

CORES/ALGOTEL 2024

Numérique et environnement

Philippe Ciblat

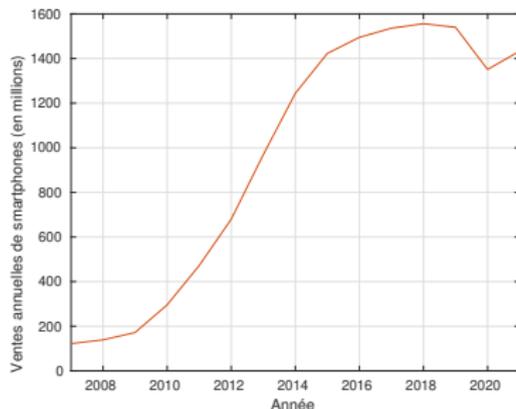
Télécom Paris, Institut Polytechnique de Paris



1. Quelques chiffres
2. Numérique et matériaux
3. Quelques exemples
 - Effet rebond: paradoxe de Jevons
 - Effet de levier: externalités positives
 - Cas d'études
 - ↪ Domaine: agriculture connectée
 - ↪ Mode de travail: télétravail
 - ↪ Mode de travail: congrès virtuel
 - ↪ Technique: 5G

Section 1 : Quelques chiffres

Chiffres sur les équipements terminaux



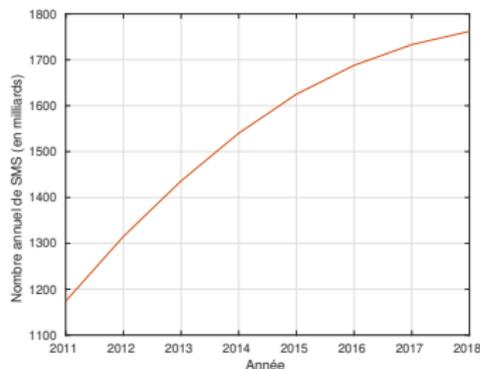
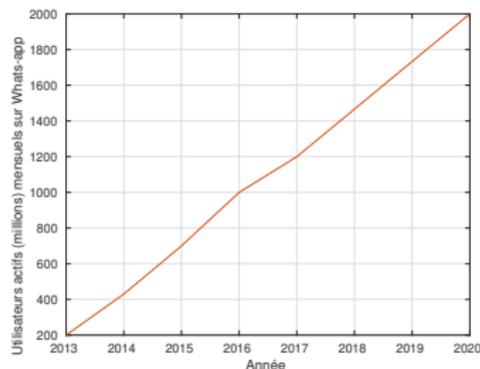
Ventes en millions par an de smartphones

Téléphonie dans le Monde

- 67% (tous âges) possèdent un téléphone mobile
- +2% en 1 an (hausse population: 1.1%)

source : Statista2022 et WeAreSocial (Ericsson)

Chiffres sur le trafic échangé

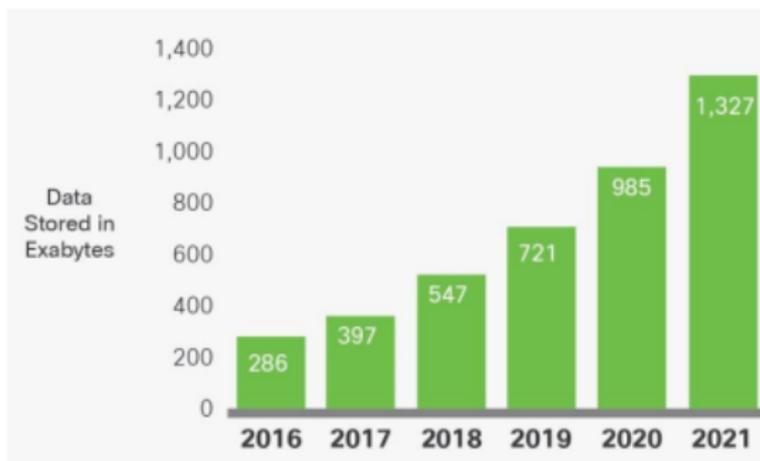


Gauche : Nombre mensuel d'utilisateurs actifs à Whatsapp
Droite : Nombre annuel de SMS

Pas de remplacement d'application mais accumulation des outils

source : Statista2022

Chiffres sur le stockage



Croissance exponentielle alimentée par la « Science des données »

source : Cisco GCI white paper, 2022

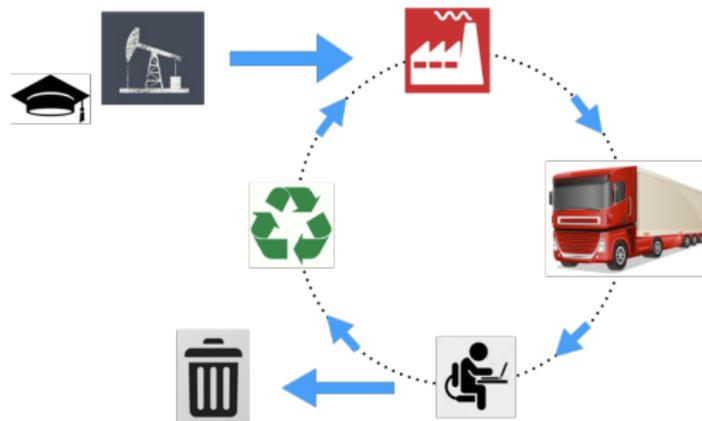
Emissions de GES (CO₂eq) du numérique

~ 4% des émissions mondiales

Techniques de mesure (en général et notamment les entreprises):

- *Activity-based*: on regarde les sources de création de CO₂
 - Consommation et fabrication
 - Scopes:
 - 1- directe (émission sur site et produite sur site)
 - 2- indirecte (émission sur site et produite hors site)
 - 3- induite (émission par le client ou le fournisseur)
- *Spend-based*: on compte les € et ce marqueur/*proxy* se traduit en CO₂eq
- Adaptation au numérique:
 - carbone évité (référence bouge avec le temps et calcul hypothétique) → éloge de la promesse
 - effet rebond très fort (quantité bouge avec le temps)
 - proxy fin difficile à trouver

Analyse du cycle de vie

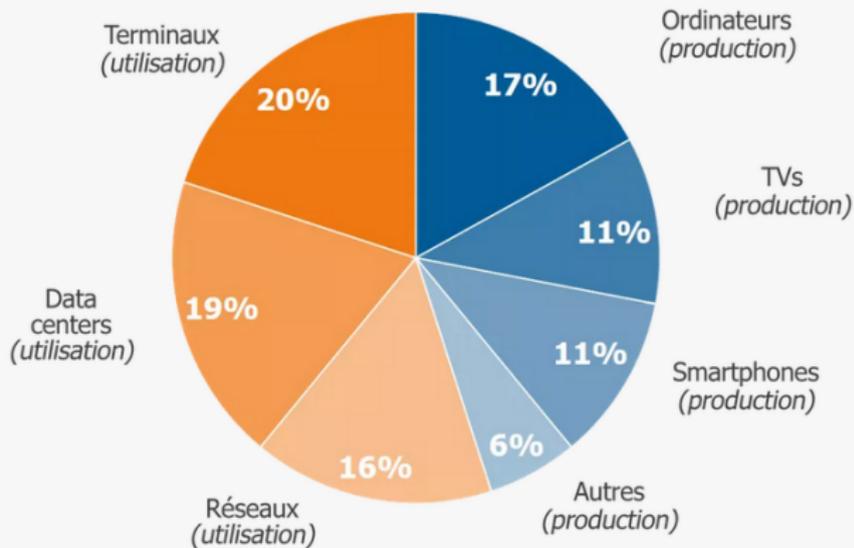


Conception

- matières premières → fabrication → transport-distribution
- utilisation
- valorisation et/ou fin de vie

L'utilisation n'est pas forcément la plus grande part !
Cela dépend de l'objet étudié

Répartition entre utilisation et fabrication



Distribution de la consommation énergétique du numérique par poste pour la **production (45 %) et l'**utilisation** (55 %) en 2017**

[Source : Lean ICT, *The Shift Project* 2018]

- Solution 1: *GreenIT*

$$\text{Efficacité énergétique} = \frac{\text{métrique de performances}}{\text{énergie consommée}}$$

- objectif relatif (moins de GES par unité)
 - effet rebond (nombre d'unités augmente)
 - réponses techniques pas suffisantes à elles seules pour résoudre le problème
- Solution 2: *IT for Green*
 - objectif transféré (moins de GES ailleurs)
 - effet de levier (externalités positives)
 - transfert de l'efficacité énergétique, donc réponses techniques pas suffisantes à elles seules pour résoudre le problème
 - Solution 3: Sobriété
 - la puissance consommée est pré-définie
 - évite l'effet rebond et assure l'effet de levier

Efficacité joue sur l'optimisation, la sobriété sur le mode de vie

Section 2 : Numérique et matériaux

Dématérialisation ?

Le numérique, ...

- ce n'est pas virtuel
- et c'est plein de dispositifs matériels et donc de matériaux !
même l'intelligence artificielle

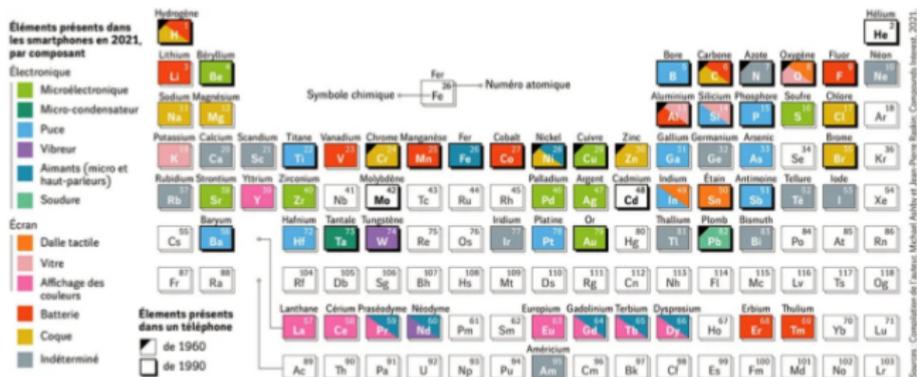


Quelques chiffres sur les centres de données (2020)

- 400TWh (nucléaire français ou 2% électricité mondiale)
- Problème \rightsquigarrow refroidissement ; Solution \rightsquigarrow **eau**
 - moins d'énergie mais biodiversité et partage d'usages
 - Power Usage Effectiveness (PUE) proche de 1.1 maintenant

Une lourde contribution minière pour la planète

Principaux métaux utilisés dans le Numérique

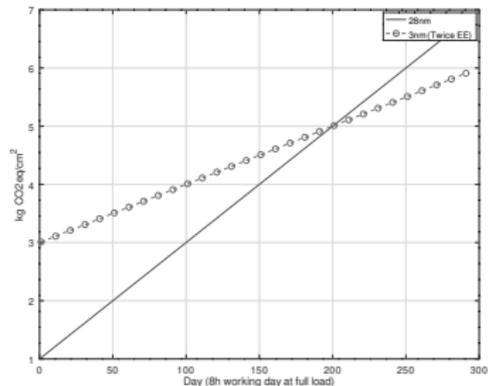
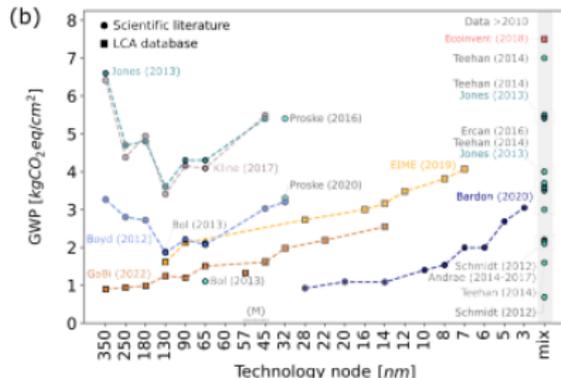


- Nokia (dumbphone - 2005) : 8kg CO₂eq (dont 4 d'usage)
- Iphone 8 (smartphone - 2017) : 60kg CO₂eq (dont 10 d'usage)

source: L. Hilty et al., "Sources of variation in life cycle assessments of smartphones and tablet computers", *Environmental Impact Assessment Review*, 2020 ; S. Andrae, "Life cycle assessments of consumer electronics - are they consistent?," *Int J Life Cycle Assess*, 2010

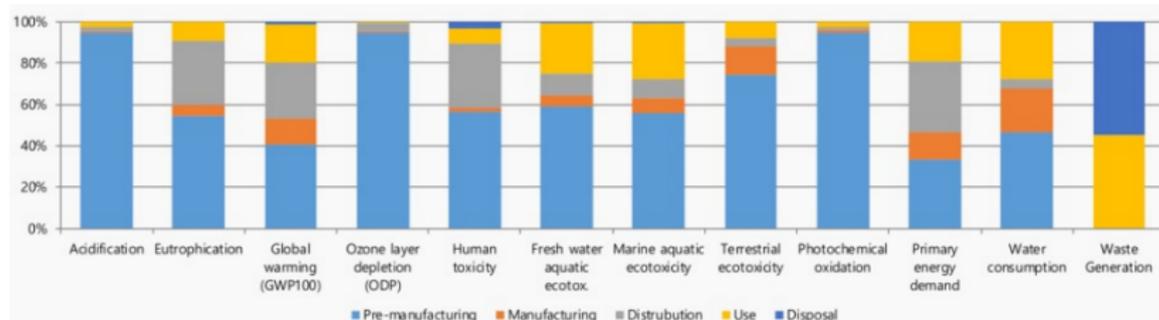
Coût énergétique de la fabrication

La **miniaturisation** permet de faire des circuits plus rapides et plus complexes pour la même dissipation thermique surfacique mais processus industriel plus consommateur d'énergie



source : T. Pirson et al., "The environmental footprint of IC production: review, analysis and lessons from historical trends," *IEEE Trans on Semiconductor Manufacturing*, 2023 ; S. Tannu and P. Nair, "The dirty secret of SSD: embodied carbon", preprint Arxiv, Jul. 2022

La pollution d'un téléphone portable



source : *Life Cycle Assessment for Mobile Products, Samsung, 2018*

Section 3 : Quelques exemples

Comment évaluer/mesurer tout cela ?

Exemple : requête sur Internet

mobilise un terminal (téléphone ou ordinateur), connexion sans fil 4G/Wifi, box Internet, routeurs/réseau, pare-feu, serveurs dans un gros centre de données,

Des difficultés structurelles

- Modèles complexes (multi-factoriel)
- Peu de données accessibles (concurrentiel)
- Si données, souvent trop agglomérées
- Si données, souvent trop optimistes (car constructeurs)
- Evolutions rapides des données

source : C. Freitag et al., "The real climate and transformative impact of ICT: a critique of estimates, trends, and regulations," Patterns, Sep. 2021

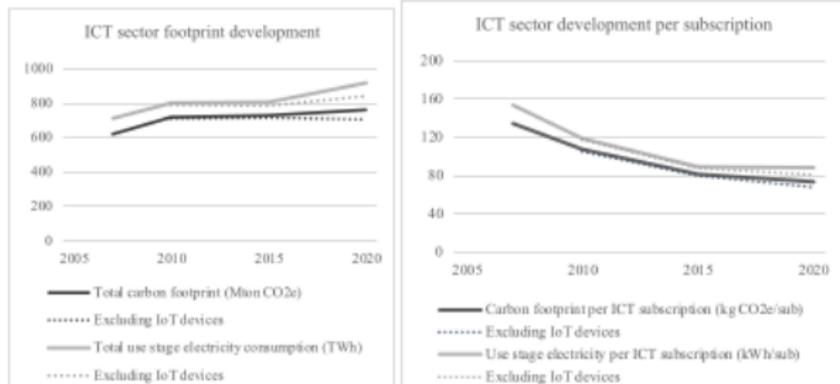
Il est compliqué d'estimer *précisément* le coût d'un courriel en terme de son impact CO₂.

Exemple (sans stockage ni ACV):

- [Aslan2018] – 6mgCO₂e pour un courriel de 1Mo
- [Ficher2021] (Ecoinfo) – 2mgCO₂e pour 1Mo (sur Renater)

mais avec stockage et ACV 20gCO₂e pour 1Mo [Ademe2011]

Evolution récente



- Uniquement réseau de communications (avec fabrication)
- Pas de loisir (TV)
- Centre de données: certains stockage et calcul

source : A. Andrae et T. Elder, "On the global electricity usage of communication technology: trends to 2030," *Challenges*, Juin 2015 ; J. Malmodin et al. , "ICT sector electricity consumption and greenhouse gas emissions - 2020 outcome," *Telecommunications policy*, Avril 2024

Effet rebond

- Une technologie s'améliore
- L'utilisation s'en retrouve augmentée

et finalement la consommation initiale est dépassée

Des exemples connus :

- Chemin de fer au XIXe siècle \rightsquigarrow développement du tourisme
- Isolation accrue \rightsquigarrow recherche du confort

Des exemples provenant du numérique :

- Amélioration de l'électronique et des batteries
 - Augmentation de l'usage du téléphone portable
 - Non-augmentation de l'autonomie des portables
- Amélioration des algorithmes d'apprentissage automatique
 - Augmentation du nombre d'applications les utilisant
 - Augmentation du volume de données traitées

Idée

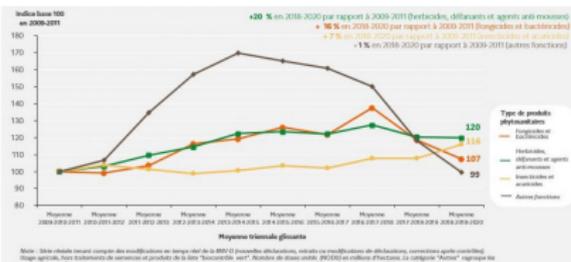
Grâce au numérique, d'autres secteurs vont diminuer (drastiquement) leur consommation énergétique

- études peu convaincantes avec gains assez faibles (8% pour la logistique du port de Livourne ; 8% pour le *World Economy Forum* ou 40% du chemin pour Netzero (*BMWK*))
- Hausse de productivité est une justification plus correcte. Cf. rapport de la commission IA du 13 mars 2024: « la France un pionnier de l'IA pour la planète en renforçant la transparence environnementale (?), la recherche dans des modèles à faible impact (*efficacité*), et son utilisation au service des transitions énergétiques et environnementales (*effet de levier*) »
- Notion controversée de l'*Environmental Kuznets Curve (EKC)*

source: *Klimaeffekte der Digitalisierung 2.0. Studie zur Abschätzung des Beitrags digitaler Technologien zum Klimaschutz in Deutschland*

Domaine: Agriculture numérique

- Agriculture intelligente/surveillée:
 - ↳ ferme d'aquaculture en Norvège souhaitant la 5G voire 6G
- Agriculture de pointe: géolocalisation, satellite, capteurs
 - ↳ baisse des intrants (engrais, eau): échec du plan Ecophyto



- Jumeau numérique de systèmes biologiques

source: <https://blog.spotifarm.fr> ; <http://www.ofb.gouv.fr>

Mode de travail (1) : télétravail

- Travaux ante-covid : exemple de la région londonienne
 - ↳ gain nul
 - ↳ loi de Zahavi: 1h par jour en moyenne
- Travaux post-covid : étude statistique de l'Ademe
 - ↳ gain de 200kg par an : 10km par jour
 - ↳ vélo a le même effet

source: B. Motte-Baumvol et al., "Does working from home reduce CO2 emissions? An analysis of travel patterns as dictated by workplaces", 2020 ; J. Almosni et al., "Quand le télétravail devient possible : analyse des impacts de la crise sanitaire sur les pratiques de mobilité", 2021 ; J. Bieser et al., "Next Generation mobile networks," 2020

Mode de travail (2) : congrès virtuel

- présentiel : 10.000km d'avion par personne
 - 150 personnes à 0km et 150 à 20.000km AR
- distanciel : visionnage de 80 vidéos par personne
 - 1 vidéo dure 20mn, 20 vidéos/j, 4j de congrès
- Présentiel: 249tCO₂eq
Rappel - AR Paris-NY par passager = 1tCO₂eq (12.000km)
- Distanciel: 6kgCO₂eq
24.000 fichiers de 45Mo (sans stockage ni ACV)

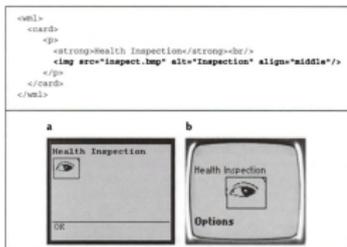
- Facteur 40.000 en faveur du distanciel
- Est-ce encore un congrès (réseautage inexistant) ?
- Objectif: baisse du transport aérien mais perspectives +4% par an ou ×3 en 30 ans

Environ une nouvelle génération tous les 10 ans

- 2G : première numérique mais voix
- 3G : données
- 4G : données à haut débit
- 5G :
 - Très grand débit (eMMB) : réseau cellulaire
 - Faible latence et grande fiabilité (URLLC) : automatisation
 - Grande connectivité (mMTC) : Internet des objets (IoT)

Imaginaire non prévu

- Lancement du Bibop (1993): P. Meyer, « Vous vous imaginez au restaurant ou dans la rue, environné d'écervelés qui se font appeler? En 2000, un million d'appareils à striduler n'importe quand, n'importe où et pour n'importe quoi »
- SMS (1992) : diffuser des informations de service par les opérateurs
- Premiers travaux sur la 3G (1991): envoi de données alors qu'Internet fixe n'est utilisé que par les chercheurs
- Premiers travaux sur la 4G (2001): écran tactile n'existe pas, Wireless Application Protocol (WAP-1999)



Généralement, plan d'affaires très léger

Est-ce efficace ?

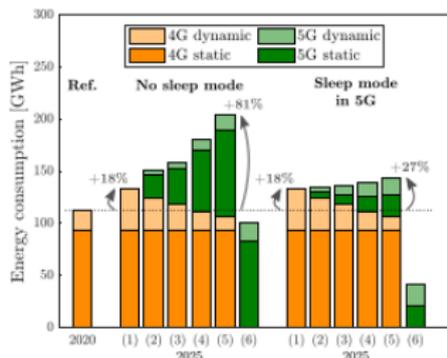
- Très haut débit : MIMO massif, plus de bandes de fréquences.

$$E_{\text{tx},\text{fichier}} = \frac{LP_{\text{tx}}}{n_{\text{tx}} B \log_2 \left(1 + \gamma \frac{P_{\text{tx}}}{n_{\text{tx}} B N_0} \right)}$$

- Nouveauté protocolaire : mode veille
- Efficacité en E_{tx} : oui
- Sobriété: non
- Amélioration encore possible de l'efficacité (6G)
 - Récupération d'énergie solaire, vibratoire (et donc énergie intermittente)
 - Stockage distribué d'information non-obsolète en bout de ligne pour limiter les retransmissions dans le cœur du réseau
 - Prendre en compte les coûts fixes et la fabrication lors de développement des algorithmes et protocoles

Etude 1 : modèle macroscopique

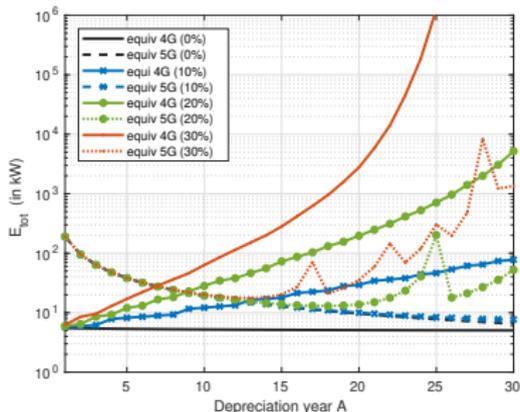
- Modèle 4G disponible : $P = P_0 + \alpha R$
- Modèle 5G : $P_{5g} = \beta P(B_{5g}/B)^{0.95}(S_{5g}/S)^{0.1}$ avec S le nombre de flots.
- Trafic (mode veille) et fabrication prise en compte (12 ans)



source : L. Golard et al., "Evaluation and projection of 4G and 5G RAN energy footprints : the case of Belgium for 2022-2025," *Annals of Telecoms*, 2024

Etude 2 : modèle microscopique

- Modèle 4G : 4 antennes, amortissement de 10 ans déjà
- Modèle 5G : 100 antennes
- Fabrication prise en compte (dont l'écart entre antennes)



source : P. Ciblat, "A propos du MIMO massif dans un contexte de sobriété numérique," Grets, 2022

Conclusion : questionnement des usages

Quelques usages consensuels

- Analyser le système-Terre (calcul intensif pour le climat)
- Préserver et améliorer la santé (aide au diagnostic)
- Permettre une communication éloignée (télé-communications)

Mais attention,

- tout ceci a un prix qu'il faut prendre en compte !
- faut-il dire non si le coût est trop élevé ?
- si oui, qui décide des usages ?
- qui classifie **utilité contre futilité** ?