux sont bien réels ! Ce secteur est responsable aujourd'hui de 4% des émissions mondiales de gaz à effet de serre et la forte augmentation des usages laisse présager un doublement de cette empreinte carbone d'ici 2025.

INTERNET AU NIVEAU MONDIAL

- ▶ 67 millions de serveurs
- ▶ 1,1 milliard d'équipements réseaux (routeurs, box ADSL...)
- ▶ 19 milliards d'objets connectés en 2019
- 48 milliards en 2025 selon les estimations

En 1 heure

- ▶ 8 à 10 milliards de mails échangés (hors spam)
- ▶ 180 millions de recherches Google

## LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE GÉNÉRÉES PAR LE NUMÉRIQUE :

**47%** DUES AUX ÉQUIPEMENTS DES CONSOMMATEURS

**53%** DUES AUX DATA CENTERS ET AUX INFRASTRUCTURES RÉSEAU

600 kg de matières premières mobilisées pour fabriquer un ordinateur de 2kg

8,9 équipements / personne en 2021 en Europe occidentale contre 5,3 en 2016

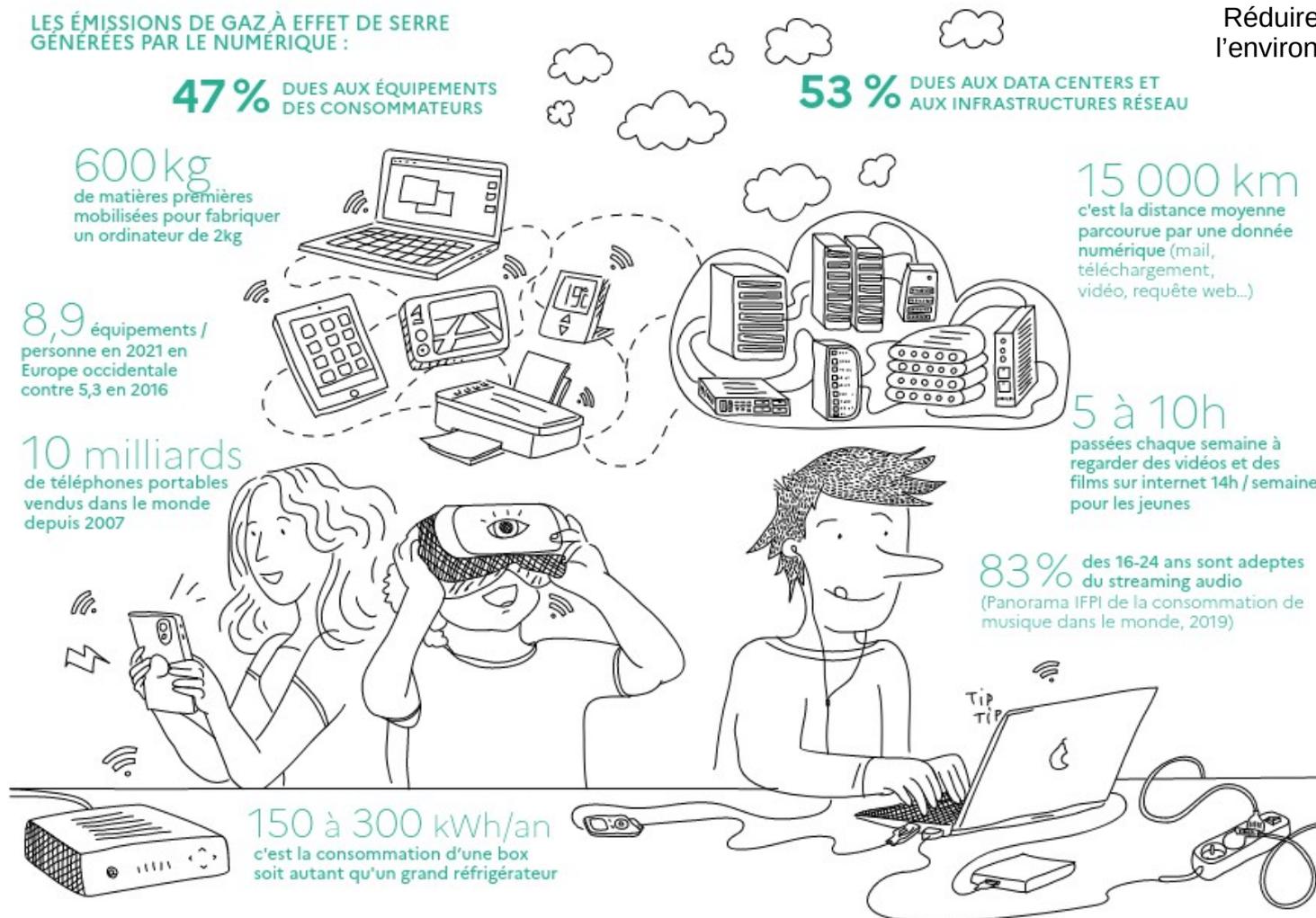
10 milliards de téléphones portables vendus dans le monde depuis 2007

15 000 km c'est la distance moyenne parcourue par une donnée numérique (mail, téléchargement, vidéo, requête web...)

5 à 10h passées chaque semaine à regarder des vidéos et des films sur internet 14h / semaine pour les jeunes

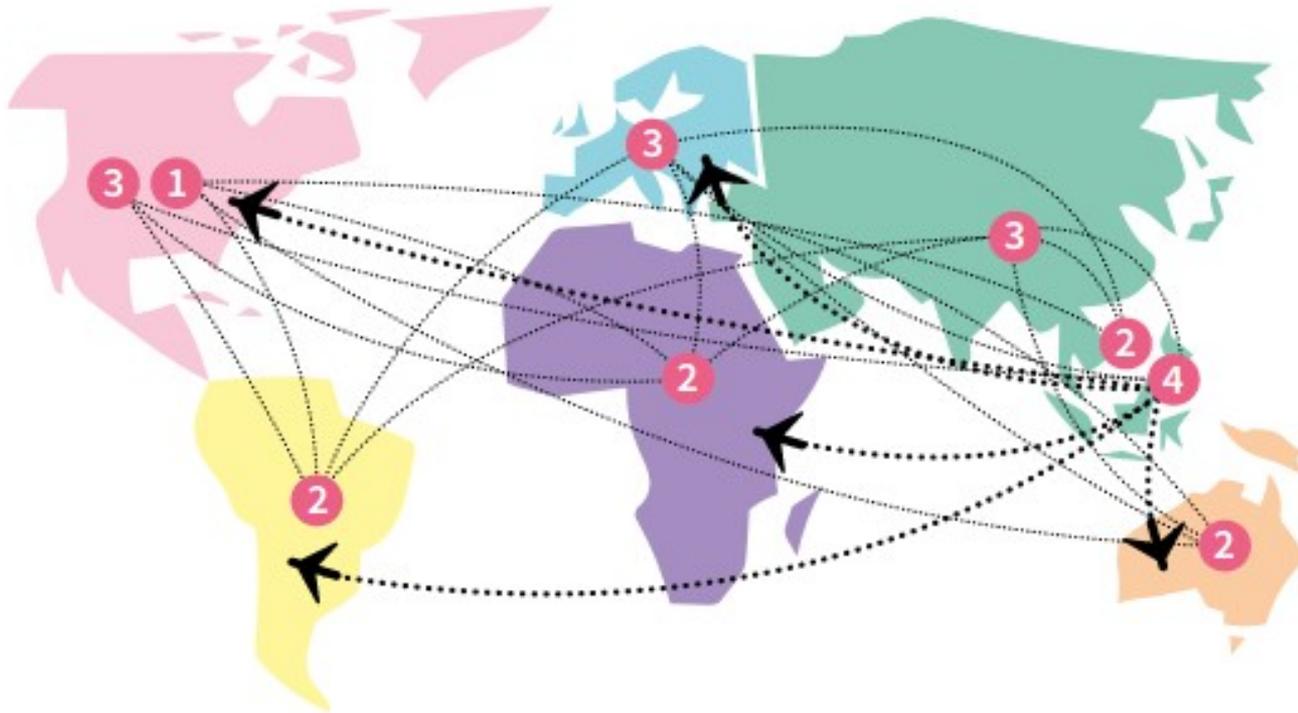
83% des 16-24 ans sont adeptes du streaming audio (Panorama IFPI de la consommation de musique dans le monde, 2019)

150 à 300 kWh/an c'est la consommation d'une box soit autant qu'un grand réfrigérateur



source : La face cachée du numérique,  
Réduire les impacts du numérique sur l'environnement, ADEME, janvier 2021

## QUATRE TOURS DU MONDE POUR FABRIQUER UN SMARTPHONE



source : ADEME et France Nature Environnement

**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.

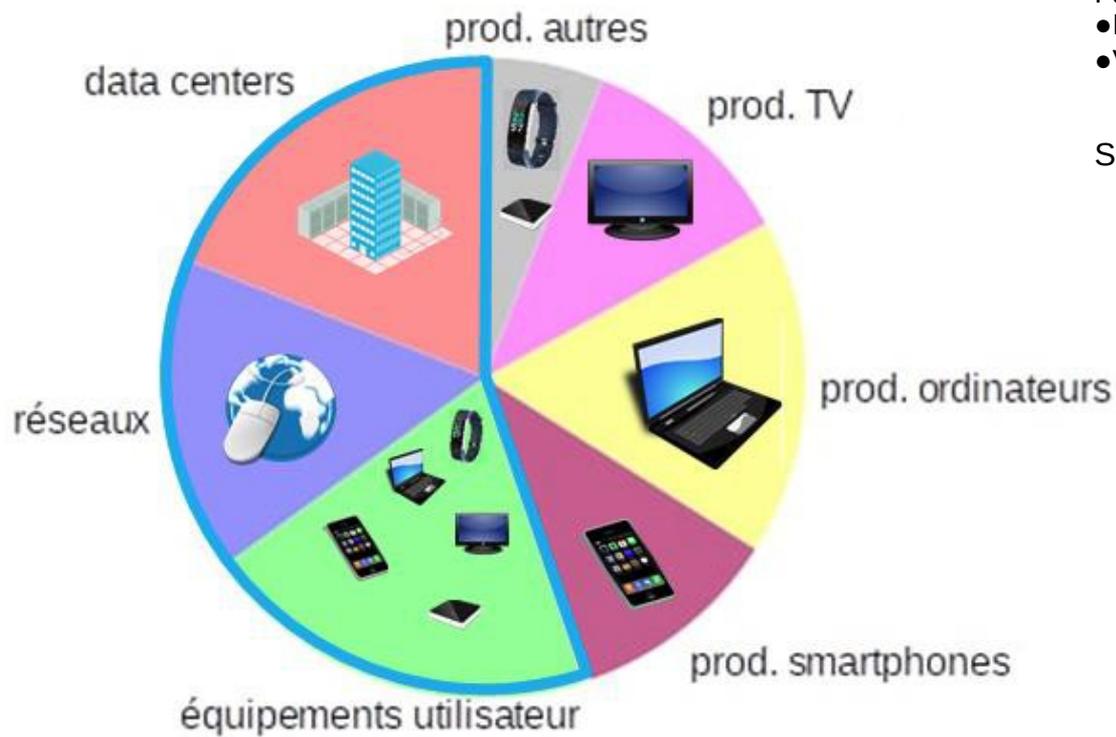
# Consommation électrique et émissions de gaz à effet de serre

---

13,5% de la facture électrique française

5% des émissions françaises des gaz à effet de serre

- Relativement modeste mais tendance inquiétante
- Consommation = +10% par an sur les 10 dernières années
- En contradiction avec objectifs du paquet énergie-climat de l'UE
- Matériel informatique fabriqué essentiellement en Asie (kWh : 10 x plus carboné qu'en France)



Facteurs d'émission de la production d'électricité :

- France 0.108 kg/kWh
- Vietnam 0.432 kg/kWh

Source : Ademe, base carbone 2015

---

Digital energy consumption 2017, source : [Lean ICT Materials] Forecast Model

# Épuisement des ressources non renouvelables

---

- Importantes quantités de métaux précieux, terres rares, minerais (terbium, hafnium, argent, or, zinc, coltan, ...)  
Besoin en métaux multiplié par 5 d'ici à 2050  
Gisements connus épuisés au mieux dans 30 ans
- Sac à dos écolo = poids de matières premières / poids du produit  
Puce élec 2g = 2kg de mat. premières + 30kg d'eau (= 16 000)
- ↑ puces électroniques /an avec ↑ de produits « intelligents »
- Extraction de + en + polluantes (or en Guyane) : grande quantité de produits chimiques toxiques (mercure, arsenic, ...)
- Marché noir et conflits armés : guerre civile, esclavage, enfants soldats

# Pollution par des substances toxiques

---

- Directive européenne RoHS12 : restreindre (sans interdire) certaines substances (mercure, plomb, cadmium, le chrome hexavalent, ...)
- Réglementation insuffisante : utilisation de retardateurs de flammes halogénés, additifs du PVC, phtalates, bisphénol A, arsenic, ...
- US Environmental Protection Agency : 70% des métaux lourds des décharges nord américaines viennent du matériel électronique
- Infiltration dans le sol, dans les nappes phréatiques puis dans la chaîne alimentaire !

# Déchets d'équipements électriques et électroniques

---

- + forte croissance en France : entre 2% et 3% /an  
= 14kg /an à titre personnel et 10kg /an pour activité professionnelle
- Quantité de DEEE professionnels ↑ + vite que capacité à les retraiter
- Manque d'infrastructures de traitement des DEEE  
→ disparition de cuivre, or, argent, palladium, indium, ...
- DEEE expédiés illégalement dans pays émergents pour leur reconditionnement
- Lois du marché dominant les impératifs environnementaux et climatiques.

**Imposer les restrictions sur l'ensemble du marché**

---

# Choix du logiciel

---

- Besoins logiciels (mémoire, processeur, espace disque) et mises à jour conditionnent la durée de vie du matériel
- Saut de versions et outils + légers prolongent la durée de vie
- Durée de vie d'un ordinateur /3 en 25 ans = en moyenne 3 ans depuis 2005

## Recommandations

1. Ne pas mettre systématiquement à jour les logiciels (sauf si sécurité)
  2. Désactiver les fonctions inutiles pour gagner 5 à 30% de performances
  3. Editeur s'engageant sur une durée de fonctionnement du logiciel pour une configuration technique donnée
  4. Prioriser des logiciels libres et des formats ouverts, assurant une meilleure pérennité et une meilleure interopérabilité
-

# Choix du matériel

---

- En France : 40 millions d'ordinateurs (moitié dans les entreprises)
- ↑ de 10% /an : bien pour réduire la fracture numérique  
mais - bien pour environnement
- Fabrication ordinateur = 100 x poids en matières premières  
+ 164kg de déchets (dont 24kg toxiques)

## Recommandations

1. Choisir du matériel durable avec des normes environnementales, humaines et énergétiques
  2. Doubler durée de vie (de 3 à 6 ans) en sautant des versions de logiciels
  3. Fin de vie : vendeur obligé de collecter et de retraiter les DEEE
  4. Privilégier matériel d'occasion reconditionné (label Ordi 2.0)
  5. Mise en veille prolongée ou gestion du parc informatique permettant d'éteindre et d'allumer les ordinateurs à une heure fixe
-

# Centre de données (data center)

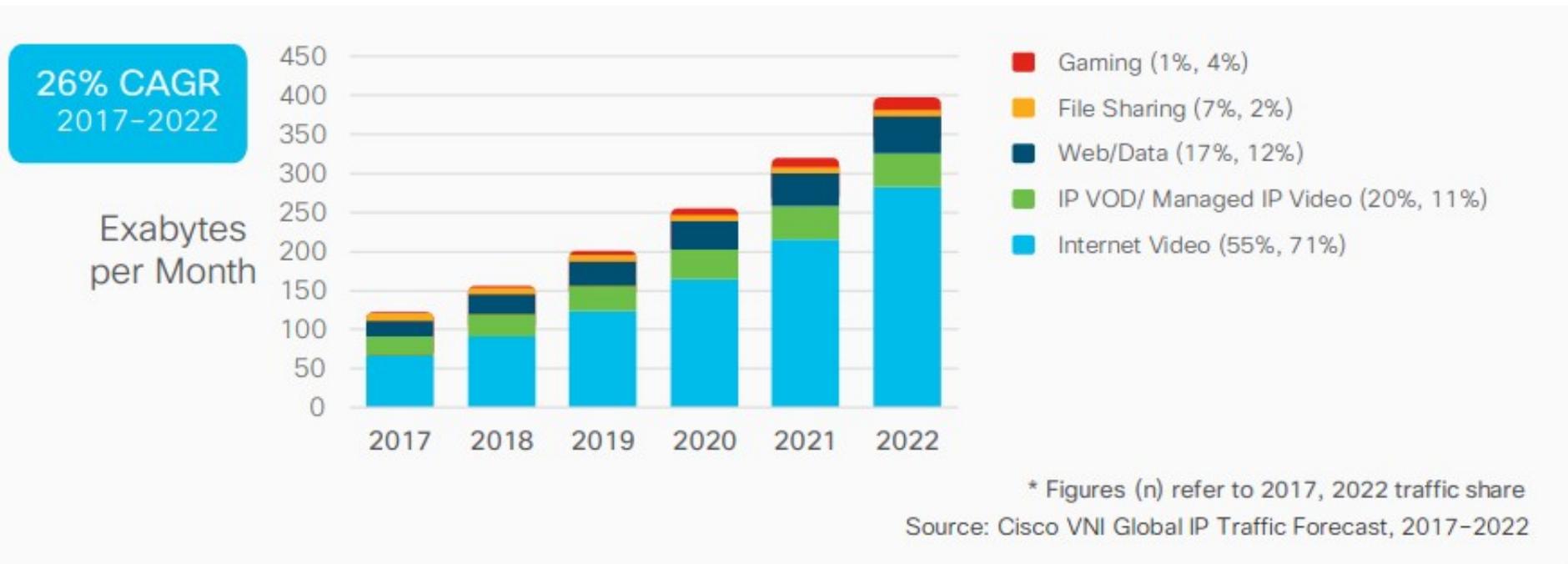
---

- Utilisation + énergivore que fabrication (23% du SI entreprise)
- Doublement entre 2000 et 2005 ; 1,3 M en France en 2008 ; 1 serveur pour 50 habitants en 2011
- + moitié de l'électricité sert à refroidir les serveurs

## Recommandations

1. Privilégier les économies d'énergie à l'usage
  - diminuer la résolution, désactiver autoplay, bloquer publicités
  - visio : couper la caméra lorsque possible
  - éviter pièces jointes : pointer la source, site de dépôt, clé usb
2. Ne stocker que ce qui présente un intérêt
  - Disponibilité 24h/24h et 365j/an ? 5 copies des données à maintenir en ligne ?

# Répartition du transfert de données



# Cout écologique de l'IA (1/2)

---

Développement du ML grâce à l'accroissement des capacités de calcul, de stockage et des données générées

- Cycle infernal : ML responsable de masses de données, construction de systèmes de calcul + puissants, construction de data-centers + grands
- Coût CO2 de certains domaines (e.g. vision par ordinateur)
- Serious games « Ma terre en 180 minutes » Labos1.5  
Objectif : réduire l'impact de la recherche scientifique sur le climat
- IA peut optimiser l'efficacité énergétique, mais à quel coût ?
- Aucune étude ne compare le coût environnemental de l'IA et le gain espéré
- Nouveau produit → démontrer qu'il n'y a pas d'impact négatif sur le climat
- Rôle de l'IA dans la dégradation du système Terre ? Nécessité de l'IA ?

# Cout écologique de l'IA (2/2)

---

Entraînement d'un modèle peut émettre autant de carbone que 5 voitures

- Quand on demande à ChatGPT sa quantité d'émissions, il répond entre 300 et 600 tonnes d'équivalent CO2 (= 1,3 et 2,6 millions de km en avion).
- GPT-3 aurait nécessité 1287 GWh pour son apprentissage = consommation annuelle de 120 foyers américains = consommation annuelle de 110 voitures ou 502 tonnes d'émissions de carbone.
- Une question sur ChatGPT consommerait 4 à 5 fois plus d'énergie qu'une requête par mot-clés sur Google.
- Impact carbone d'une IA : compter son développement, la récolte des données avec les capteurs nécessaires, le serveur et le supercalculateur pour l'apprentissage.

# Agir sur les données

---

## Respecter les principes FAIR (2014)

**Facile à (re)trouver** : avec métadonnées uniques et pérennes (archivage sécurisé), indexées (arborescence de mots-clés)

**Accessible** : pas obligatoirement données ouvertes mais récupérables par leur identifiant, protocole standard de communication

**Interopérables** : interopérabilité sémantique et syntaxique, métadonnées contextuelles précises, formats respectant les standards internationaux

**Réutilisables** : utilisation de standards communs, bases de données rassemblant des données claires, vérifiées et bien décrites

- Faciliter le travail collaboratif
  - Ne pas perdre les données dont l'acquisition a un coût non négligeable
  - Outils de dé-duplication (factoriser des séquences de données identiques pour la sauvegarde)
-

# Choisir le langage de programmation

---

- Implémentations comparables de solutions à un ensemble de problèmes
- 13 problèmes de référence solubles par tous les langages testés
- Algorithme donné et directives de mise en œuvre spécifiques

**Table 2.** Languages sorted by paradigm

<b>Paradigm</b>	<b>Languages</b>
Functional	Erlang, F#, Haskell, Lisp, Ocaml, Perl, Racket, Ruby, Rust;
Imperative	Ada, C, C++, F#, Fortran, Go, Ocaml, Pascal, Rust;
Object-Oriented	Ada, C++, C#, Chapel, Dart , F#, Java, JavaScript, Ocaml, Perl, PHP, Python, Racket, Rust, Smalltalk, Swift, TypeScript;
Scripting	Dart, Hack, JavaScript, JRuby, Lua, Perl, PHP, Python, Ruby, TypeScript;

**Table 4.** Normalized global results for Energy, Time, and Memory

Total					
	Energy		Time		Mb
(c) C	1.00	(c) C	1.00	(c) Pascal	1.00
(c) Rust	1.03	(c) Rust	1.04	(c) Go	1.05
(c) C++	1.34	(c) C++	1.56	(c) C	1.17
(c) Ada	1.70	(c) Ada	1.85	(c) Fortran	1.24
(v) Java	1.98	(v) Java	1.89	(c) C++	1.34
(c) Pascal	2.14	(c) Chapel	2.14	(c) Ada	1.47
(c) Chapel	2.18	(c) Go	2.83	(c) Rust	1.54
(v) Lisp	2.27	(c) Pascal	3.02	(v) Lisp	1.92
(c) Ocaml	2.40	(c) Ocaml	3.09	(c) Haskell	2.45
(c) Fortran	2.52	(v) C#	3.14	(i) PHP	2.57
(c) Swift	2.79	(v) Lisp	3.40	(c) Swift	2.71
(c) Haskell	3.10	(c) Haskell	3.55	(i) Python	2.80
(v) C#	3.14	(c) Swift	4.20	(c) Ocaml	2.82
(c) Go	3.23	(c) Fortran	4.20	(v) C#	2.85
(i) Dart	3.83	(v) F#	6.30	(i) Hack	3.34
(v) F#	4.13	(i) JavaScript	6.52	(v) Racket	3.52
(i) JavaScript	4.45	(i) Dart	6.67	(i) Ruby	3.97
(v) Racket	7.91	(v) Racket	11.27	(c) Chapel	4.00
(i) TypeScript	21.50	(i) Hack	26.99	(v) F#	4.25
(i) Hack	24.02	(i) PHP	27.64	(i) JavaScript	4.59
(i) PHP	29.30	(v) Erlang	36.71	(i) TypeScript	4.69
(v) Erlang	42.23	(i) Jruby	43.44	(v) Java	6.01
(i) Lua	45.98	(i) TypeScript	46.20	(i) Perl	6.62
(i) Jruby	46.54	(i) Ruby	59.34	(i) Lua	6.72
(i) Ruby	69.91	(i) Perl	65.79	(v) Erlang	7.20
(i) Python	75.88	(i) Python	71.90	(i) Dart	8.64
(i) Perl	79.58	(i) Lua	82.91	(i) Jruby	19.84

# Langages les - couteux

---

- Langages compilés/interprétés/machines virtuelles
  - \* Lg compilés + rapides et + éco-énergétiques
  - \* Lg interprétés + lents
  - \* Lg compilés - d'espace mémoire
  - \* Lg interprétés + de mémoire
- Programmation impérative est la meilleure : - d'énergie et - de mémoire
- Consommation d'énergie : temps de fonctionnement x puissance  
Langage + rapide pas toujours + économe en énergie

# Neutralité carbone des entreprises du num ?

Consommation d'électricité augmente et empreinte carbone ne décroît pas

Neutralité devrait être compatible avec l'Accord de Paris

Neutralité = financer des projets de compensation (plantation d'arbres, remplacement par énergie renouvelable, ...)

Vente d'excédent de crédit à zéro émission (Tesla)

**Neutralité ≠ réduction**



# Loi REEN Réduire l'Empreinte Environnementale du Numérique

---

**Publiée au JO du 16/11/2021**

- Enseigner la sobriété numérique de la primaire au supérieur
- Orienter les pratiques commerciales
  - interdiction liée à l'obsolescence programmée
  - allonger les durées de garanties et mises à jour
- Favoriser l'essor du reconditionné / réemploi (pièces détachées)
- Numérique « vert » : obligations pour entreprises du numérique
- Création observatoire des impacts environnementaux du numérique

**Sanctions ?**

---

# Complexité pour des recommandations

---

- Estimation difficile des coûts environnementaux des actions num. (mail, visio, dépôt de fichier dans un cloud, ...)
- Remise en cause d'une croissance infinie dans un monde à ressources finies
- Réfléchir aux impacts directs et indirects de nos usages du num
- Refuser de produire ou conserver des données inutiles
- Ouvrir ses données, ouvrir son code
- Refuser de remplacer trop tôt, l'obsolescence programmée
- Favoriser le réemploi de matériel
- Recycler en utilisant les filières officielles
- Choisir constructeurs engagés dans une démarche éco-responsable

# Ataraxie du numérique

---

## De quoi voulons-nous avoir besoin ?

Selon Epicure : naturel/nécessaire

- Téléphoner à ses amis ou avoir de la 5G ?
- Partager des photos avec sa famille ou disposer de 1 To ?
- Faire du sport ou porter des objets connectés ?
- Regarder *Le Bon, la Brute et le Truand* ou regarder des films en 4K ?
- Écouter *Les Doors* ou avoir accès à de la musique illimitée ?

**Outils plus simples, moins invasifs, moins performants, qu'on contrôle au moins autant qu'ils nous contrôlent !**

---

# Références

---

- Didier Mallarino, « Agir vers la sobriété numérique », 03/2021, Eco-Info
- Anne-Cécile Orgerie, « L'informatique verte ... moins branchée ? », 02/2022, Eco-Info
- Francis Vivat et Anne-Laure Ligozat, « Mesurer et réduire les impacts du numérique », Eco-Info
- <http://ecoinfo.cnrs.fr>
- R. Pereira et al., Energy Efficiency across Programming Languages, SLE'17
- S. Crozat, Vers une ataraxie numérique, Forum de l'Ingénierie Durable 2020