



17 Juin 2021, Séminaire des doctorants de la SIF ■■

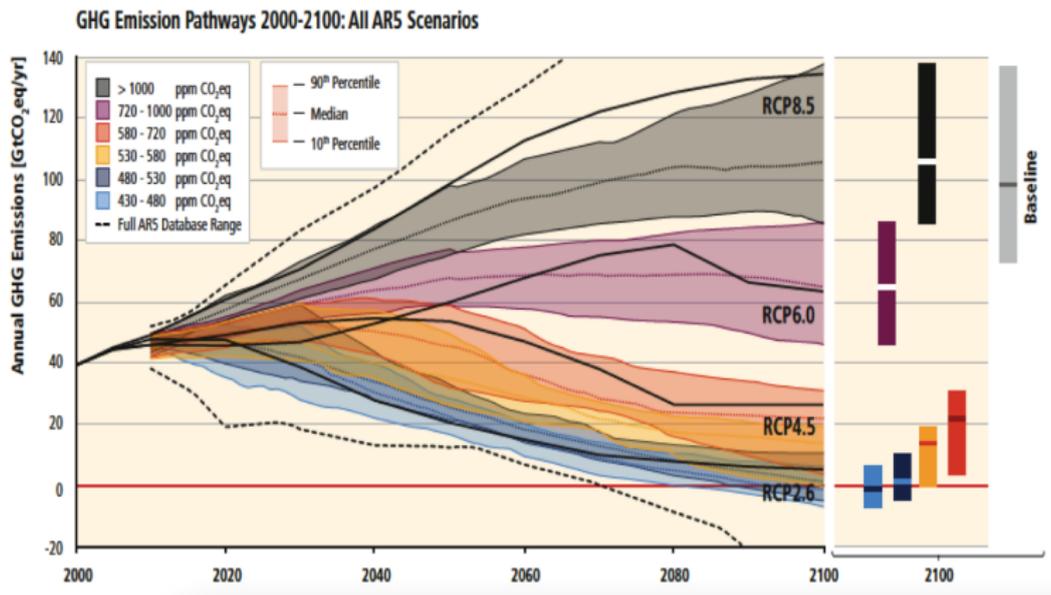
■ Energie et numérique : prospective d'une convergence pour la transition bas carbone

Nadia Maïzi

Professeure, Directrice de Laboratoire, Auteure principale pour le 6ème rapport du GIEC

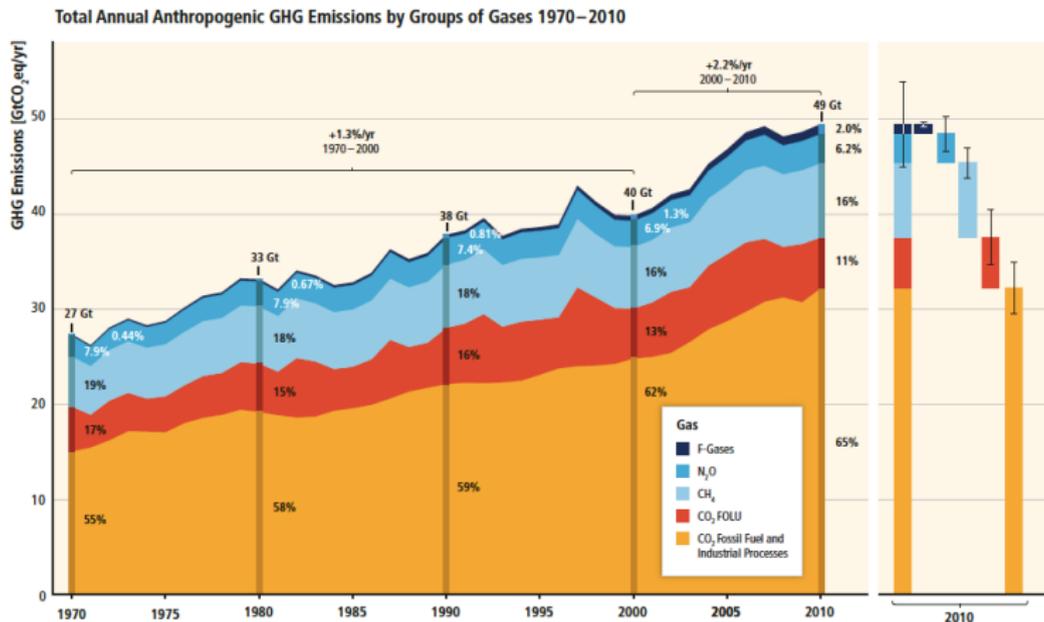
Centre de Mathématiques Appliquées MINES ParisTech/PSL Research University
Chaire Modélisation prospective au service du développement durable

Emissions anthropiques à 2100 selon 900 scénarios du GIEC



Source : IPCC, 2014: Summary for Policymakers

Emissions anthropiques de 1970 à 2010



Source : IPCC, 2014: Summary for Policymakers

Le rapport au Futur

ce que les scénarios disent du futur

Notre civilisation est comparable à une voiture qui roule de plus en plus vite sur une route inconnue lorsque la nuit est tombée. Il faut que ses phares portent de plus en plus loin si l'on veut éviter la catastrophe.

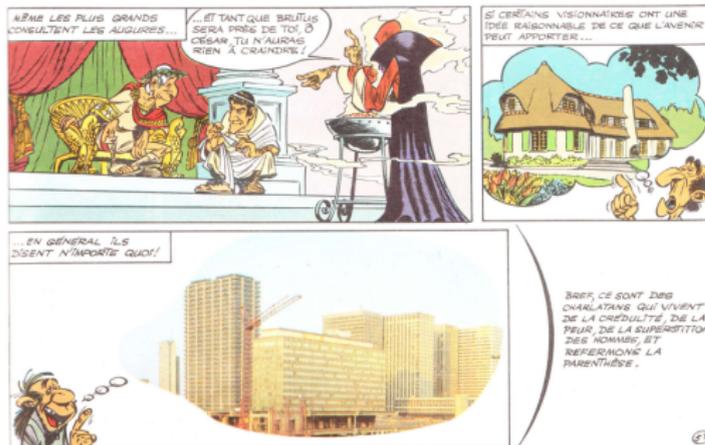
Gaston Berger, 1964, Phénoménologie du temps et Prospective



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

La demande de prédictions :

s'adresse aux oracles (4ème millénaire av. J.-C.) puis aux approches scientifiques qui permettent le calcul des trajectoires (astres, boulets, fusées, température, phénomènes météorologiques)



Uderzo, Goscinny: Le Devin.

Anticiper des événements probables auxquels il faudra s'adapter c'est **pré-voir** dans l'idée de **subir** : une attitude fataliste

La Prospective est tout particulièrement l'étude de **l'avenir lointain** :

- ▶ voir loin
- ▶ voir large
- ▶ analyser en profondeur
- ▶ prendre des risques
- ▶ penser à l'homme



Elke Rehder: Le Joueur d'échecs.

Se préparer à l'action c'est envisager à l'avance toutes les ramifications du possible P. Massé.

*La prospective regarde en avant.
Le regard est pour elle le premier temps de l'action*

Pierre Massé

La démarche

Explorer le futur
à partir de la
connaissance du présent et
du passé

L'objet

Dans le but d'examiner les
évolutions possibles
en fonction
des décisions prises, des
actions réalisées.

Storytelling

Faire rêver, Effrayer

Back-casting

Partir des objectifs, remonter aux
étapes intermédiaires

Modéliser

Transformation entrées/sorties



Le **concept d'optimalité** selon lequel :
*un planificateur unique bienveillant sélectionne le panier de
meilleures solutions technologiques pour satisfaire une demande en
énergie*

$$\min_{x \in X} f(x)$$

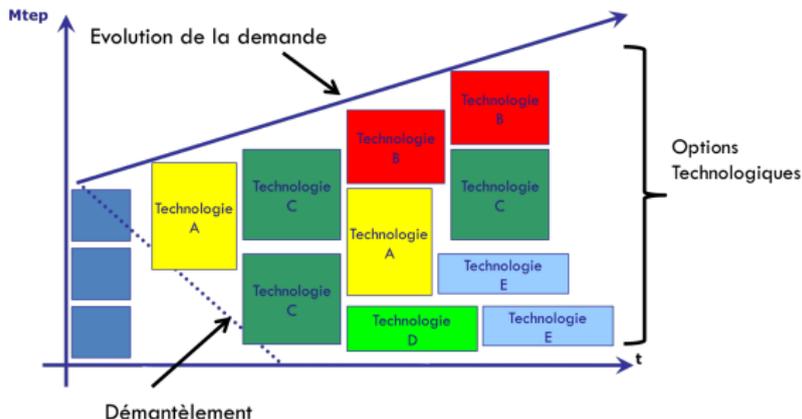
x variable de décision

X espace de contraintes

f objectif

TIMES

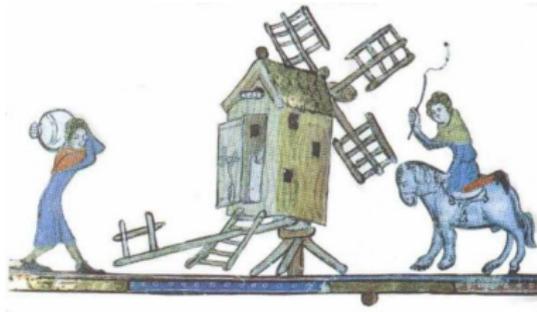
- ▶ piloté par la **demande**
- ▶ horizon **50** à 100 ans
- ▶ **minimisation** du **coût** total actualisé



Evolution du système énergétique

la transition énergétique

les enjeux à travers le prisme français



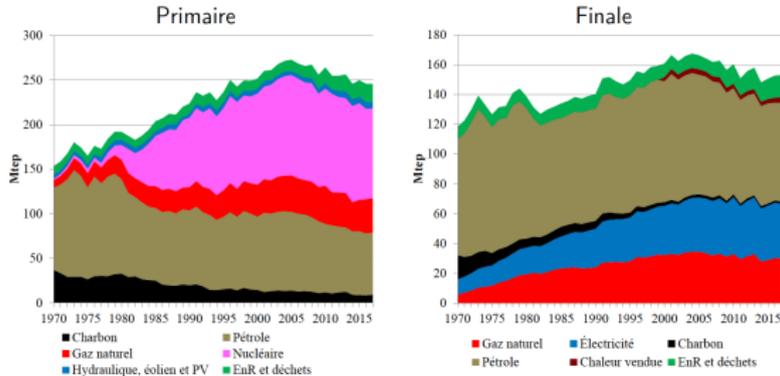
Moulins à vent XIII^{eme} - XIX^{eme}



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

Le contexte français

- ▶ compétitivité et indépendance énergétique
- ▶ développement du programme électro-nucléaire pour le secteur électrique



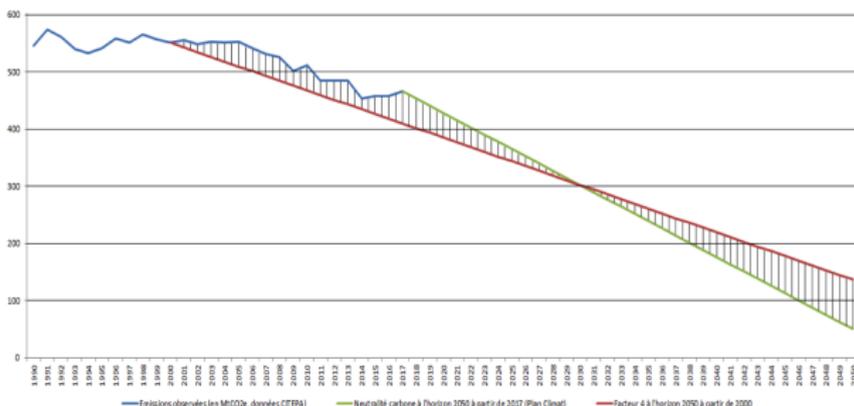
Source : SDES, MTES (thèse A. Millot)



Orientations des lois énergie climat

ou comment définir la neutralité à la française

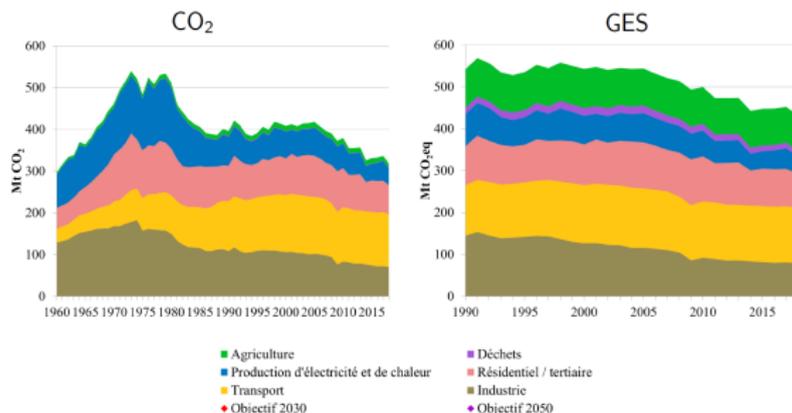
Trajectoire souhaitée des émissions française à l'horizon 2050



Source B. Le Hir. France Stratégie 2018

- ▶ **Objectif national à 2050** qui s'inscrit dans la démarche mondiale
- ▶ Nécessité de prendre en compte **tous les secteurs et tous les GES**





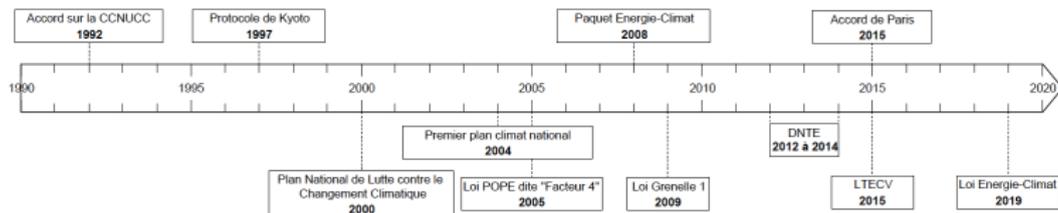
Source : CITEPA 2018 hors UTCAF (thèse A. Millot)

▶ part des émissions CO₂

74% des GES en 2016

▶ part des émissions CO₂ énergétiques

92% des émissions CO₂ ou 68% des GES en 2016

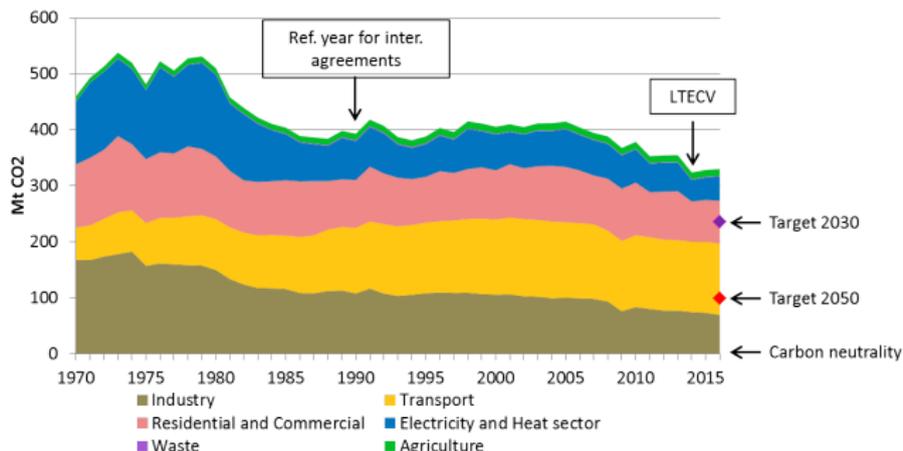


Source : thèse A. Millot

- ▶ **émissions de GES** : réduction de 40% en 2030 par rapport à 1990 et zéro émissions nettes en 2050
- ▶ **consommation d'énergie finale** : réduction de 50% en 2050 par rapport à 2012
- ▶ **consommation d'énergie fossile** : réduction of 40% en 2050 par rapport à 2012
- ▶ **sources d'énergies renouvelables** : atteindre 33% de la consommation d'énergie finale et 40% de la production d'électricité en 2030
- ▶ **nucléaire** : 50% de la production électrique en 2035

la tendance des émissions de CO₂

- ▶ accroissement de 4% de 2014 à 2017 (depuis la mise en place de la LTECV)
- ▶ non alignement avec les objectifs 2030 et 2050 : **dans 9 et 29 ans !**



Source: CITEPA/Millot et al.

Technologies



Politique



Modes de vie



- ▶ Sources peu émissives en carbone
- ▶ Choix technologiques
- ▶ Efficacité énergétique
- ▶ Solutions *intelligentes*
- ▶ Instruments de marchés
- ▶ Choix de société
- ▶ Engagements climatiques nationaux et internationaux
- ▶ Modes de gouvernance

☞ place du numérique dans les scénarios bas carbone ?

L'homme au centre de la boucle

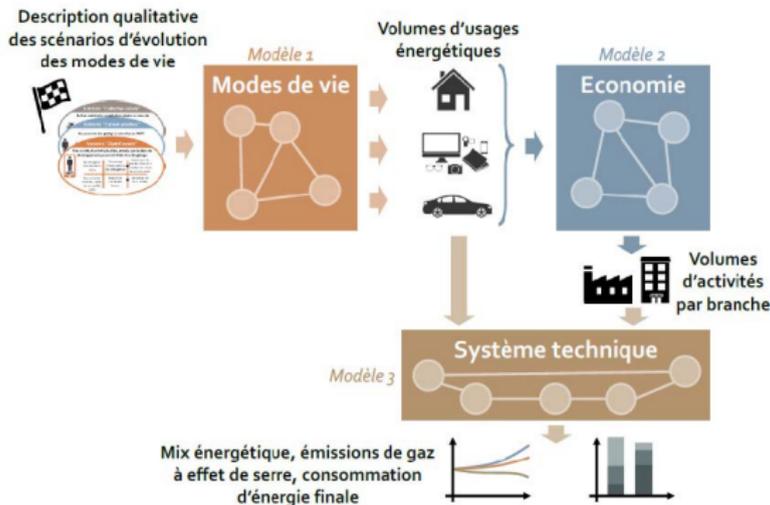
quid des changements à venir



Digital society : In this more individualistic and technological society, people are motivated by a desire for personal achievement and long life.

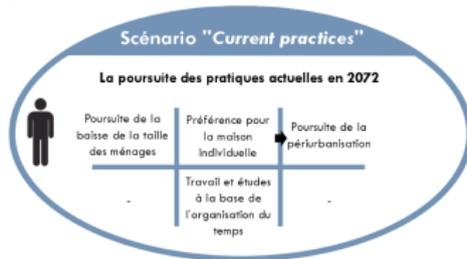
Collective society : In this society organized around social connections and cooperation, people are motivated by a desire to be – and do – with others.





[A. Millot, R. Doudard, T. Le Gallic, F. Briens, E. Assoumou and N. Maïzi. France 2072: Lifestyles at the core of carbon neutrality challenges, In book: Limiting Global Warming to Well Below 2 C: Springer, 2018..]

3 scénario reflétant des modes de vie alternatifs



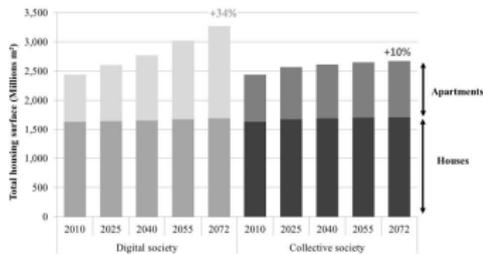
Scenario current practices



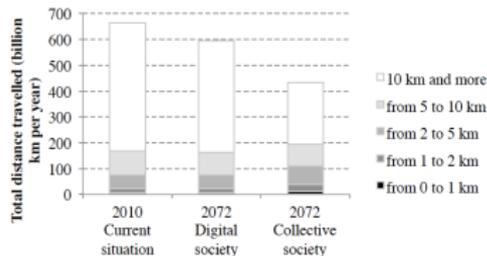
Scenario collective society



Scenario digital society

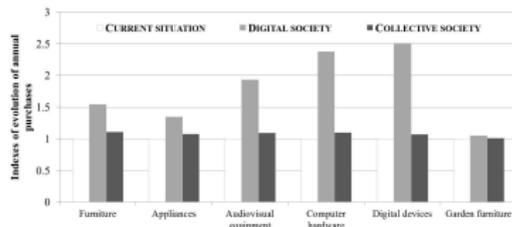


on housing demand



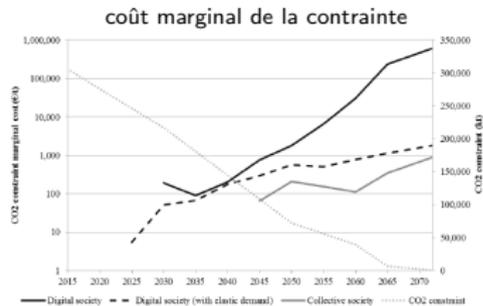
on mobility: short and long distance

with a common assumption of 18% population growth

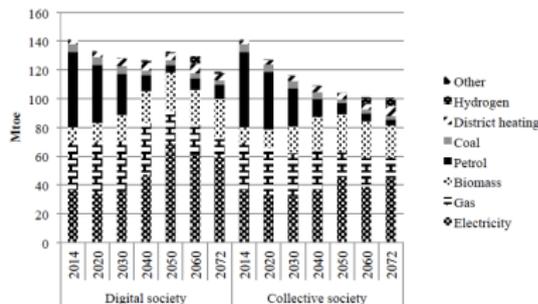


on equipments

- poids du mode de vie essentiel pour atteindre la neutralité carbone
- en 2072 le coût marginal de la "société digitale" est 700 fois plus élevé que celui d'une "société collectiviste"



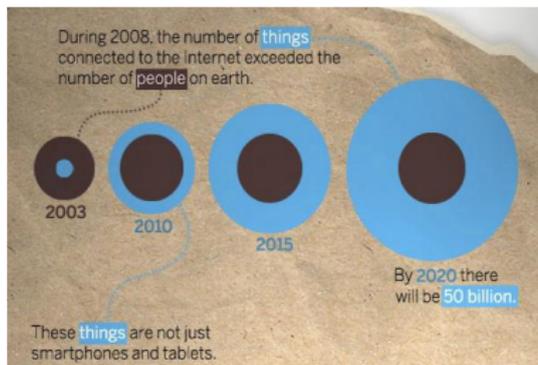
- association entre modes de vie et certaines technologies et vecteurs: ici CCS, biomasse, vecteur électrique



Energie finale objectif neutralité en 2072 et élasticité de la demande

La digitalisation

outil de la transition ?



Source: Semanticweb.com, 2014

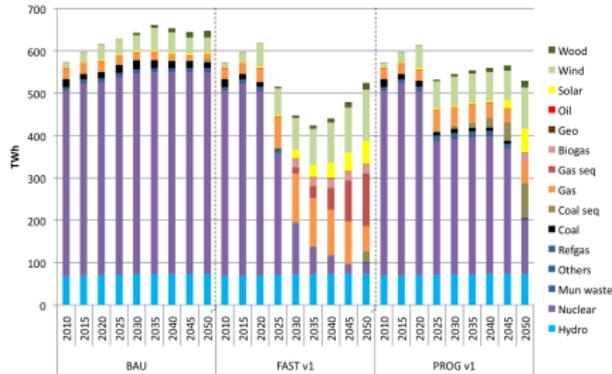


Chaire Modélisation prospective
au service du développement durable

Mix électrique décarboné

Deux tendances :

- Migration vers le tout électrique
- Pénétration du renouvelable à grande échelle



☞ Quid de la **pertinence** et la **plausibilité** des mix de production électrique évalués via les exercices de prospective long terme



Production électrique taxe et contrainte en volume

L'Europe pendant le blackout de
l'Italie (28 Sept. 2003). Source: RTE.

☛ Contrôle :

- ▶ Equilibre offre/demande en temps réel (inertie)
- ▶ Gestion des actifs décentralisés (stabilité)
- ▶ Contrôle de la traçabilité de l'énergie
- ▶ Qualité de la fourniture avec variabilité du signal
- ▶ Cybersécurité, redondance et résilience

☛ Prévion :

- ▶ Météo locale afin de diminuer les effets de l'intermittence
- ▶ La maintenance prédictive des actifs dispersés
- ▶ Optimisation du fonctionnement

- ▶ Lorsqu'un système est isolé, il évolue naturellement dans un état où le **désordre augmente** (son entropie, sa perte d'information).
- ▶ Si l'on part d'un système isolé pur dont l'état est certain, cet état au bout d'un certain temps est devenu équiprobable de tous les autres états accessibles du système : il y a eu perte d'information.
- ▶ D'après le second principe de la thermodynamique, **acquérir de l'information ne peut se faire à coût énergétique nul.**

CHALEUR	FROID
DESORDRE	ORDRE
PERTE D'INFORMATION	INFORMATION
ENTROPIE ELEVEE	PERTE D'ENTROPIE



Gain d'information : second principe

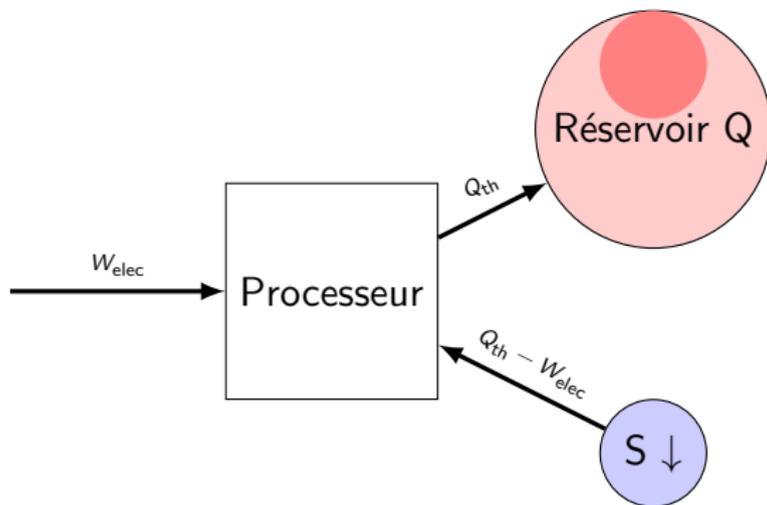
Lorsque l'on a un bit qui passe d'un état certain à un état équiprobable ($p = 1/2$), la perte d'information est égale d'après Shannon à

$$\sum p_i \log p_i = 1/2 \log 1/2 + 1/2 \log 1/2 = -\log 2$$

L'entropie S associée, soit l'information physique associée à cette information numérique est

$$S = k_B \log 2$$

avec $k_B = 1.3810^{-23} J/K$ la constante de Boltzman.

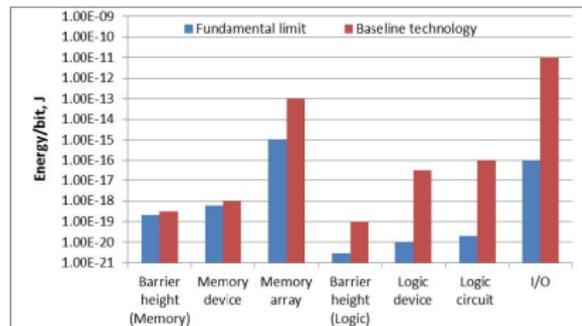


Bilan en énergie : premier principe

L'énergie consentie pour récupérer cette information devrait donc être de

$$Q_{th} - W_{elec} = k_B T \log 2$$

- ▶ La **quantité totale d'énergie nécessaire à un calcul** dépend directement du nombre de transformations des rangées de bits mises en jeu par ce calcul.
- ▶ Le niveau d'énergie considéré pour une opération binaire correspond à un budget énergie correspondant à la contribution de **différents composants** tels que les circuits logiques, les mémoires, les interfaces, les I/Os, etc.

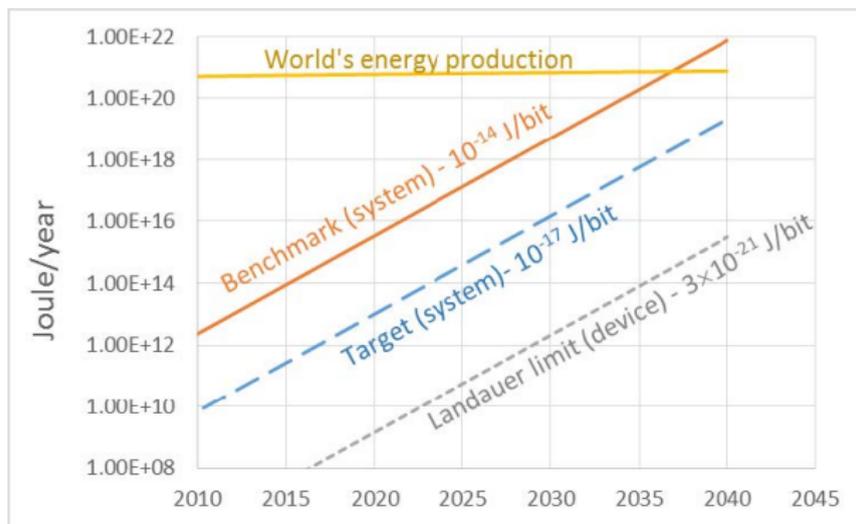


Consommation d'énergie par bit d'information

3 scénarios sont considérés pour évaluer l'évolution de la **consommation d'énergie nécessaire par bit d'information** :

- ▶ $\sim 10^{-21} J/bit$ **limite physique** au sens de Landauer c'est à dire conformément aux limites inférieures théoriques des composants physiques
- ▶ $\sim 10^{-17} J/bit$ la **cible** établie avec des améliorations en efficacité énergétique entre autres
- ▶ $\sim 10^{-14} J/bit$ la **tendance actuelle** dit *Business As Usual*

Source : <https://www.semiconductors.org/resources/rebooting-the-it-revolution-a-call-to-action-2/> (last visited 6/14) Semiconductor Industry Association and Semiconductor Research Corporation



Energie totale dédiée au calcul (computing)

Source : <https://www.semiconductors.org/resources/rebooting-the-it-revolution-a-call-to-action-2/> (last visited 6/14)

Semiconductor Industry Association and Semiconductor Research Corporation

Le scénario BAU n'est pas soutenable : à partir de 2040, l'énergie requise pour le calcul excédera la production d'énergie telle qu'estimée à l'échelle mondiale ci dessus.

Résoudre l'explosion de la consommation intrinsèque du numérique

- ▶ repenser les modes de vie avec l'externalité consommation d'énergie liée à l'IT
- ▶ améliorer les technologies CMOS (efficacité et implémentation)
- ▶ limiter l'empreinte énergétique des solutions de calcul : un champ de recherche ouvert pour les jeunes doctorants de la SIF !