

Quelles possibilités (de l'enseignement) d'un numérique dans le cadre des frontières planétaires ?



O. Michel
LACL / EPISEN

Regarde ma terre en pleurs

Mais les choses ici prennent une telle ampleur

[...]

Et finalement conscient qu'ici, on n'est que locataire

Tu parles d'une location, regarde un peu c'qu'on en a fait

Quand l'vieux fera l'état des lieux, on fera une croix sur la caution

On aurait dû le rendre comme on nous l'a donné

Clean, sans tache, et innocent comme un nouveau né

[...]

La flore crame, la faune canne

[...]

[IAM - La fin de leur monde - 2007]



Plan de la présentation

1. Contexte (poser les bases de la discussion)
2. Le numérique (sans limites ni matérialité)
3. Le numérique est là (le numérique rencontre le GIEC)
4. Que faire (Questions brûlantes pour se mettre en mouvement)
5. Conclusion

1 Contexte

Crise environnementale majeure

❑ De nombreux *dérèglements climatiques*

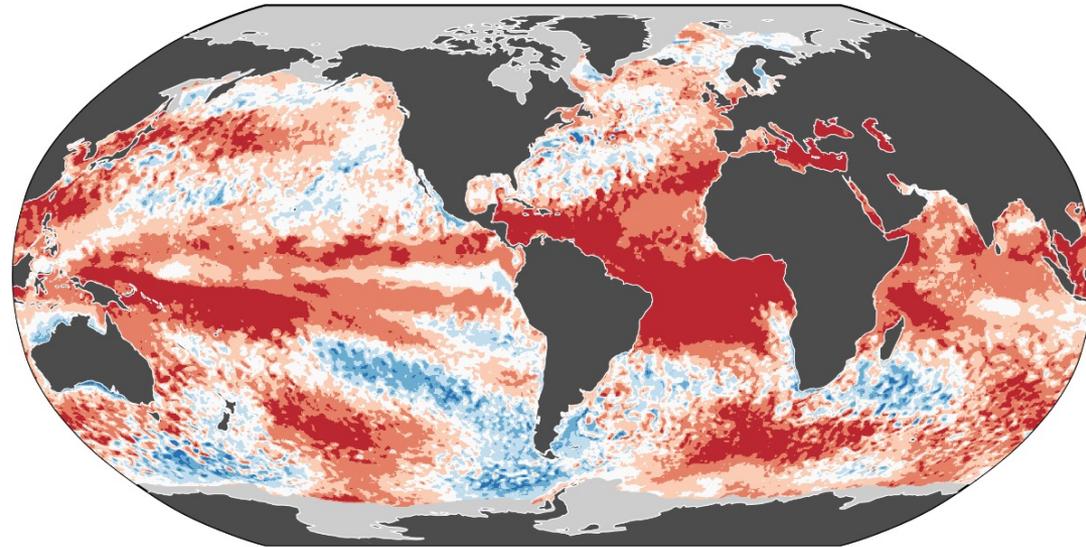
- ❑ Températures extrêmes
- ❑ Sécheresses
- ❑ Canicules
- ❑ Incendies
- ❑ Inondations
- ❑ Fontes des glaciers
- ❑ Dégel du permafrost
- ❑ ...

❑ Par rapport à 1850/1900

- ❑ +1,15 °C (monde)
- ❑ +1,7 °C (France)

Anomalies and extremes in sea surface temperature in April 2024

Data: ERA5 1979-2024 • Reference period: 1991-2020 • Credit: C3S/ECMWF



[...] April 2024 is the eleventh consecutive month being the warmest for the respective month of the year. [...]

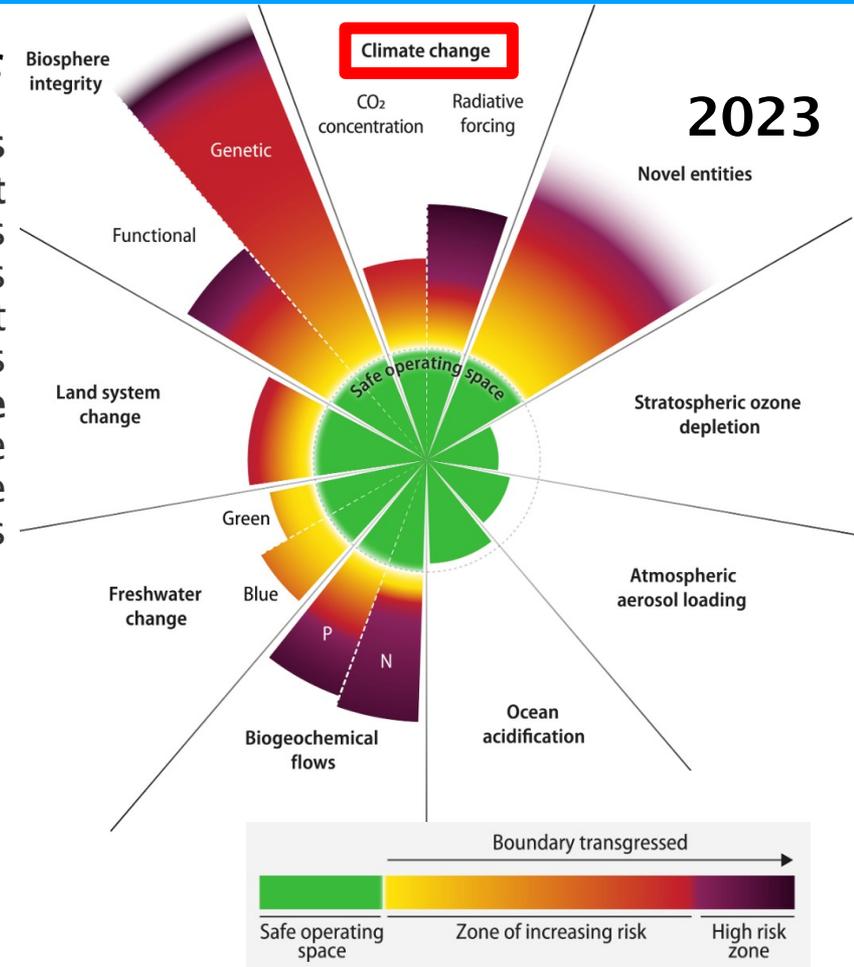
Le dérèglement climatique n'est pas tout

❑ Concept des *frontière planétaires*

- ❑ « Le cadre des frontières planétaires délimite les systèmes biophysiques et biochimiques et les processus connus pour réguler l'état de la planète dans des limites historiquement connues et scientifiquement susceptibles de maintenir la stabilité du système terrestre et les systèmes de maintien de la vie propices au bien-être humain et le développement sociétal observés au cours de l'Holocène »

❑ Régulation pendant > 3B années

- ❑ Interactions entre géosphère et biosphère ont contrôlé les conditions environnementales
- ❑ Holocène (dernières 11 000 années) ont été stables



<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adh2458>

Le dérèglement climatique n'est pas tout

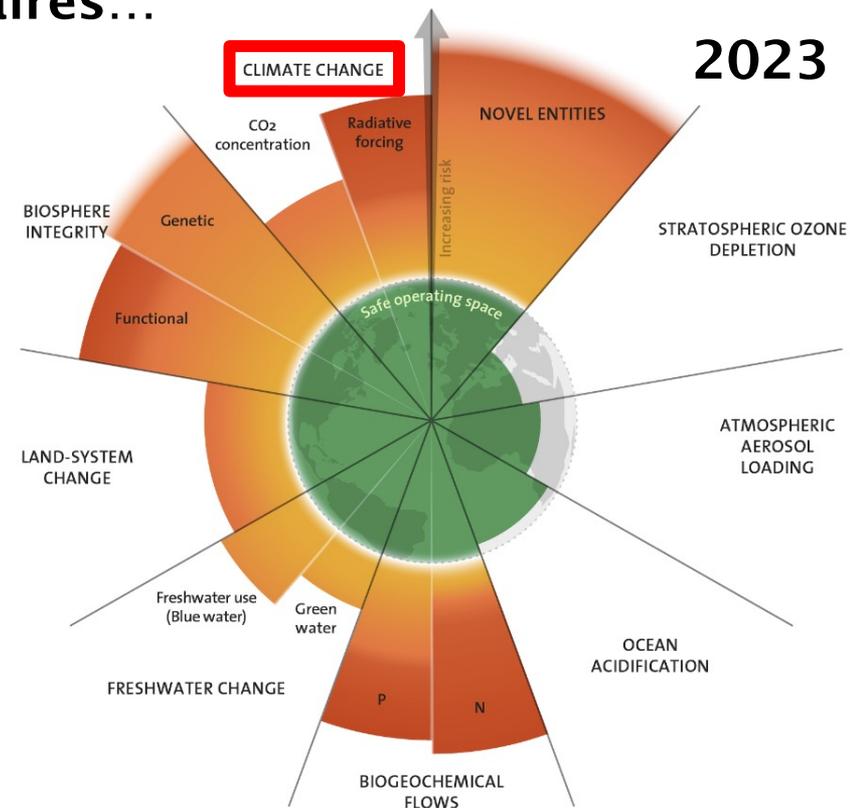
❑ C'est *une* des 9 frontières planétaires...

❑ Définie par une variable de contrôle

- ❑ Concentration de CO₂ (ppm CO₂)
- ❑ Forçage radiatif à la troposphère

❑ Trois valeurs

- ❑ De **référence** (époque pré-industrielle - 1750)
 - ❑ 280 ppm CO₂
 - ❑ 0W / m²
- ❑ Une **frontière** et **limite supérieure** d'un risque accru
 - ❑ 350 ppm CO₂ - 450 ppm CO₂
 - ❑ +1 et +2 degrés de réchauffement
 - ❑ +1.0W / m²
- ❑ La **valeur actuelle**
 - ❑ 423 ppm CO₂ (novembre 2024)
 - ❑ +1.5 W / m²



<https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>

<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adh2458>

Le dérèglement climatique n'est pas tout

☐ ...dont 6 sont dépassées

🚫 1. Changement climatique

☐ Mais aussi

🚫 2. Pollution chimique

3. Appauvrissement couche d'ozone

4. Diffusion des aérosols

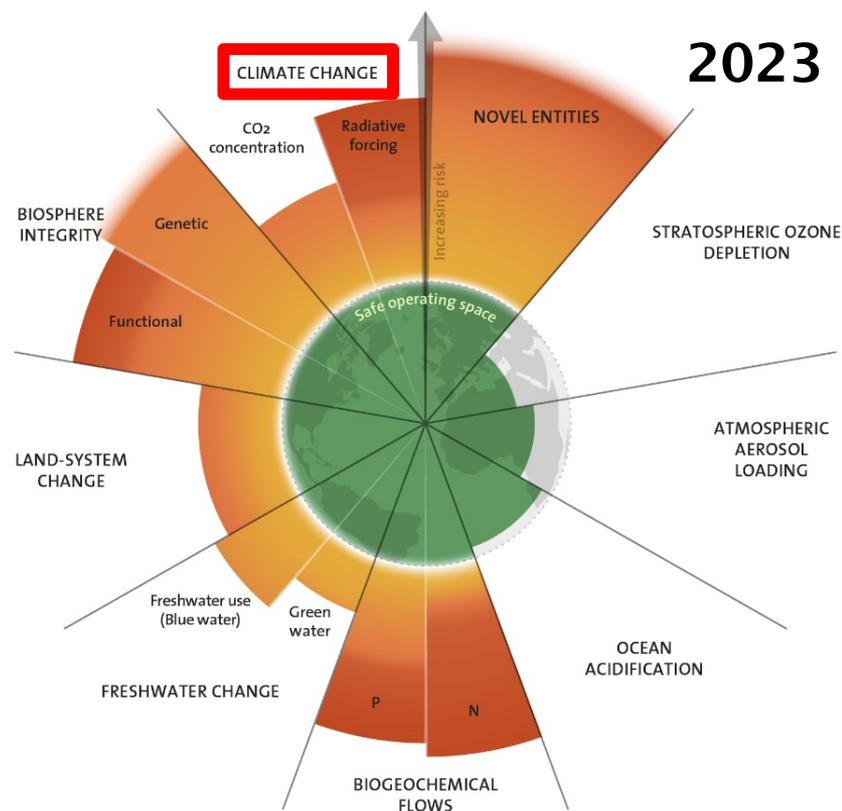
5. Acidification des océans

🚫 6. Flux biogéochimiques (N/P)

🚫 7. Cycle de l'eau douce

🚫 8. Changement d'affectation des sols

🚫 9. Perte de biodiversité



<https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>

Production de GES et hausse de la température

❑ Les modélisations du GIEC (AR6 – 2021 – p20/21)

B.5.2 For every 1000 GtCO₂ emitted by human activity, global surface temperature rises by 0.45°C (best estimate, with a *likely* range from 0.27 to 0.63°C). The best estimates of the remaining carbon budgets from the

³⁹ Net zero GHG emissions defined by the 100-year global warming potential. See footnote 9.

Subject to Copyedit

p.20

Approved

Summary for Policymakers

IPCC AR6 SYR

beginning of 2020 are 500 GtCO₂ for a 50% likelihood of limiting global warming to 1.5°C and 1150 GtCO₂ for a 67% likelihood of limiting warming to 2°C⁴⁰. The stronger the reductions in non-CO₂ emissions the lower the resulting temperatures are for a given remaining carbon budget or the larger remaining carbon budget for the same level of temperature change⁴¹. {3.3.1}

En 2021...

<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

Production de GES et hausse de la température

❑ Les modélisation du GIEC (2021)

B.5.2 For every 1000 GtCO₂ emitted by human activity, global surface temperature rises by 0.45°C (best estimate, with a *likely* range from 0.27 to 0.63°C). The best estimates of the remaining carbon budgets from the

³⁹ Net zero GHG emissions defined by the 100-year global warming potential. See footnote 9.

Subject to Copyedit

p.20

Approved

Summary for Policymakers

IPCC AR6 SYR

beginning of 2020 are 500 GtCO₂ for a 50% likelihood of limiting global warming to 1.5°C and 1150 GtCO₂ for a 67% likelihood of limiting warming to 2°C⁴⁰. The stronger the reductions in non-CO₂ emissions the lower the resulting temperatures are for a given remaining carbon budget or the larger remaining carbon budget for the same level of temperature change⁴¹. {3.3.1}

<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

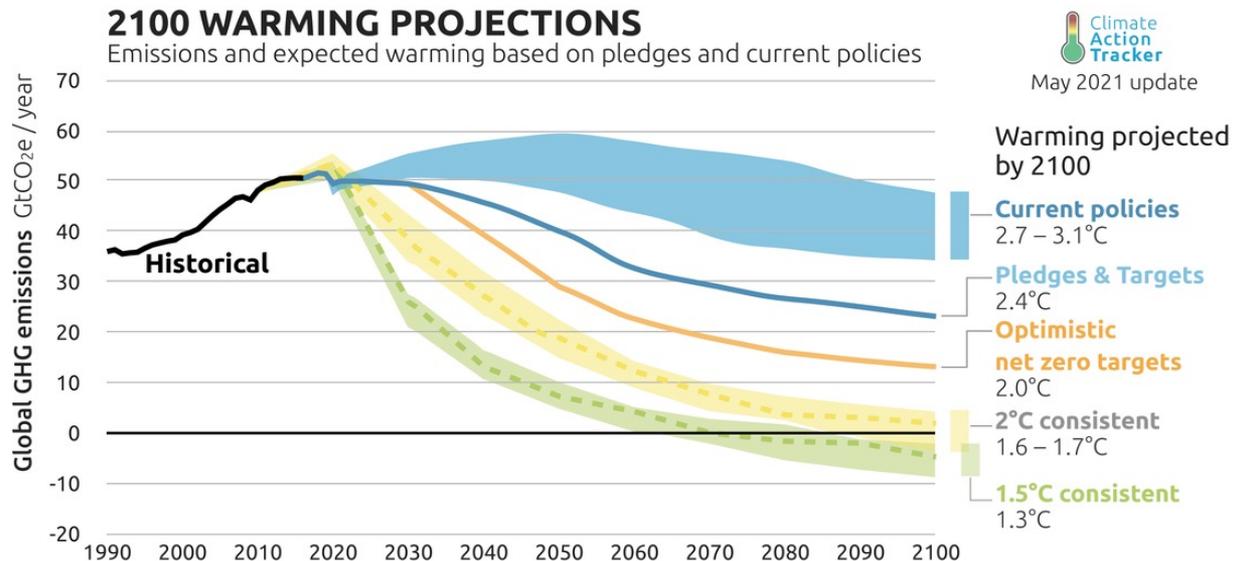
❑ Stocks de CO2 disponible (en 2024)

❑ 2023 (50%) : +1,5 °C : 275 Gt / +1,7 °C : 625 Gt / +2 °C : 1 050 Gt

❑ 2024 (50%): +1,5 °C : 200 Gt

GIEC et projections

- ❑ Le climat n'est pas la météo : un réchauffement de x degrés correspond à une température moyenne de x degrés supérieure à la période 1850-1900 sur une moyenne mobile de 20 ans (6^{ème} rapport du GIEC – AR6 – 2021-2023)
- ❑ Jusqu'au 5^{ème} rapport, le GIEC parlait de scénarii RCP « trajectoires représentatives de concentration » avec 4 trajectoires de forçage radiatif sur la base de 4 hypothèses concernant la quantité de GES émise en 2000-2100 (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5)
- ❑ Les projections sont à l'horizon 2100



Les trajectoires socioéconomiques partagées (SSP)

- ❑ Avec AR6, le GIEC réalise 5 projections SSPX-Y « trajectoires socioéconomiques partagées » – SSPX-Y avec X le scénario de la projection et Y le forçage radiatif en W/m²)
- ❑ **SSP1- Sustainability – Taking the Green Road** (Low challenges to mitigation and adaptation)
- ❑ **SSP2 - Middle of the Road** (Medium challenges to mitigation and adaptation)
- ❑ **SSP3 - Regional Rivalry – A Rocky Road** (High challenges to mitigation and adaptation)
- ❑ **SSP4 - Inequality – A Road Divided** (Low challenges to mitigation, high challenges to adaptation)
- ❑ **SSP5 - Fossil-fueled Development – Taking the Highway** (High challenges to mitigation, low challenges to adaptation)

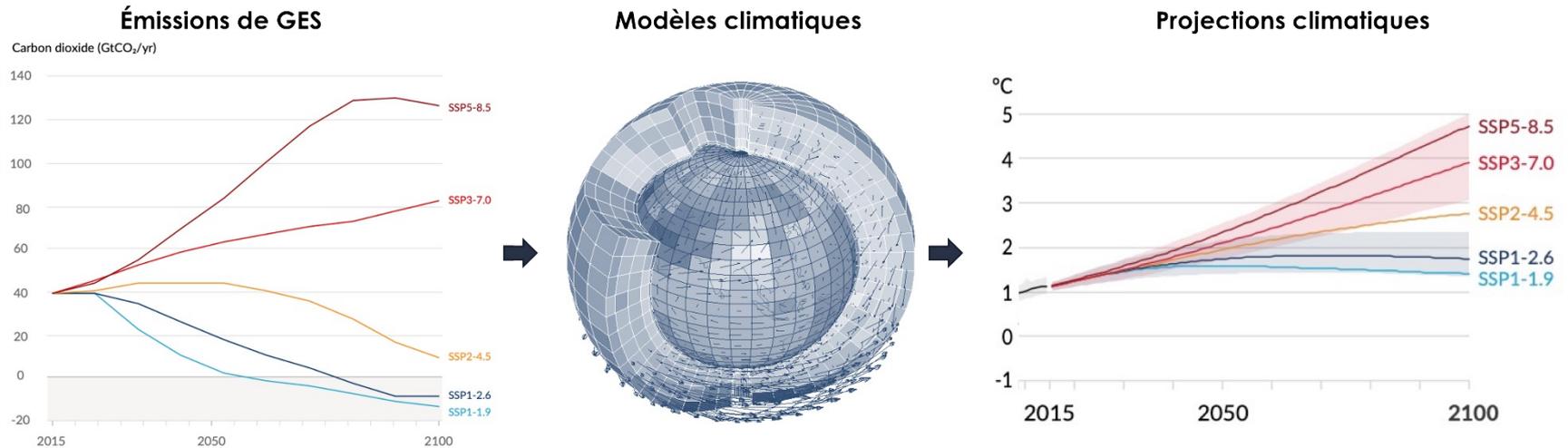
- ❑ **Les scénari**
 - ❑ Deux avec des émissions de GES (très) faibles : 1-1.9 (conforme aux accords de Paris) et 1-2.6
 - ❑ Un avec des émissions de GES intermédiaires : 2 (« *business as usual* »)
 - ❑ Deux avec émissions de GES (très) élevées : 3 (probable) et 5 (échec des politiques d'atténuations et sans limites)

Les trajectoires socioéconomiques partagées (SSP)

- ❑ Avec AR6, le GIEC réalise 5 projections SSPX-Y « trajectoires socioéconomiques partagées » – SSPX-Y avec X le scénario de la projection et Y le forçage radiatif en W/m^2)
- ❑ **SSP1- Sustainability – Taking the Green Road** (Low challenges to mitigation and adaptation)
- ❑ **SSP2 - Middle of the Road** (Medium challenges to mitigation and adaptation)
- ❑ **SSP3 - Regional Rivalry – A Rocky Road** (High challenges to mitigation and adaptation)
- ❑ **SSP4 - Inequality – A Road Divided** (Low challenges to mitigation, high challenges to adaptation)
- ❑ **SSP5 - Fossil-fueled Development – Taking the Highway** (High challenges to mitigation, low challenges to adaptation)
- ❑ **Plus précisément**
 - ❑ **SSP1 – 1.9 : émissions de GES en baisse dès 2025 ; zéro émissions nettes avant 2050 ; émissions négatives après 2050**
 - ❑ **SSP1 – 2,6 : idem SSP1 mais seulement zéro émissions nettes après 2050**
 - ❑ **SSP2 – 4,5 : maintien des émissions courantes jusqu'à 2050 ; /4 d'ici 2100**
 - ❑ **SSP3 – 7.0 : doublement des émissions de GES en 2100**
 - ❑ **SSP5 – 8,5 : émission de GES en forte augmentation ; doublement en 2050**

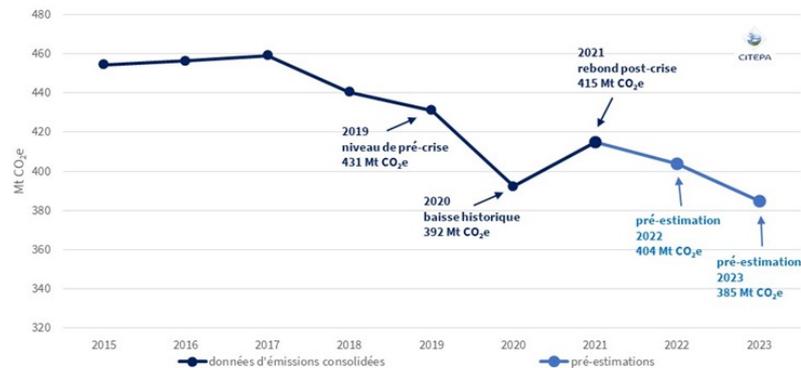
Des SSP au réchauffement climatique

□ En 2023, émission d'environ 40 Gt de CO₂ / an



<https://www.carbone4.com/publication-scenarios-ssp-adaptation>

□  / an
□ Environ 400 Mt de CO₂e



<https://www.citepa.org/fr/barometre/>

Conclusion partielle

- ❑ **Le dépassement des frontières planétaires**
 - ❑ Nous place dans une *zone d'incertitude*
 - ❑ Caractérisée par d'*importantes fluctuations*

- ❑ **Les projections du GIEC**
 - ❑ Nous engage à réduire nos émissions nettes de GES
 - ❑ SSP1 : net zéro en 2050 (puis négatif ensuite)

2 Le numérique

Le numérique, problème de définition

❑ Définition technique (et pas du tout *socio-technique*)

« Écosystème qui regroupe l'ensemble des dispositifs permettant de manipuler de l'information sous forme électronique »

❑ Deux contours selon l'OCDE(*)

❑ L'objet numérique lui-même avec une structuration en trois tiers

- ❑ Data (calculs) centers / utilisateurs / réseaux

❑ Un processus : la *numérisation* des activités

- ❑ Agriculture, bâtiment, transports, industrie, santé, enseignement...
- ❑ => les effets que contiennent tous les changements dus au numérique

(*) G. Roussihle - Situer le numérique - 2022
<https://situer-le-numerique.netlify.app/>

Une construction technique sans limite

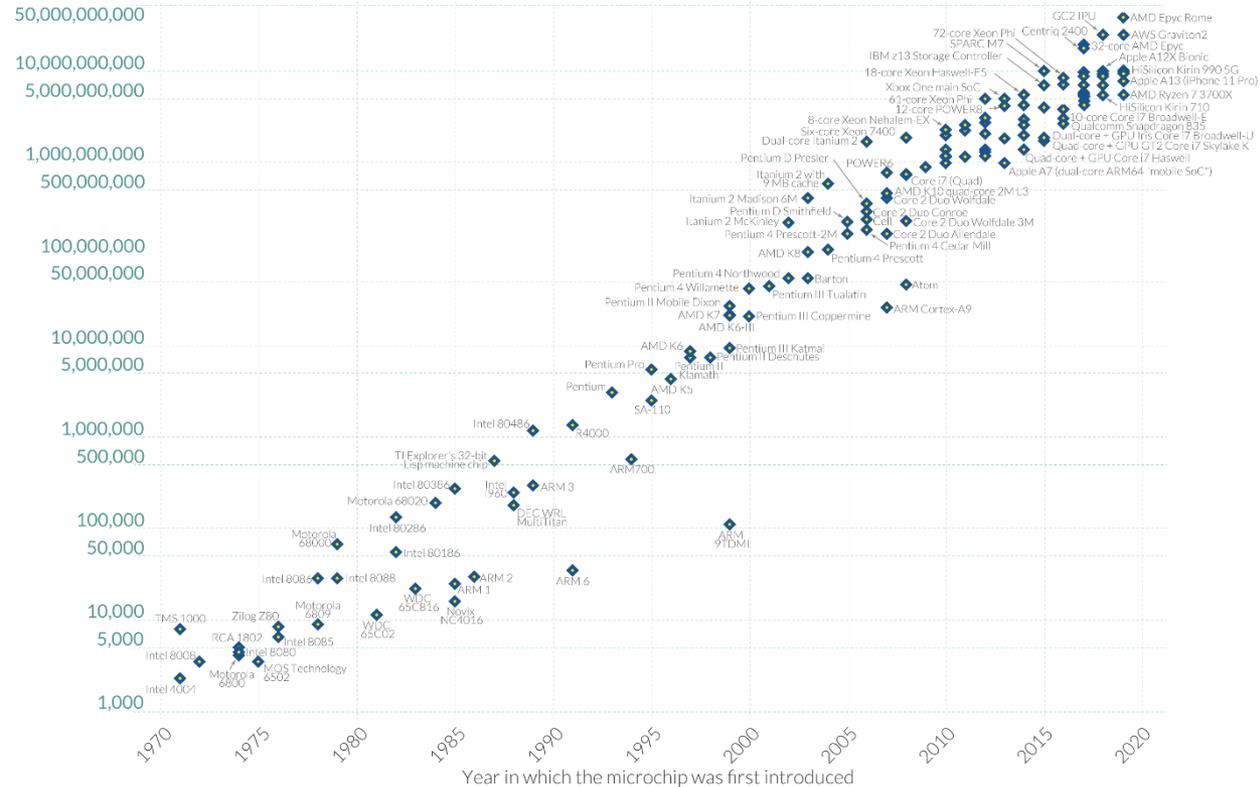
Calcul : prophétique loi de G. Moore (1965)

Moore's Law: The number of transistors on microchips has doubled every two years

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important for other aspects of technological progress in computing – such as processing speed or the price of computers.



Transistor count



Data source: Wikipedia (wikipedia.org/wiki/Transistor_count)

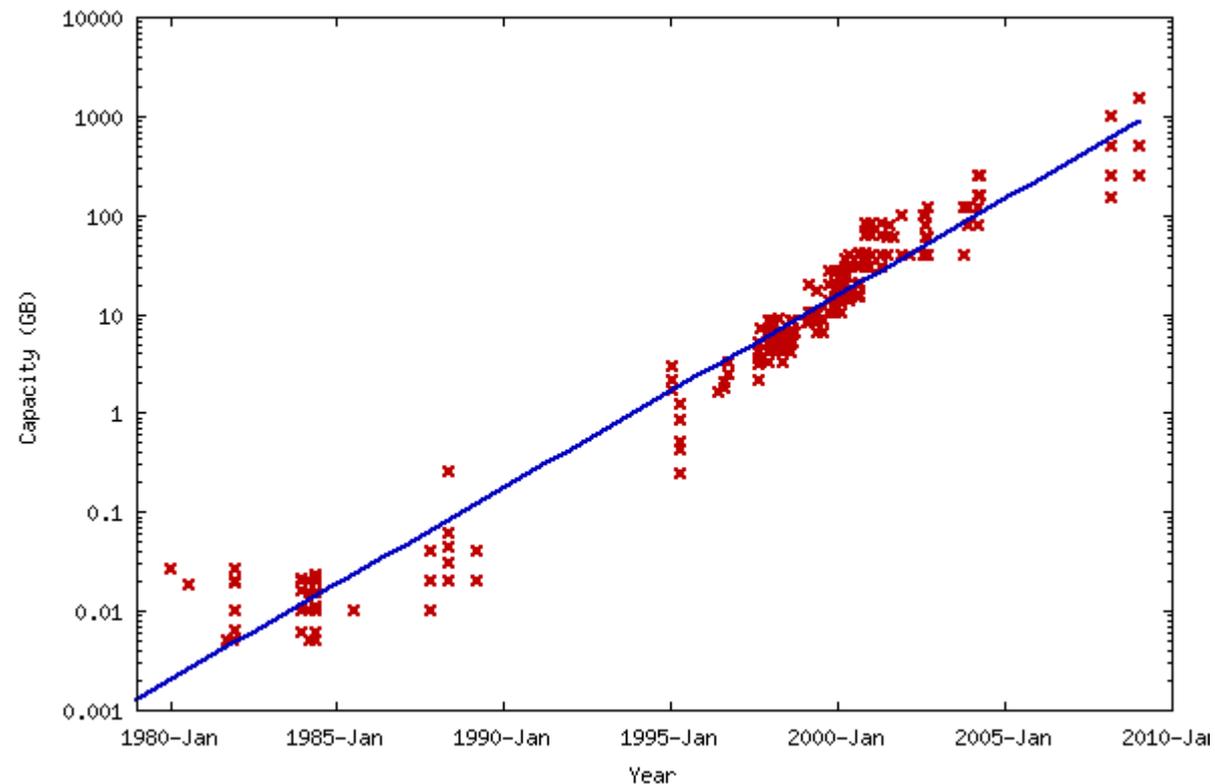
OurWorldInData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

<https://ourworldindata.org/moores-law>

Une construction technique sans limite

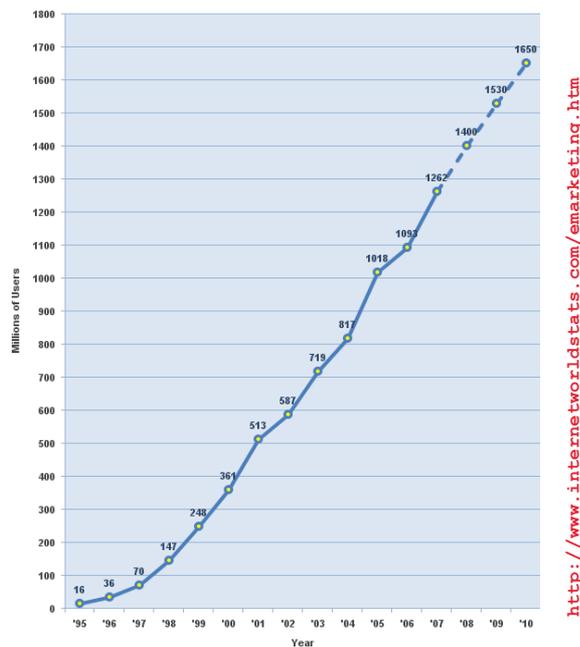
- ❑ Calcul
- ❑ Loi de Kryder (*Sci. Am.* 2005) : capacité de stockage des disques



<https://blog.dshr.org/2012/12/talk-at-fall-2012-cni.html>

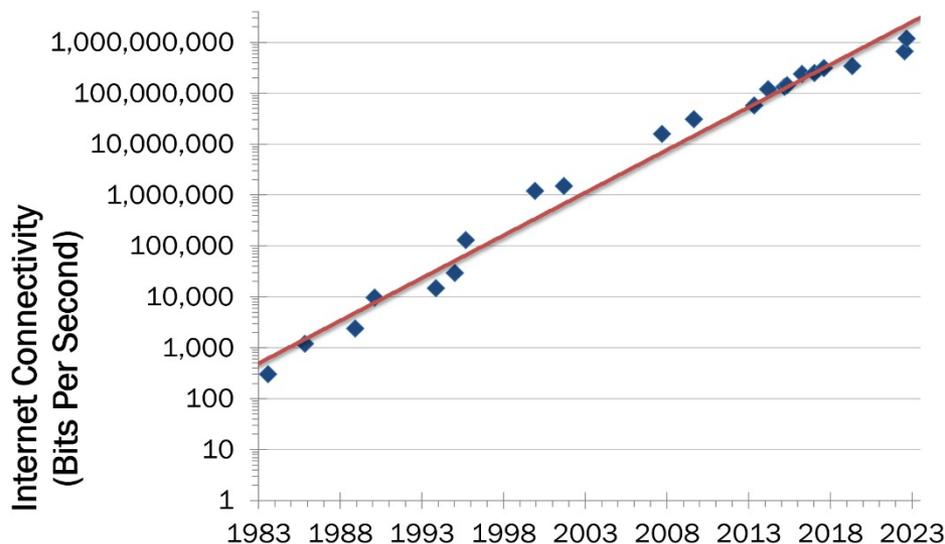
Une construction technique sans limite

- ❑ Calcul
- ❑ Stockage
- ❑ Loi de Metcalfe (la valeur d'un réseau croit au carré du nombre d'utilisateurs)



Une construction technique sans limite

- ❑ Calcul
- ❑ Stockage
- ❑ Usage
- ❑ Loi de Gilder : triplement de la bp / les 6 mois
- ❑ Nielsen's law : l'état de l'art d'une connexion croit de 50% par an



<https://www.nngroup.com/articles/law-of-bandwidth/>

Qui se reflète dans les usages (ex : IA)

Mega = 10^6
 Giga = 10^9
 Tera = 10^{12}
 Peta = 10^{15}
 Exa = 10^{18}
 Zetta = 10^{21}
 Yotta = 10^{24}

□ GPT

□ 2018

□ 17 600 petaFLOPS

□ GPT-2

□ 2019

□ 1,49M petaFLOPS

□ GPT-3

□ 2020

□ 341M petaFLOPS
 (341 zettaFLOPS)

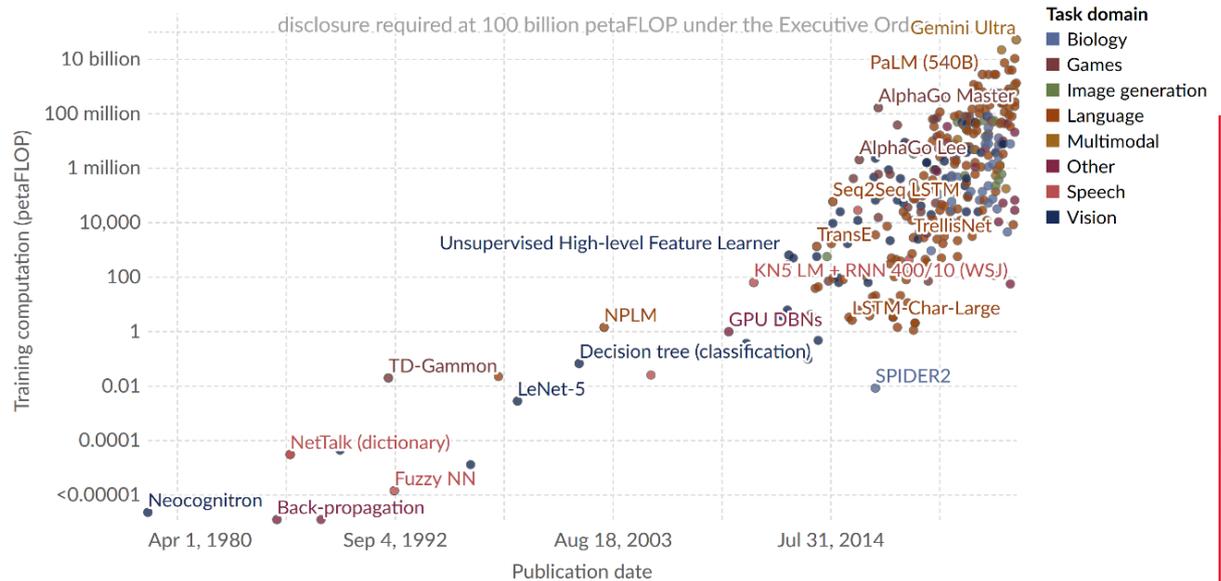
□ GPT-4

□ 21B petaFLOPS
 (21 yottaFLOPS)

Computation used to train notable artificial intelligence systems

Our World
in Data

Computation is measured in total petaFLOP, which is 10^{15} floating-point operations¹. Estimated from AI literature, albeit with some uncertainty. Estimates are expected to be accurate within a factor of 2, or a factor of 5 for recent undisclosed models like GPT-4.



Data source: Epoch (2024)

OurWorldInData.org/artificial-intelligence | CC BY

Note: The Executive Order on AI refers to a directive issued by President Biden on October 30, 2023, aimed at establishing guidelines and standards for the responsible development and use of artificial intelligence within the United States.

1. Floating-point operation: A floating-point operation (FLOP) is a type of computer operation. One FLOP represents a single arithmetic operation involving floating-point numbers, such as addition, subtraction, multiplication, or division.

https://ourworldindata.org/artificial-intelligence#the-1-art-decides-how-a-continuous-exponential-increase-in-the-computation-used-to-train-ai-key-1980s

Qui se reflète dans les usages (ex : IA)

Mega = 10^6
Giga = 10^9
Tera = 10^{12}
Peta = 10^{15}
Exa = 10^{18}
Zetta = 10^{21}
Yotta = 10^{24}

❑ Ces modèles sont entraînés avec des GPU

❑ NVIDIA H100 (H200 le 12/2024)

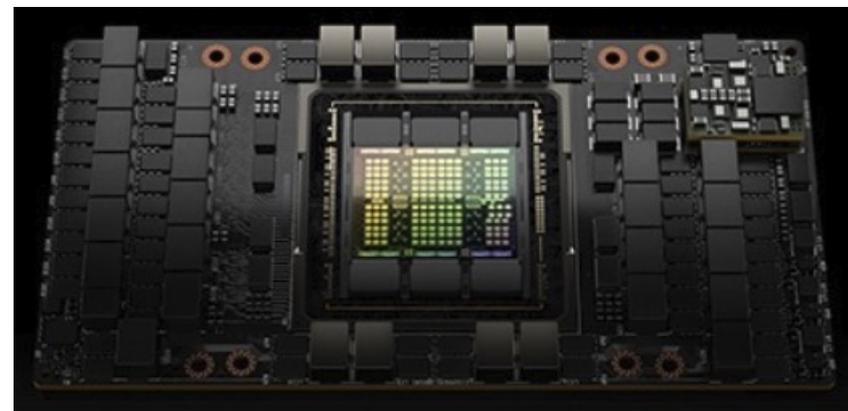
❑ 30 à 40 k€

❑ 400W à 700W

❑ Performances

FP64	34 teraFLOPS
FP64 Tensor Core	67 teraFLOPS
FP32	67 teraFLOPS
TF32 Tensor Core	989 teraFLOPS
BFLOAT16 Tensor Core	1,979 teraFLOPS
FP16 Tensor Core	1,979 teraFLOPS
FP8 Tensor Core	3,958 teraFLOPS
INT8 Tensor Core	3,958 TOPS

<https://resources.nvidia.com/en-us-tensor-core/nvidia-tensor-core-gpu-datasheet>



❑ Gpt 3 (donc pas la dernière version)

❑ 176 milliards de paramètres

❑ Entraînement sur NVIDIA V100

❑ 552 tonnes eCO2 pour son entraînement et 1 287 MWh d'électricité consommé

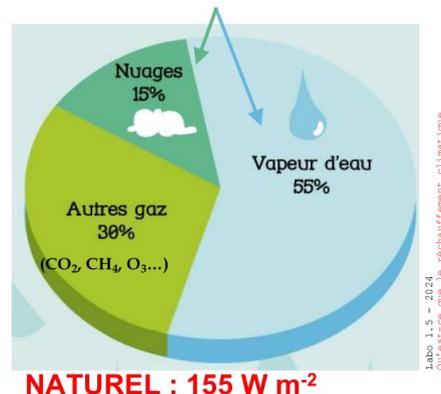
❑ 10M d'utilisateurs mobilisent 564 MWh d'électricité / jour

Une construction technique sans limite... ...mais pas sans matérialité

- ❑ Des capacités *illimités* Calcul/Stockage/Usage/Communication
- ❑ Qui se reflète dans l'imaginaire : exemple « Cloud computing »
 - ❑ **Totalement dématérialisé**
 - ❑ **Avec des ressources à la demande (hyperscale)**
 - ❑ **Sans contrainte**

Une construction technique sans limite... ...mais pas sans matérialité

- ❑ Des capacités *illimités* Calcul/Stockage/Usage/Communication
- ❑ Qui se reflète dans l'imaginaire : exemple « Cloud computing »
 - ❑ **Totalement dématérialisé**
 - ❑ **Avec des ressources numérique à la demande (*hyperscale*)**
 - ❑ **Sans contrainte**
 - ❑ **Et pourtant, les nuages, c'est 15% de l'effet de serre naturel terrestre**



Matérialité du numérique

❑ Quelques chiffres

- ❑ 34 B d'équipements
- ❑ 4.1B d'utilisateurs
- ❑ 5,5% de l'électricité mondiale

❑ Vision classique en 3 tiers

❑ Data centers

- ❑ 67 millions de serveurs
- ❑ 1-1.3% de l'électricité mondiale (IEA - 2022)

❑ Terminaux utilisateurs

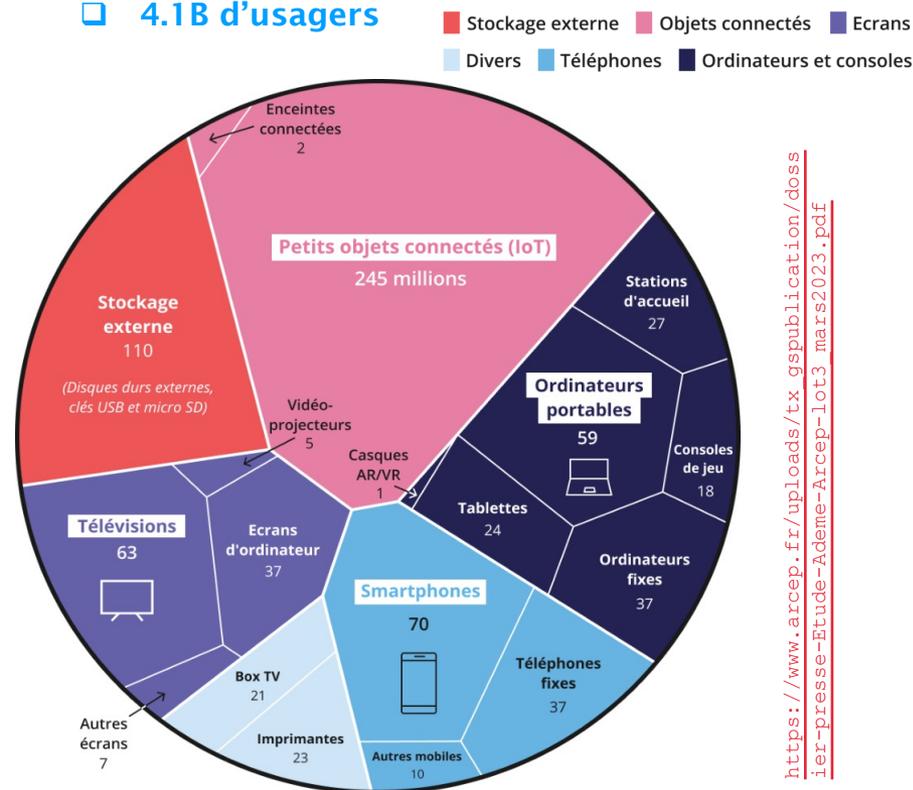
- ❑ 3.5B de smartphones
- ❑ > 3B d'écrans
- ❑ Entre 10 et 30B d'IOT

❑ Réseaux

- ❑ 1B de *box*
- ❑ 10M d'antennes relais

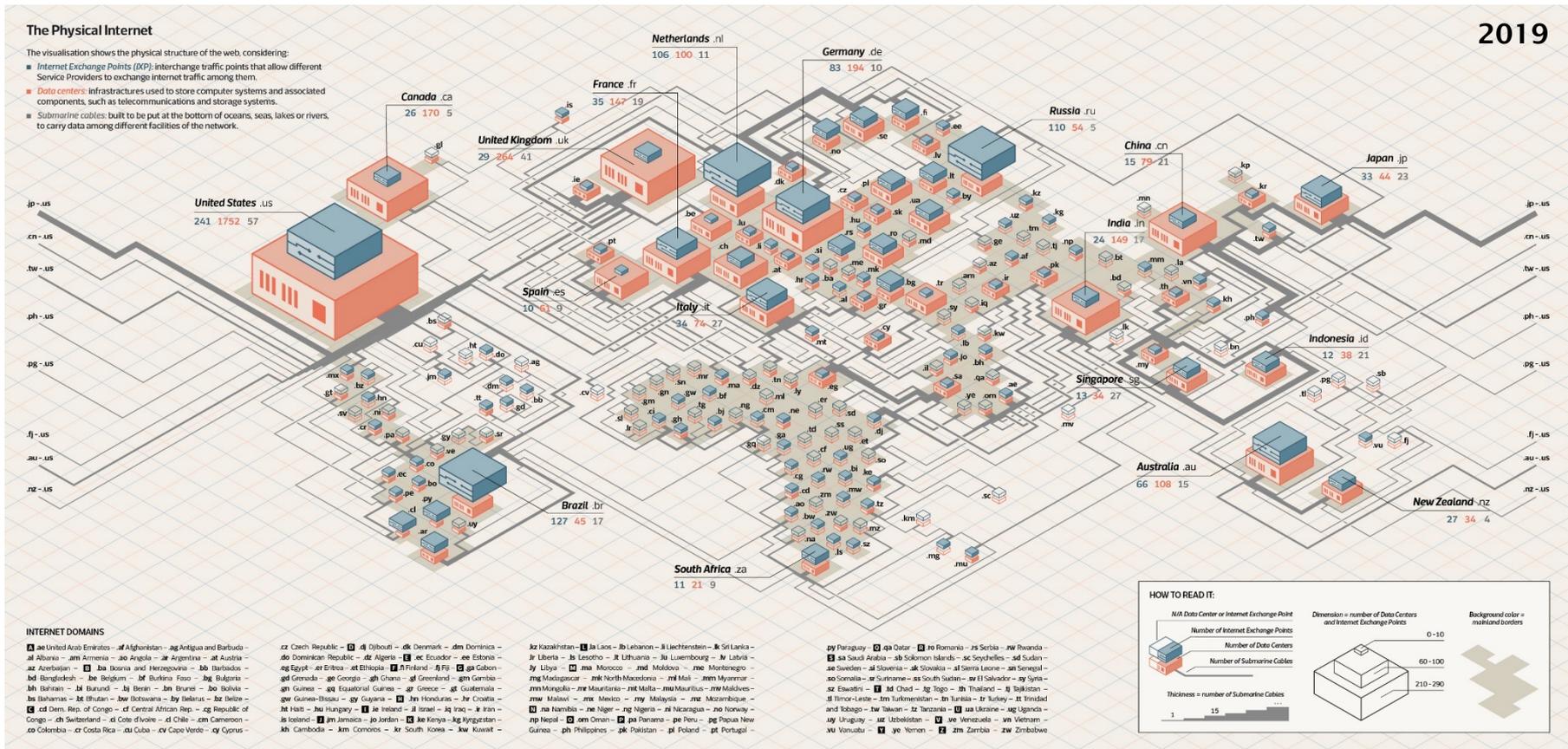
❑ En France

- ❑ 10% de l'électricité consommée
- ❑ > 800M d'équipements utilisateurs (2020)
- ❑ 4.1B d'utilisateurs



Données issues entre autres de [GreenIT2019](#) – [Lean ICT 2018](#)

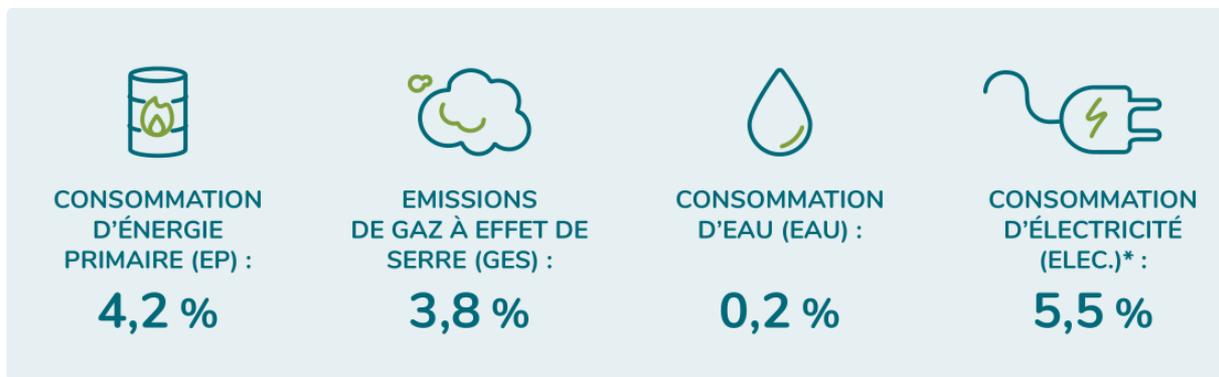
□ Une géographie des implantations... *inégale*



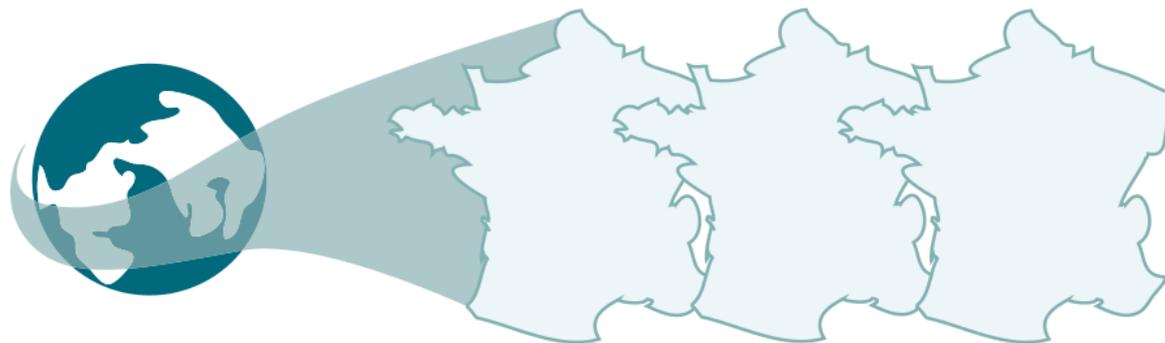
https://identifides.in.dl.thub.io/teaching-d615/course- results/es01/gr0p04/assets/img/Physical%20Internet%20CORSEIPA.jpg

Matérialité du numérique

□ Synthétiquement (retenir les *ordres de grandeur*)



□ Si le numérique était un pays : 2 à 3 fois l'empreinte de la France



Données issues entre autres de [GreenIT2019](#) – [Lean ICT 2018](#)

Matérialité du numérique

□ Ou encore (par an)



Émissions de gaz à effet de serre :

- 116 millions de tours du monde en voiture (42 000 kms)
- 1,5 milliard de salariés français parcourant chaque jour 25 km aller-retour en voiture pour aller travailler, pendant 1 an.



Eau :

- 242 milliards de packs d'eau minérale (9 litres)
- 3,6 milliards de douches



Conso. d'électricité :

- 82 millions de radiateurs électriques (1000 Watts) allumés en permanence

Données issues entre autres de [GreenIT2019](#) – [Lean ICT 2018](#)

Un numérique physique qui occupe l'espace

❑ En 2024

❑ 1,4M de km de câbles

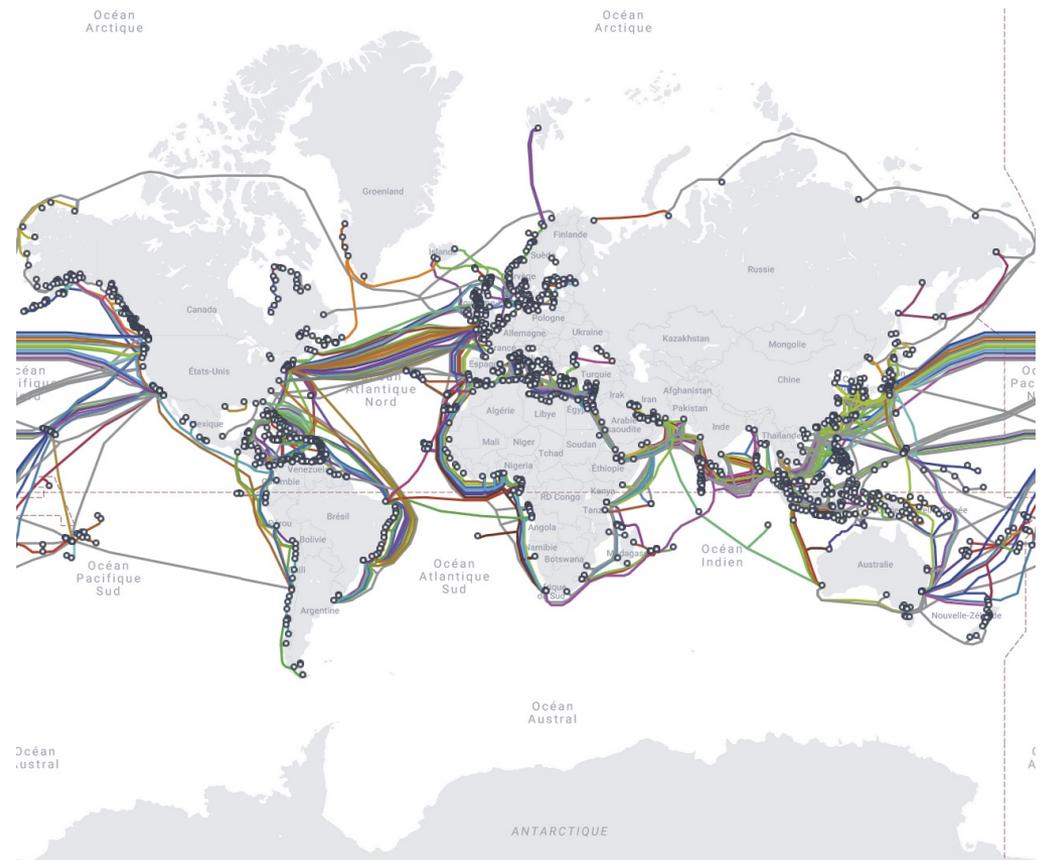
❑ (la planète fait 40k km)

❑ 574 câbles actifs

❑ De tailles variables

❑ 131km (Irlande - UK)

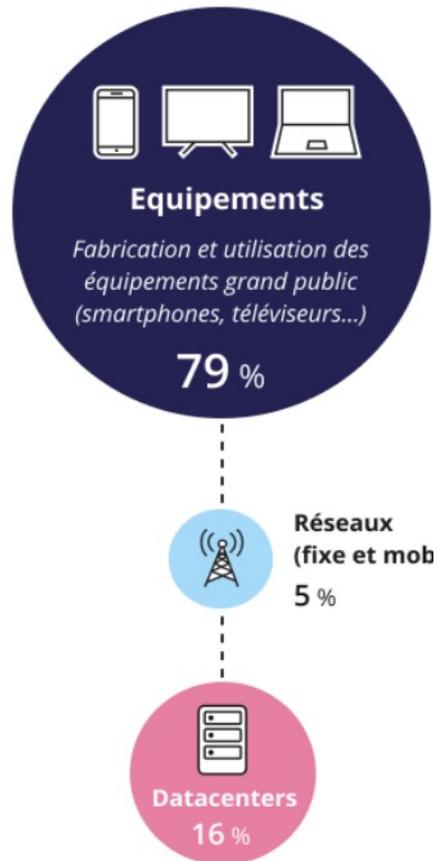
❑ à 20k km (Asia-America)



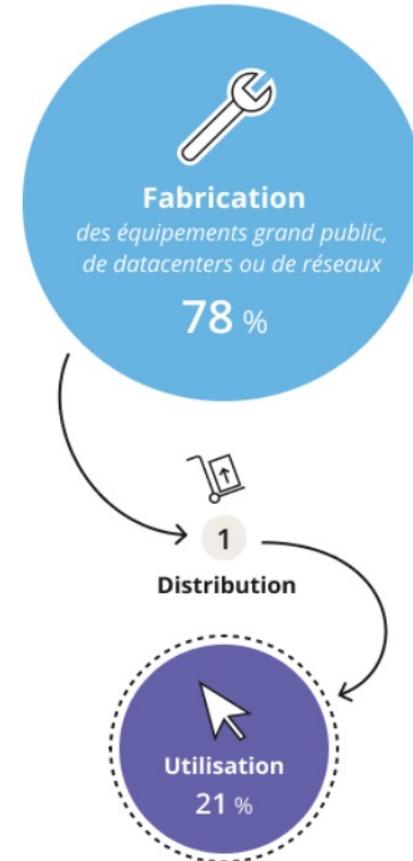
<https://www2.telegeography.com/submarine-cable-faqs-frequently-asked-questions>

Un numérique *physique*

- ❑ Répartition de l'empreinte carbone du numérique en 2020 par composant [ADEME 2023]

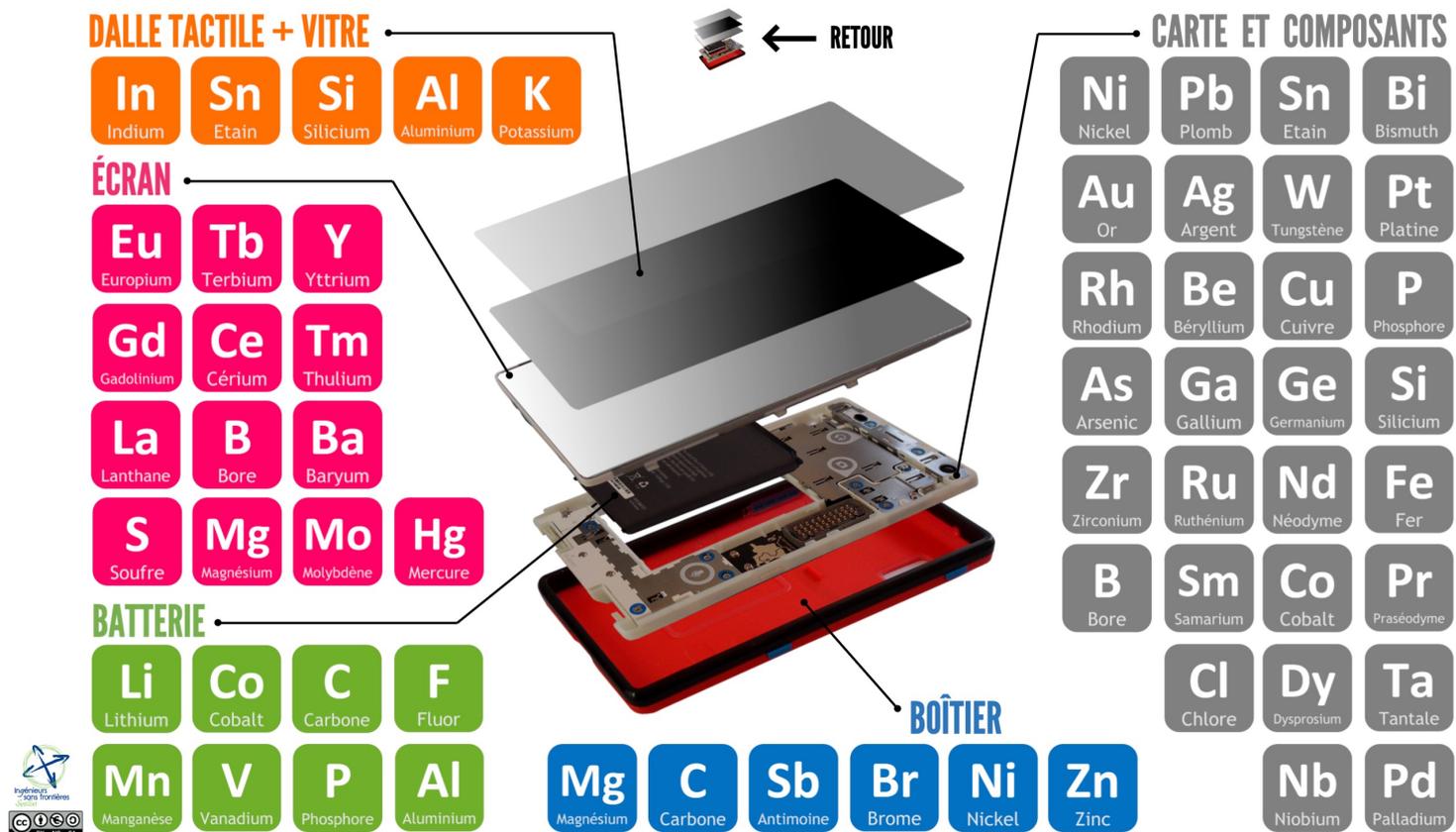


- ❑ Répartition de l'empreinte carbone du numérique en 2020 par phase du cycle de vie en % [ADEME 2023]



Un numérique (multiplement physique)

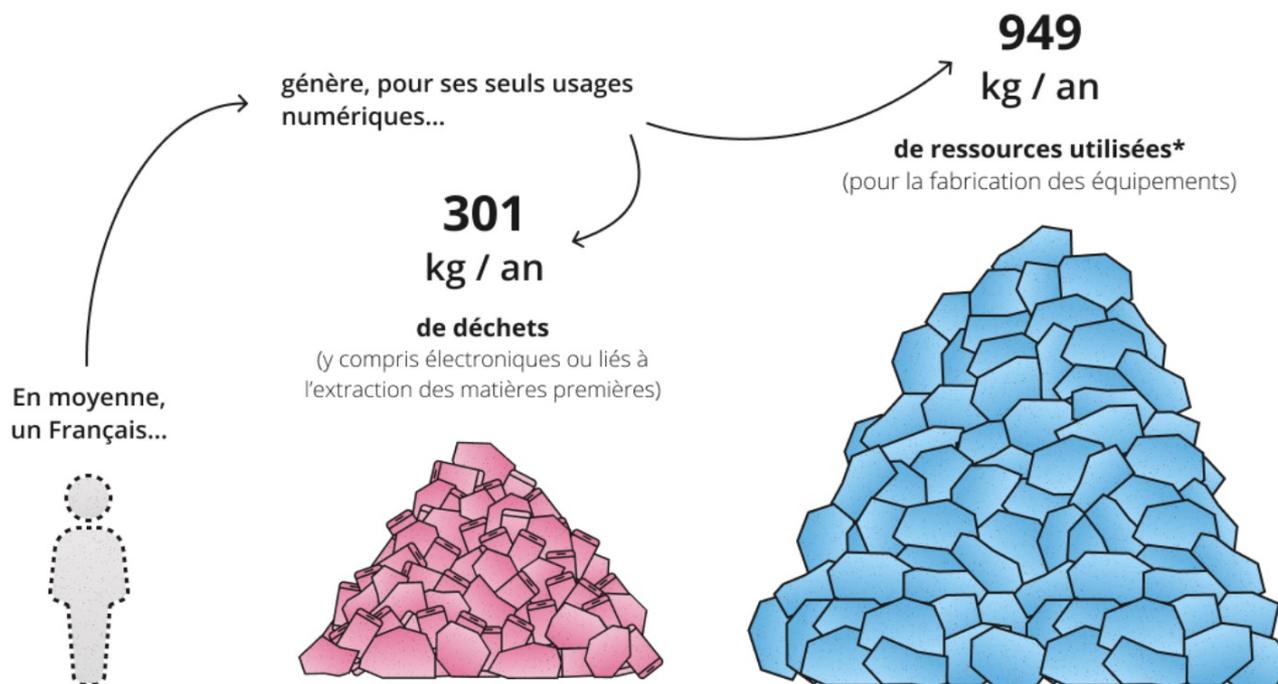
□ Les éléments contenus dans un smartphone (66% de la table des éléments)



<https://www.systext.org/sites/all/animationreveale/mtxsmmp/#/7>

Un numérique qui consomme des matériaux

- Quantité de ressources utilisées ou de déchets produits chaque année pour répondre aux usages numériques d'une personne vivant en France en 2020



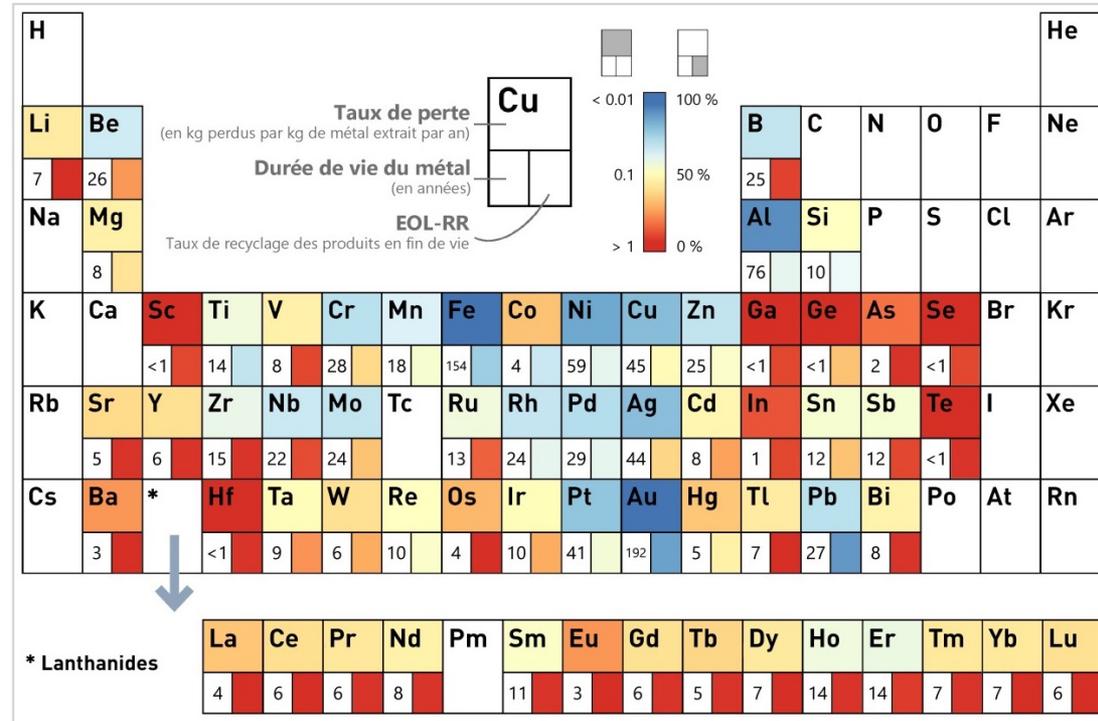
* comprenant ressources abiotiques (matériaux, énergie fossile...), biomasse, déplacements de terre et l'eau.

Un numérique qui se recycle mal

- ❑ Taux de perte, durée de vie et EOL-RR de 61 métaux

[donnés issues de Charpentier, Poncelet *et al.* - 2022]

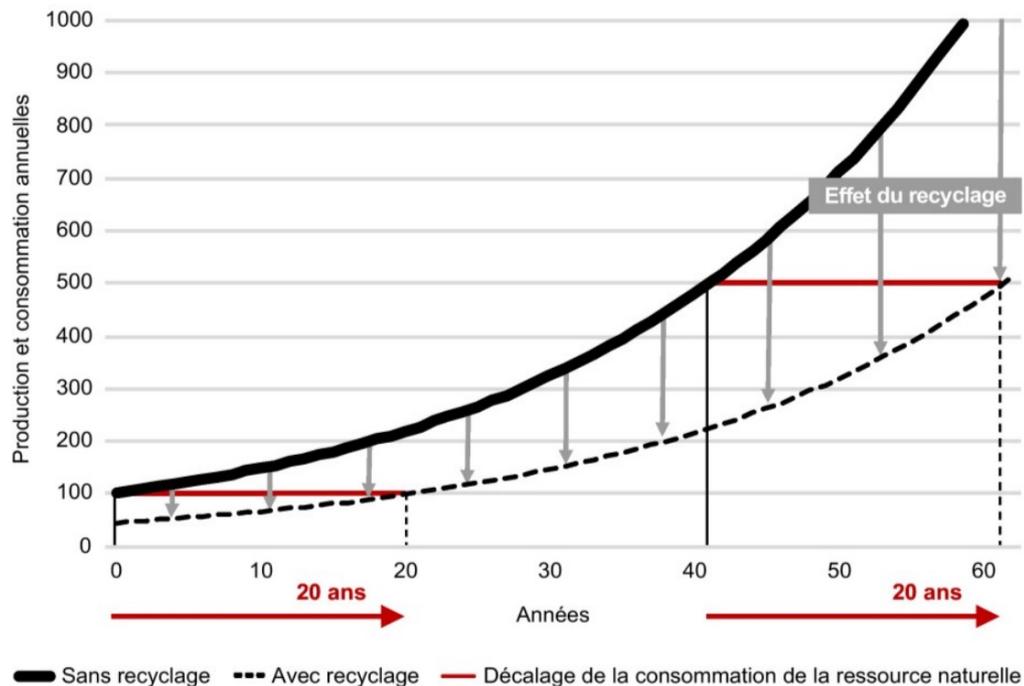
- ❑ Durée de vie : durée moyenne de son utilisation dans l'économie (de l'exploitation à sa disparition)
- ❑ Taux de perte : vitesse à laquelle le métal extrait devient indisponible pour un usage ultérieur



https://www.systext.org/sites/all/documents/RP_SystExt_C_ontroverses-Mine_VOLET-2_Tome-3_Avril2024.pdf page 107

Un recyclage qui ne fait que retarder l'épuisement

- En contexte de croissance, le recyclage n'induit qu'un « décalage dans le temps »
- Hypothèses :
 - Taux de croissance annuelle de la consommation constant de 4 %
 - Taux de recyclage des produits en fin de vie (EOL-RR) de 80 % ;
 - Temps de séjour du métal dans l'économie de 10 ans.
- Description : La courbe pleine représente l'évolution de la consommation mondiale d'un métal. Cette consommation représente 100 unités équivalentes pour l'année 1, et 500 unités pour l'année 41. En l'absence de recyclage, la totalité du métal provient des ressources primaires, la production primaire coïncide donc avec la courbe pleine. En cas de recyclage, seule une partie du métal provient des ressources primaires (le reste de la consommation étant pourvue par le métal recyclé), la production primaire correspond alors à la courbe en pointillés.
- Étant donné que la consommation mondiale augmente chaque année de 4 %, la part de la production qui provient des ressources primaires augmente également chaque année de 4 %, même si la quantité de métal recyclé croît, elle aussi, de façon exponentielle (flèches grises descendantes entre les deux courbes). Ainsi, au bout de 20 ans, la production primaire en cas de recyclage (PPrecy) (courbe en pointillés) correspond à 100 unités, alors qu'elle s'élèverait à un peu plus de 200 unités en l'absence de recyclage (PPbrut) (courbe pleine). Autrement dit, la PPrecy pour l'année 20 est égale à la PPbrut pour l'année 1. De même, au bout de 60 ans, la production primaire en cas de recyclage (PPrecy) (courbe en pointillés) correspond à 500 unités, alors qu'elle s'élèverait à plus de 1 000 unités en l'absence de recyclage (PPbrut) (courbe pleine). Autrement dit, la PPrecy pour l'année 60 est égale à la PPbrut pour l'année 41.
- Conclusion : Au regard de ces hypothèses, l'épuisement des ressources primaires n'est retardé que de 20 ans, même si la quantité recyclée augmente exponentiellement (ex : en année 40, la quantité de métal recyclé est 5 fois plus élevée que celle en année 1).



https://www.systext.org/sites/all/documents/RP_SystExt_Controverses-Mine_VOLET-2_Tome-3_Avril2024.pdf page 164

Un numérique d'une physique *politique* du berceau...

- ❑ **La République démocratique du Congo et le colombo-tantalite (coltan)**
 - ❑ **Dont on extrait le Tantale (Ta)**
 - ❑ **Très bon conducteur électrique/chaleur**
 - ❑ **Utilisé dans les condensateurs et à 80% en électronique**
 - ❑ **Possède 60% des réserve mondiales**
 - ❑ **2019 : produit 40% de l'offre mondiale**
 - ❑ **Zone d'importants conflits**
 - ❑ 30 ans de guerre
 - ❑ 7 millions de déplacés (données ONU)
 - ❑ + de 10 000 morts



Une mine de coltan exploitée par Société minière de Bisunzu (SMB), près de Rubaya, dans l'est de la République démocratique du Congo, en août 2019. BAZ RATNER / REUTERS - in [Le Monde 29/08/2024](#) consulté le 3/11/2024

...au tombeau

❑ Décharge d'Agbogbloshie (Accra, Ghana)



https://www.francetvinfo.fr/monde/afrique/societe-africaine/la-decharge-de-dechets-electroniques-dagbogbloshie-veritable-defi-economique-et-environnemental-pour-le-ghana_3863287.html - photo MUNTAKA CHASANT/SOLENT NE/SIPA

...au tombeau

❑ Circulation des DEEE

- ❑ 2019 : 53Mt DEEE
- ❑ Croissance 2Mt / an
- ❑ 17% gérés correctement
- ❑ Quid des 83% ?

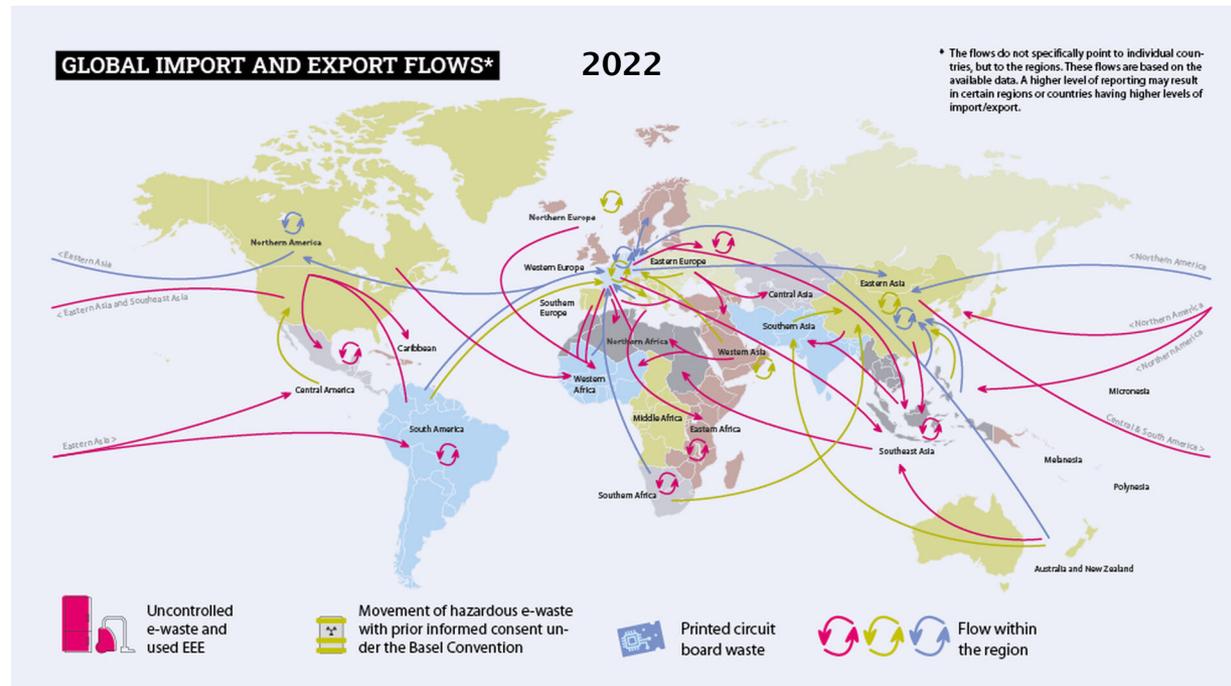
❑ Circulation des DEEE

- ❑ Du nord vers le sud
- ❑ 10% passe les frontières

❑ Secteur informel

- ❑ 13M de femmes
- ❑ 19M d'enfants (age >=5)

- ❑ La pollution/destruction **n'est pas une externalité négative mais les conditions de possibilités d'un numérique à « bas coûts »**



<https://waste-management-world.com/materials/global-e-waste-flows-monitor/>

Conclusion partielle

❑ Un numérique au stade infantile

- ❑ Qui s'est construit sans limite
- ❑ Qui a un impact spatial/environnemental/politique important
- ❑ Qui est devenu pervasif
- ❑ Qui cristallise tous les (dys-)fonctionnements du modèle capitaliste

3 Numérique et système Terre

Sur une idée de D. Trystram et Y. Malot (UGA)

L'impact du numérique n'est pas que le CO2

- ❑ Une analyse de cycle de vie considère de nombreux impacts (Cf. la méthodologie ReCiPe 2016 midpoint (H) – 17 catégories)

Impact category	Abbreviations	Unit
Global warming	GW	kg CO ₂ eq
Stratospheric ozone depletion	SOD	kg CFC11 eq
Ionizing radiation	IR	kg Co-60 eq
Ozone formation, Human health	OF	kg NO _x eq
Fine particulate matter formation	FPMF	kg PM _{2.5} eq
Terrestrial acidification	TA	kg SO ₂ eq
Freshwater eutrophication	FEut	kg P eq
Marine eutrophication	MEut	kg N-Eq
Terrestrial ecotoxicity	TE	kg 1,4-DCB eq
Freshwater ecotoxicity	FE	kg 1,4-DCB eq
Marine ecotoxicity	ME	kg 1,4-DCB eq
Human carcinogenic toxicity	HCT	kg 1,4-DCB eq
Human non-carcinogenic toxicity	HNCT	kg 1,4-DCB eq
Land use	LU	m ² a crop eq
Mineral resource scarcity	MRS	kg Cu eq
Fossil resource scarcity	FRS	kg oil eq
Water consumption	WC	m ³

Rappel : Impact important du numérique (direct)

❑ Contribution aux émissions de CO2

❑ Environ 4% des émissions

- ❑ LeanICT 2018 : le secteur représente de l'ordre de 5-6% de l'énergie primaire mondiale
Freitag et al., en 2021, estiment entre 2.1 et 3.9% d'émissions d'équivalent CO2

❑ Croissance annuelle de 6-9% (sur la période 2015-2019)

- ❑ Et cela avant l'avènement de



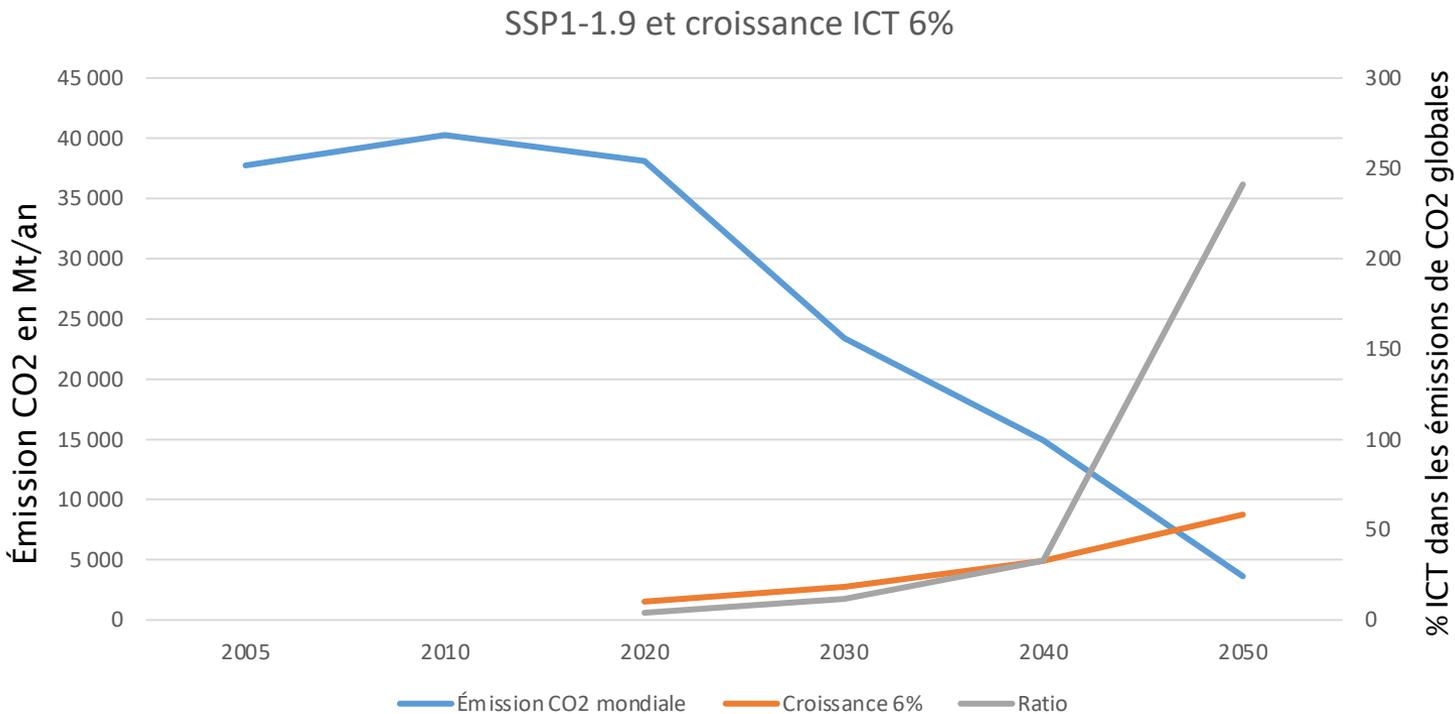
(2020)

- ❑ Est-ce compatible avec les trajectoires de réductions ?

Et le numérique dans tout ça ?

Analyse proposée par D. Trystram & Y. Malot (UGA)

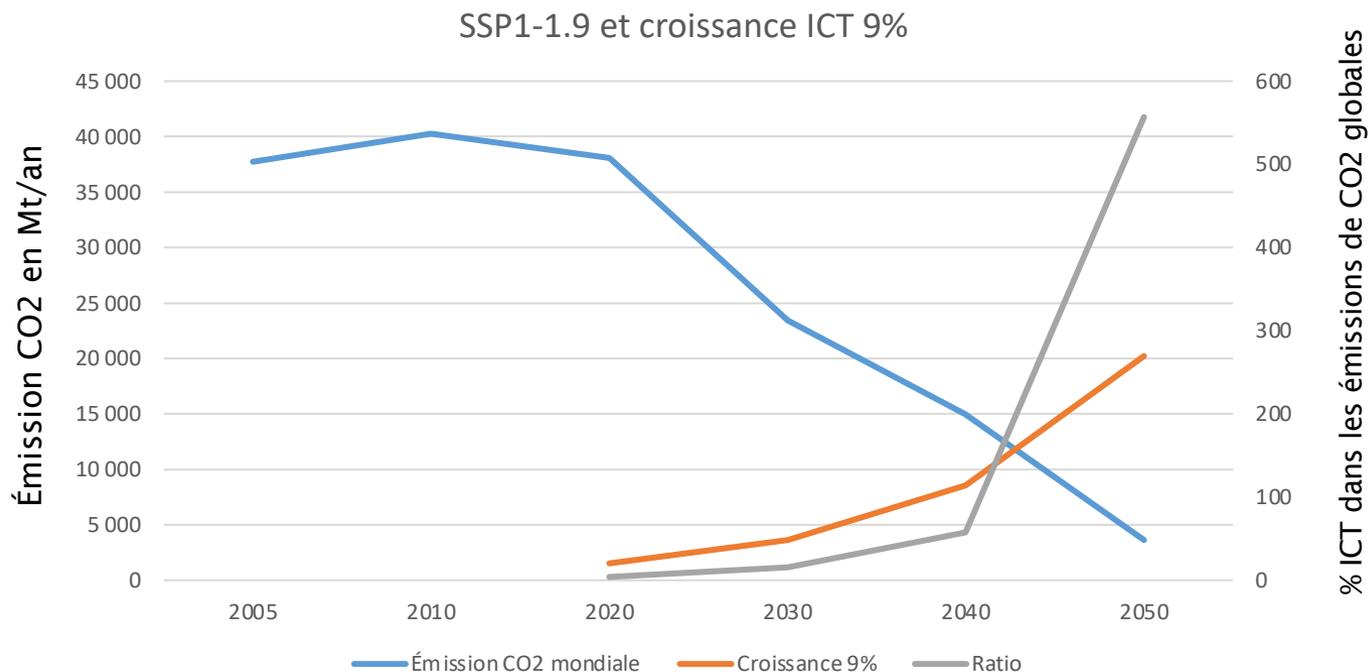
❑ Scénario SSP1-1.9 et croissance ICT minimale (6%)



Et le numérique dans tout ça ?

Analyse proposée par D. Trystram & Y. Malot (UGA)

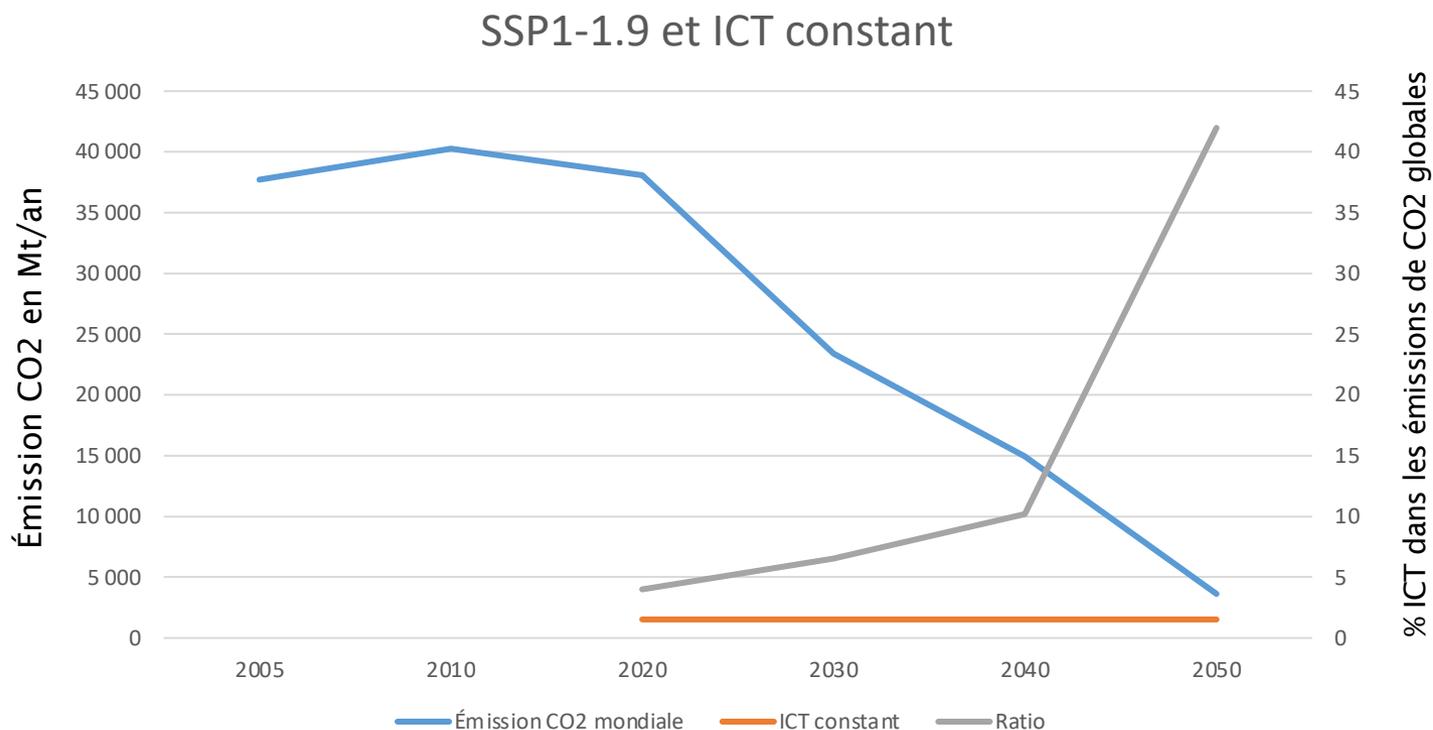
❑ Scénario SSP1-1.9 et croissance ICT limite haute (9%)



Et le numérique dans tout ça ?

Analyse proposée par D. Trystram & Y. Malot (UGA)

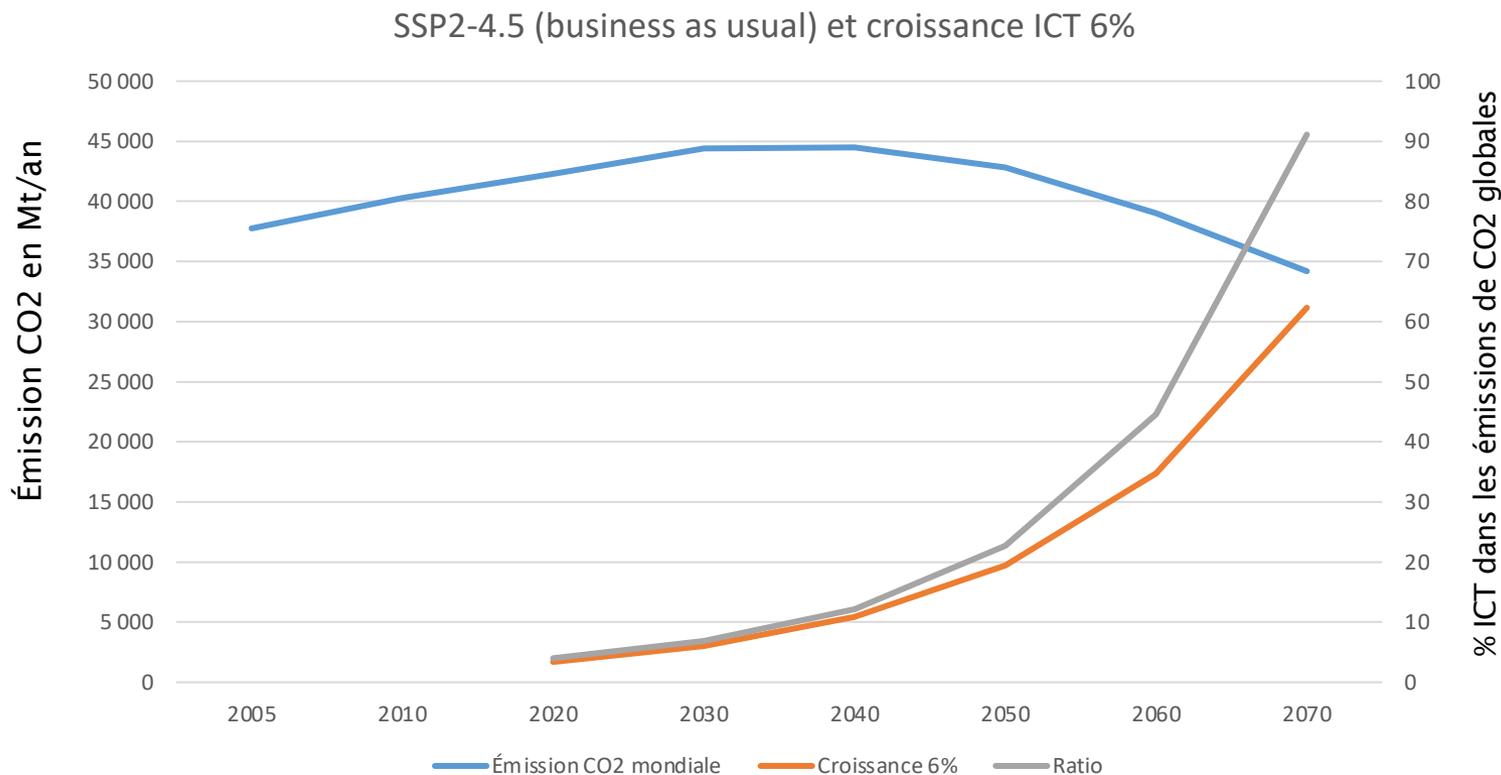
❑ Scénario SSP1-1.9 et ICT constant



Et le numérique dans tout ça ?

Analyse proposée par D. Trystram & Y. Malot (UGA)

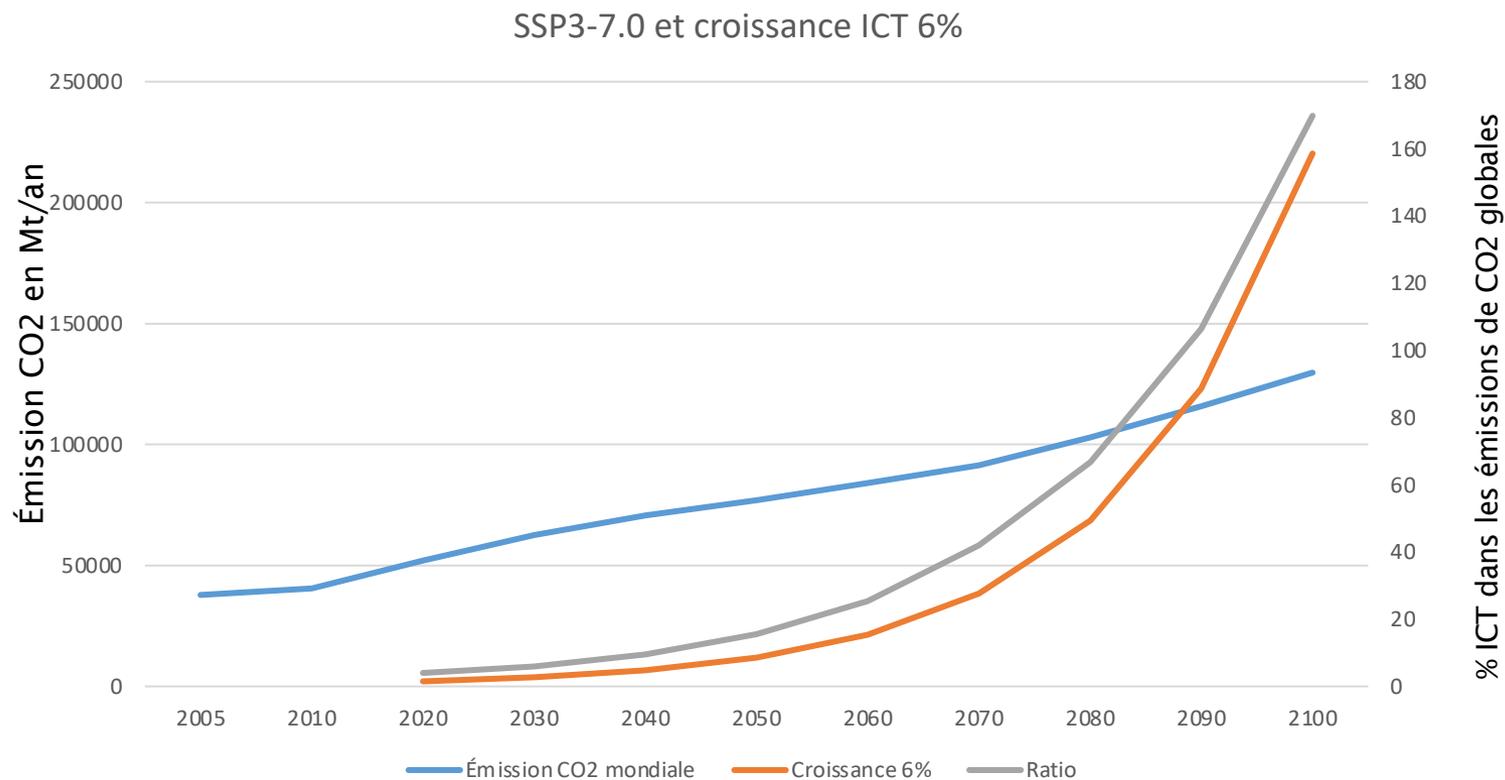
❑ Scénario SSP2-4.5 et croissance ICT 6%



Et le numérique dans tout ça ?

Analyse proposée par D. Trystram & Y. Malot (UGA)

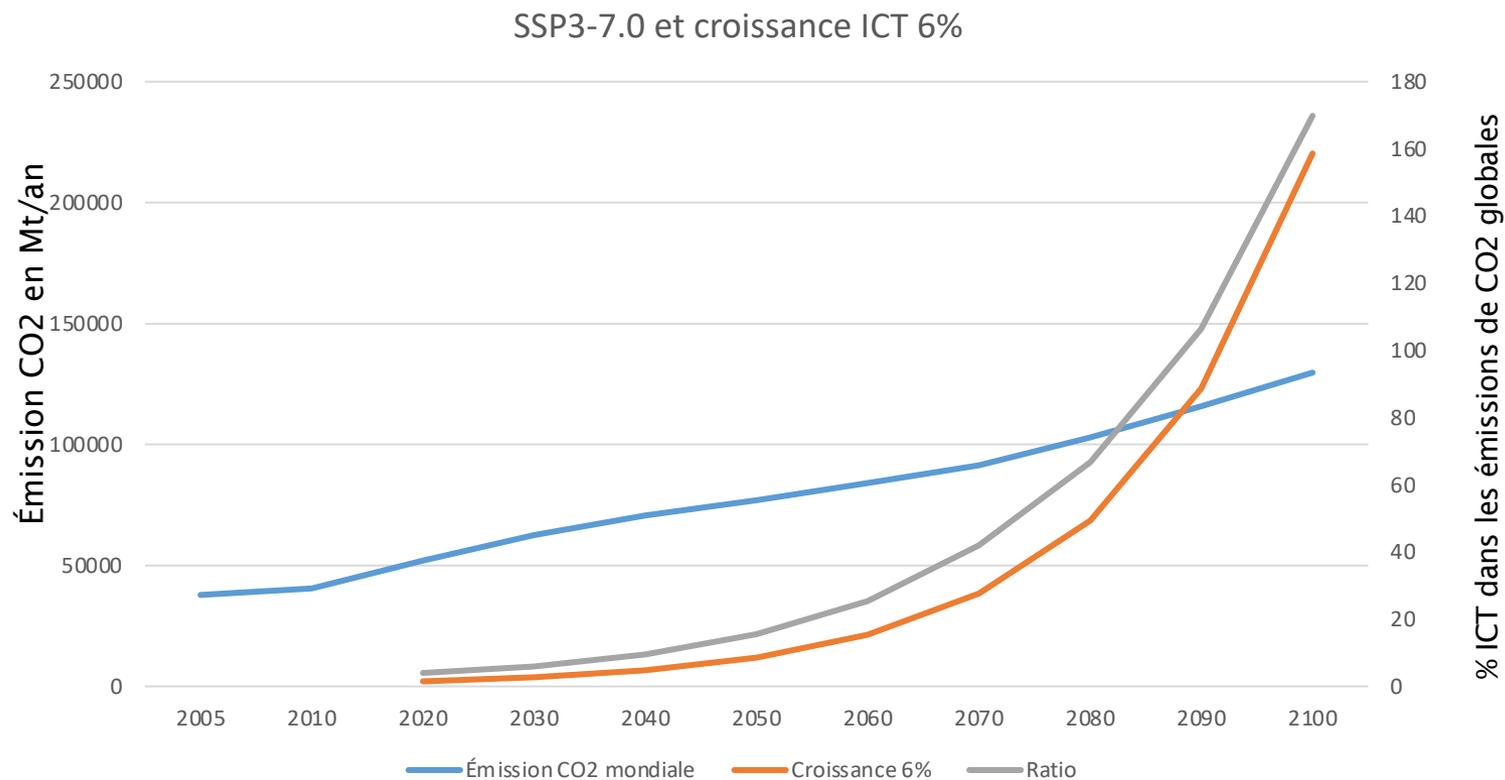
❑ Scénario SSP3-7 et croissance ICT 6%



Conclusion (partielle)

Analyse proposée par D. Trystram & Y. Malot (UGA)

❑ Scénario SSP3-7 et croissance ICT 6%



Conclusion partielle

❑ Un numérique

- ❑ Sans *limite à la croissance* (alors que depuis 1972...)
- ❑ Incompatible avec la nécessaire réduction des émissions

4 Que faire ?

Questions brûlantes pour se mettre en mouvement

Frontières planétaires et système technique

- ❑ **Le dépassement des frontières planétaires**
 - ❑ Nous place dans une *zone d'incertitude*
 - ❑ Caractérisée par d'*importantes fluctuations*

Frontières planétaires et système technique

- ❑ **Le dépassement des frontières planétaires**
 - ❑ Nous place dans une *zone d'incertitude*
 - ❑ Caractérisée par d'*importantes fluctuations*

- ❑ **Quelles conséquence sur nos systèmes techniques ?**
 - ❑ Les systèmes techniques se sont focalisés sur les *gains d'efficience*
 - ❑ Or « [...] efficacité et efficience sont les instruments d'une optimisation qui nous enferme dans une voie étriquée, et donc inadéquate si tout change tout le temps » (O. Hamant – Antidote au culte de la performance – 2023)
 - ❑ Il faut dorénavant privilégier la *robustesse et l'adaptabilité*

Frontières planétaires et système technique

- ❑ Le dépassement des frontières planétaires
- ❑ Quelles conséquence sur nos systèmes techniques ?
- ❑ Le numérique un *commun négatif* et une *technologie zombie*
[Héritage et fermeture - E. Bonnet, D. Landivar et A. Monnin - Divergences - 2021]
[Technologie zombie - J. Halloy - [dialogue avec N. Nova](#)]
 - ❑ Auquel nous sommes liés
 - ❑ Qui nous lie
 - ❑ Dont on doit gérer collectivement l'héritage (et la fermeture)
 - ❑ Que l'on *doit* enseigner (?)

La métaphore du vivant

❑ O. Hamant nous dit que la robustesse du vivant résulte de

- ❑ Hétérogénéité
- ❑ Processus aléatoires
- ❑ Lenteurs
- ❑ Délais
- ❑ Redondances
- ❑ Incohérences
- ❑ Erreurs
- ❑ Inachèvement
- ❑ Sous-optimalité

- ❑ *Localité + interactions [moi]*
- ❑ *Émergence [moi]*

❑ Exemple paradigmatique : la photosynthèse

- ❑ Apparu il y a 3,8B d'années
- ❑ Rendement < 1% (et donc gâche 99% de l'énergie solaire)

Frontières planétaires et systèmes techniques

- ❑ Le dépassement des frontières planétaires
- ❑ Quelles conséquences sur nos systèmes techniques ?
 - ❑ Les systèmes techniques se sont focalisés sur les gains d'efficacité
 - ❑ Or « [...] efficacité et efficacité sont les instruments d'une optimisation qui nous enferme dans une voie étreinte, et donc inadéquate si tout change tout le temps » (O. Hamant - Antidote au culte de la performance - 2023)
 - ❑ Il faut dorénavant privilégier la *robustesse* et l'*adaptabilité*
- ❑ Et pour le numérique (quelque chose à la **PPSN**) ?

Un numérique pris au piège

❑ Un double effet qui se combine

- ❑ Une croissance du numérique incompatible avec la nécessaire réduction
- ❑ Un dépassement des frontières planétaires source de fluctuations

❑ Combiner robustesse et réduction

- ❑ En introduisant des (1) limites et (2) une économie de ressources
- ❑ En considérant un système numérique comme un (3) système dynamique
- ❑ En construisant une robustesse par redondance, auto-adaptabilité et (2) simplicité

Introduire des limites (1)

❑ Réintroduire des limites

❑ Temps

- ❑ Circulation des données contraintes par une ressource extérieure (disponibilité de l'énergie par panneaux solaires par exemple)

❑ Espace

- ❑ Relocalisation des services (Wifi en mesh local, hiérarchie d'accès aux données...)

❑ Discontinuité

- ❑ Fonctionnement par intermittence (contraint par une ressource)

❑ Calcul

- ❑ Peut-on/Doit-on tout calculer ? Ralentir les calculs ? Pré-traiter et stocker ce qui a déjà été calculé ?

❑ Ressource

- ❑ Penser en terme de *stocks* (finis) et non plus de *flux* (infinis)

Introduire des limites (1)

❑ Réintroduire des limites

❑ Disponibilité

- ❑ Un service doit-il toujours être disponible ? Qui décide ? Comment ?

❑ Accélération

- ❑ Comment ralentir les échanges ? Quelles conséquences ?

❑ Exhaustivité

- ❑ Que signifie dé-numériser (de gré ou de force) ? Comment fonctionner quand une infrastructure est indisponible (piratage/hack - [Université Paris-Saclay](#) en 2024, [Hôpital CH Sud Francilien](#) en 2022- ...)

❑ Politique

- ❑ Comment délibère-t-on ? Si `Code is law` / `Law is code` : requiert un contrôle public du code

❑ Et quid de l'effet rebond (*direct et indirect*)?

Introduire des limites (1)

- ❑ Réintroduire des limites
- ❑ Réfléchir en terme de systèmes *non-extensibles* (mais plutôt *contractibles*) et identifier les *anti-limites*
- ❑ Considérer des contraintes :
 - {*intermittence, quotas, stocks*}
 - X
 - {*énergie, communication, mémoire, calcul*}
- ❑ Expérimenter des fonctionnements alternatifs (langages/os/énergie/communication) et des ressources matérielles disponibles

Introduire des limites (1)

- ❑ Une communauté existante : computingwithinlimits.org



- ❑ Une communauté à construire : undonecs.sciencesconf.org



Simplicité et économie de ressources (2)

- ❑ **Considérer une approche qui utilise les ressources disponibles**
 - ❑ L'université comme mine urbaine (serveur, matériel actif, smartphone...)
 - ❑ Calculer avec des déchets (DEEE)

Simplicité et économie de ressources (2)

❑ Considérer une approche qui utilise les ressources disponibles

- ❑ L'université comme mine urbaine
- ❑ Calculer avec des déchets (DEEE)

❑ Proche de la notion de *low-tech*

❑ Durabilité

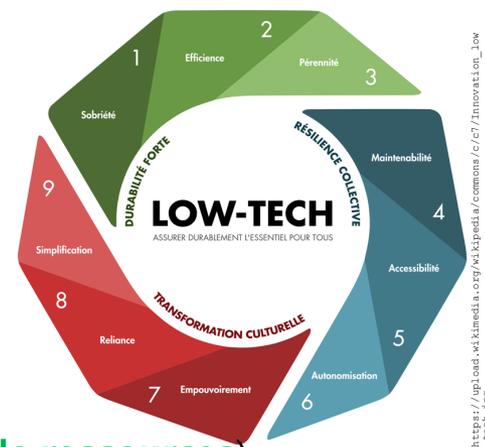
- ❑ Pérenne (et standardisation / modularisation)
- ❑ Faible impact environnemental (**réduction de la consommation de ressources**)

❑ Peu mobilisateur en ressources

- ❑ Suppression des fonctionnalités non nécessaires
- ❑ Usage des ressources abondantes localement

❑ Autonomisation

- ❑ Autonomie d'usage
- ❑ **Réduction des interdépendances**



Simplicité et économie de ressources (2)

❑ Considérer une approche qui utilise les ressources disponibles

- ❑ L'université comme mine urbaine
- ❑ Calculer avec des déchets (DEEE)

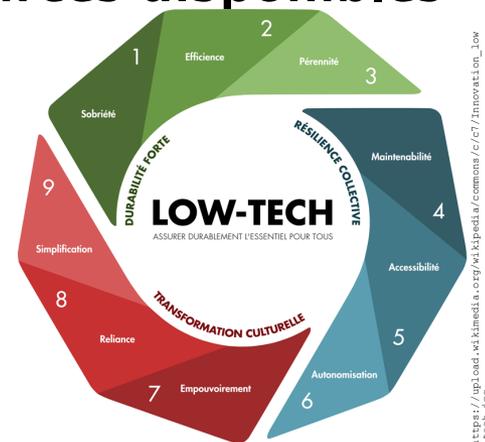
❑ Proche de la notion de *low-tech*

❑ Localité

- ❑ Réduction de la pression sur les ressources (transports / autonomie / ...)

❑ Accessibilité

- ❑ Compréhensibilité (réappropriation individuelle et collective)
- ❑ Simplicité (toute la chaîne - nécessaire pour être résilient, **robuste** et accessible)
- ❑ *Empowerment* des usagers (être acteur de la conception et de l'utilisation)
- ❑ Sophistication (passe de l'objet aux acteurs et à leur démarche)
- ❑ **Accessibilité financière** (facilite le déploiement - effets de réseaux - **longévité accrue**)



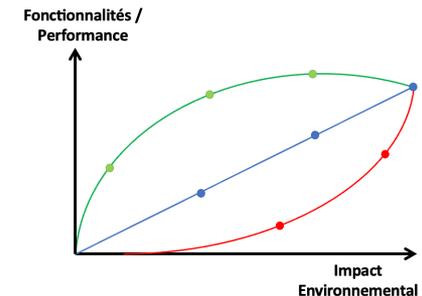
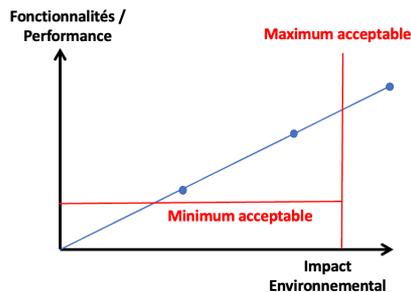
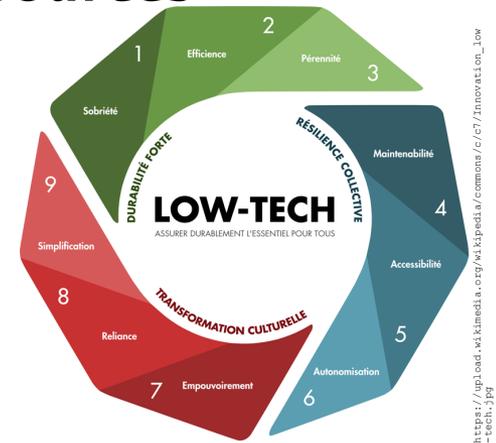
Simplicité et économie de ressources (2)

❑ Considérer une approche qui utilise les ressources disponibles

- ❑ L'université comme mine urbaine
- ❑ Calculer avec des déchets (DEEE)

❑ Proche de la notion de *low-tech*

❑ Promouvoir une innovation par *retrait* et non par *ajout* : *innovation soustractive* : projet SIRIUS



Simplicité et économie de ressources (2)

❑ Décentrer le point de vue – un exemple concret

❑ Loi : « Pour avoir un programme performant robuste, il faut une architecture matérielle peu puissante »

❑ Un exemple paradigmatique : la mission Apollo 11 (21/07/1969)

❑ Apollo Guidance Computer

❑ 72 Ko (36k mots de 16 bits) de ROM (prog. + OS)

❑ 4ko (2k mots de 16 bits) de RAM

❑ Fréquence : 85 kHz

❑ Consommation : 55 W / 32 kg

❑ Logique : 2800 portes doubles-NOR-3

❑ Code source : <https://github.com/chrislgarry/Apollo-11/>



https://fr.wikipedia.org/wiki/Apollo_11#/media/Fichier:Dsky.jpg

Simplicité et économie de ressources (2)

❑ Décentrer le point de vue – un exemple concret

❑ Loi : « Pour avoir un programme performant robuste, il faut une architecture matérielle peu puissante »

❑ Un exemple paradigmatique : la mission Apollo 11 (21/07/1969)

❑ Apollo Guidance Computer

❑ 72 Ko ROM / 4ko RAM / 85 kHz / 5600 portes NOR-3

❑ Apple iPhone 1 (2007)

❑ 128 Mo RAM

❑ 4, 8 ou 16 Go de mémoire flash de stockage

❑ CPU ARM RISC @ 620 MHz

❑ Environ 50M transistors
(en 2024 : 10B à 50B de transistors)

❑ Ratios

❑ 32 000 (RAM)

❑ Ratio 8900 (transistors)



https://fr.wikipedia.org/wiki/Apollo_11#/media/Fichier:Dsky.JPG



[https://en.wikipedia.org/wiki/Apple_Phone_\(1st_generation\)#cite_note-e-Processor-4](https://en.wikipedia.org/wiki/Apple_Phone_(1st_generation)#cite_note-e-Processor-4)

Simplicité et économie de ressources (2)

□ Décentrer le point de vue – un exemple concret

□ Loi : « Pour avoir un programme performant robuste, il faut une architecture matérielle peu puissante »

□ Un exemple paradigmatique : la mission Apollo 11 (21/07/1969)

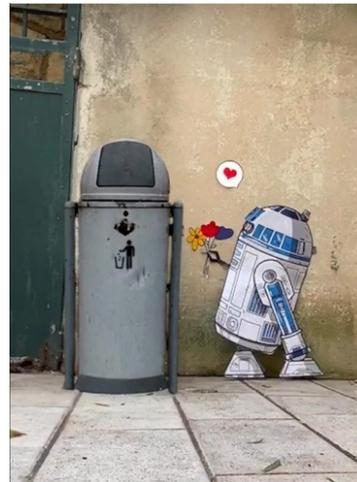
□ Apollo Guidance Computer

□ Apple iPhone 1 (2007)

□ Calculer avec des déchets



Avec E. Frenkiel (LIPHA)
& IEP Fontainebleau



[https://en.wikipedia.org/wiki/Iphone_\(1st_generation\)#cite_note-e-Processor-4](https://en.wikipedia.org/wiki/Iphone_(1st_generation)#cite_note-e-Processor-4)



https://fr.wikipedia.org/wiki/Apollo_11#/media/Fichier:Dsky.JPG

Simplicité et économie de ressources (2)

- ❑ Décentrer le point de vue – un exemple concret
 - ❑ Loi : « Pour avoir un programme performant robuste, il faut une architecture matérielle peu puissante »
 - ❑ Un exemple paradigmatique : la mission Apollo 11 (21/07/1969)
 - ❑ Calculer avec des déchets – collecte lors de la SERD 16-24 novembre



COLLECTE DE SMARTPHONES

Mardi 19 novembre - 9h à 13h – Site St Simon

Simplicité et économie de ressources (2)

❑ Décentrer le point de vue



secret

❑ Calculer avec des outils low Tech lab numérique de l'UPEC

du mardi 16-24 novembre

COLLECTE DE SMARTPHONES

Mardi 19 novembre - 9h à 13h – Site St Simon

Constat

- 6 limites planétaires sur 9 sont dépassées
- 4% des GES dues au numérique
- 75% de l'impact du numérique à la fabrication
- entre 6 et 9% de croissance du secteur par an



Pour tenir les engagements de la COP-21 on doit complètement changer notre usage des matériels informatiques (le recyclage reste trop marginal). Une solution, c'est de **prolonger** au maximum la **vie** de nos matériels.

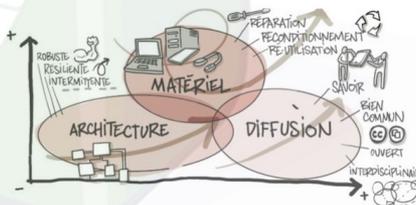
LIFE – Un projet de numérique low-tech

Le projet LIFE, lié au projet ERASME SlowTech, construit un **cluster** composé uniquement de **matériels usagés**. C'est du **low-tech** (localité, robustesse, déchet, ressources, énergie, ...) appliqué au numérique !

On récupère vos smartphones

Pour réaliser ce projet, nous **collectons des smartphones et des tablettes inutilisés**.

Des vieux smartphones qui traînent dans un tiroir ? Ils peuvent trouver une nouvelle vie avec LIFE !



Simplicité et économie de ressources (2)

- ❑ **Calculer avec des déchets : projet LIFE (Longévité Informatique et Frugalité Écologique)**
 - ❑ **Cadre théorique pour formaliser le fonctionnement asynchrone de ressources hétérogènes**
 - ❑ **Construction d'un cluster reposant sur la définition d'un framework unifiant l'hétérogénéité**
 - ❑ **Tester extensivement sur des cas concrets de SI (gestion de fichiers, mails, IA générative...)**
 - ❑ **Production d'indicateurs (de réduction) d'impacts environnementaux pour mesurer l'intérêt environnemental de l'approche proposée.**
 - ❑ **Documentation des étapes, tutoriels, structuration communauté de l'ESR aux principes des low-tech**
 - ❑ **Outils classiques (Ansible, Kubernetes, Grafana, Ceph, Proxmox VE...) pour de l'*hyperscale* low-tech (!)**



Le numérique comme système dynamique (3)

❑ Un système logiciel

- ❑ Spécifié globalement à partir de directives de haut-niveau
- ❑ Calculant localement permettant la robustesse
- ❑ Disposant de senseurs, d'effecteurs et de boucles de rétroactions

❑ Construit en prenant en compte les anti-limites

- ❑ Ressources statiques et limités
- ❑ Sans contrôle global (localité)
- ❑ Développé dans un langage de haut-niveau, simple

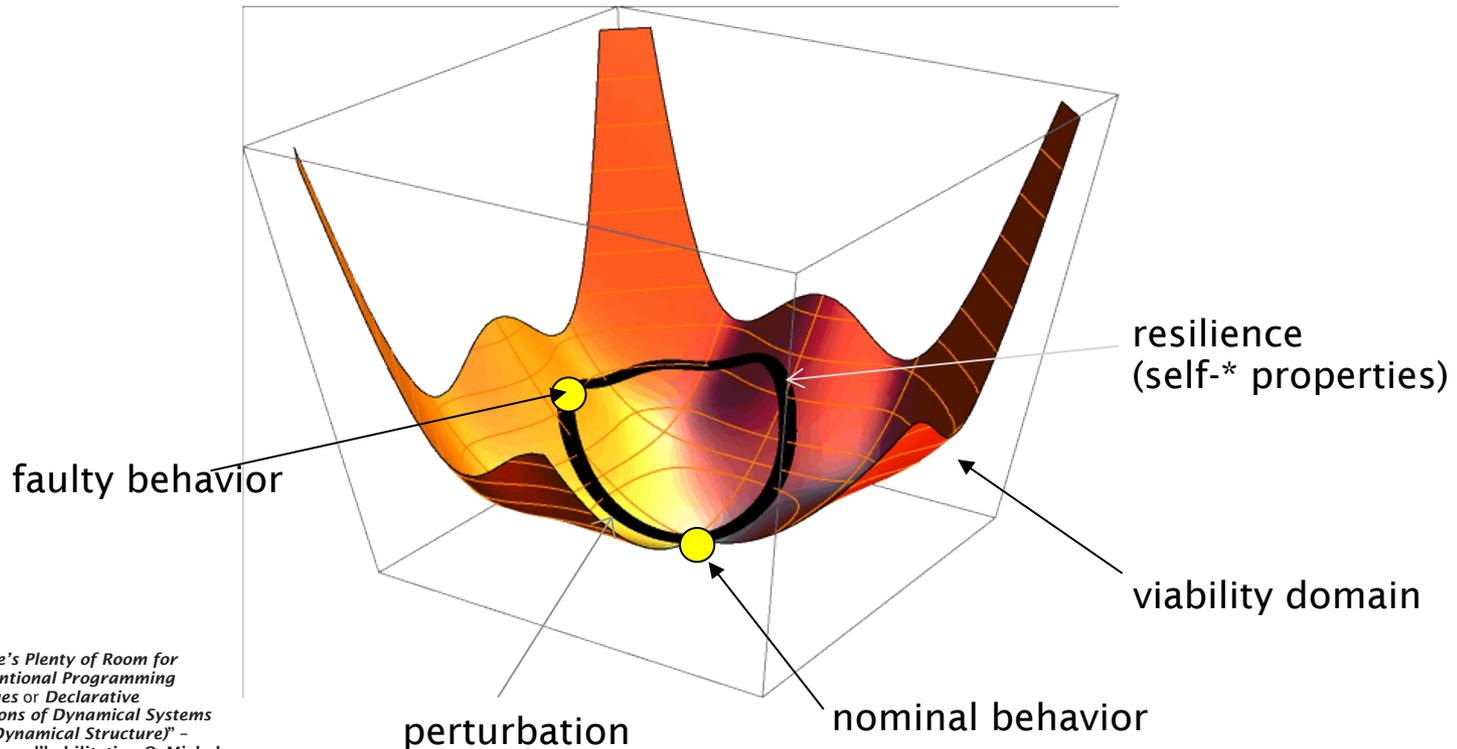
❑ Dont le fonctionnement est l'émergence de la coopération locale (*à la multi-agents*)

Le numérique comme système dynamique (3)

Système logiciel = système dynamique

Fonctionnement nominal = état stable

Auto-* = retour à l'état stable après perturbation



In "There's Plenty of Room for Unconventional Programming Languages or Declarative Simulations of Dynamical Systems (with a Dynamical Structure)" - soutenance d'habilitation O. Michel - 2007

5 Conclusion



<https://www.upec.fr/fr/universite/actualites/lupec-participe-a-la-biannuelle-aurora-a-naples>

Aurora a réaffirmé son engagement en faveur du développement durable, avec la signature du plan commun de réduction de l'emprunte carbone, signé par les présidentes et présidents des universités membres. L'UPEC a souhaité appuyer sa volonté de s'inscrire dans cet engagement commun, essentiel, pour rendre nos campus plus durables.

Le numérique, maladie infantile du capitalisme ?

❑ Playdoyer pour des travaux...

- ❑ ...qui prennent la notion de limite au sérieux
- ❑ ...qui n'aggravent pas le dépassement de frontières planétaires

- ❑ ...qui explorent des trajectoires négligées
- ❑ ...qui privilégient la robustesse sur la performance
- ❑ ...qui changent le point de vue sur les déchets
- ❑ ...qui interrogent nos imaginaires, nos façons de vivre et travailler
- ❑ ...qui politise ce système sociotechnique, un *commun négatif*

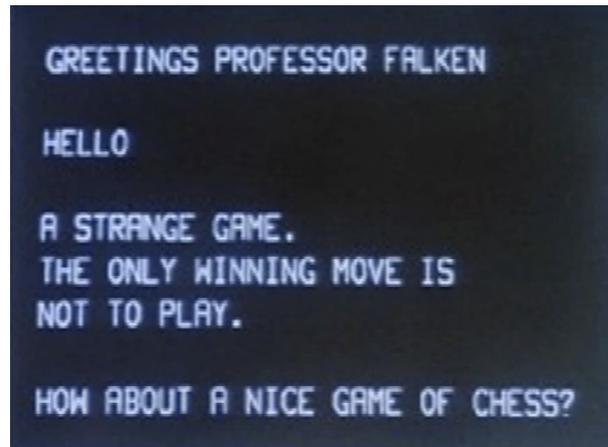


<https://computingwithinlimits.org/2024/>



Le numérique, maladie infantile du capitalisme ?

- ❑ Playdoyer pour des travaux...
- ❑ Le mot de la fin à l'IA sur le numérique



WarGames - 1983

❑ Lectures

Günter Anders - L'obsolescence de l'homme - 1956

Ivan Illich - La convivialité - 1973



<https://computingwithinlimits.org/2024/>

