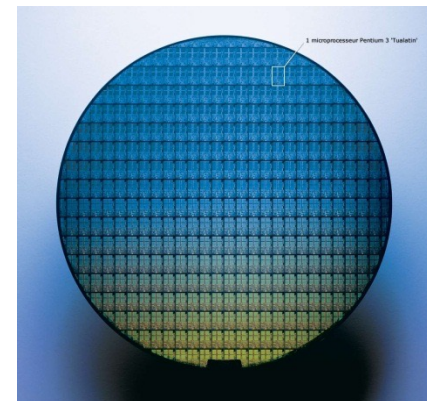
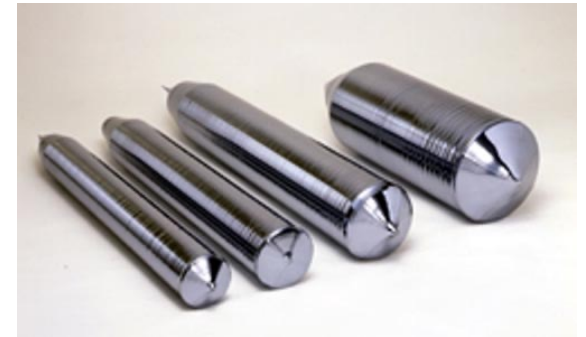
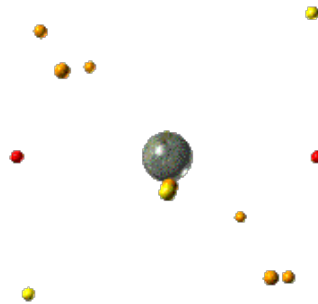
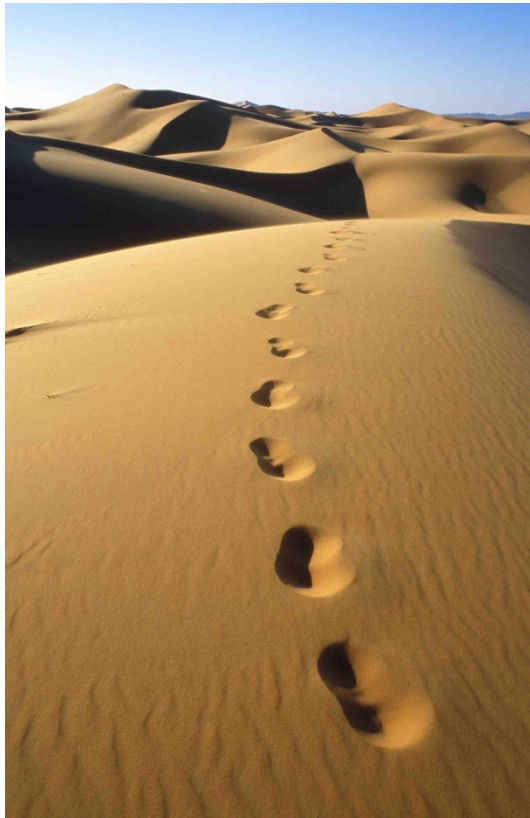
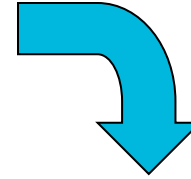
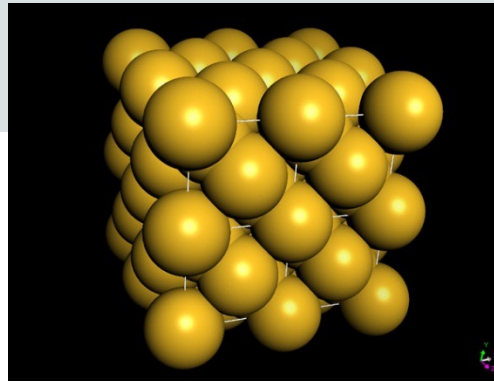
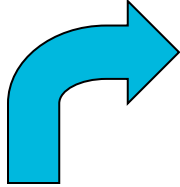




IMT Atlantique

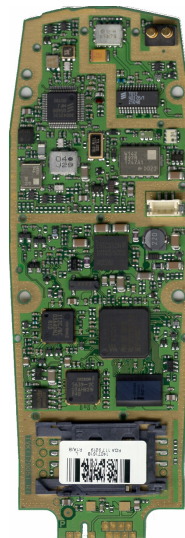
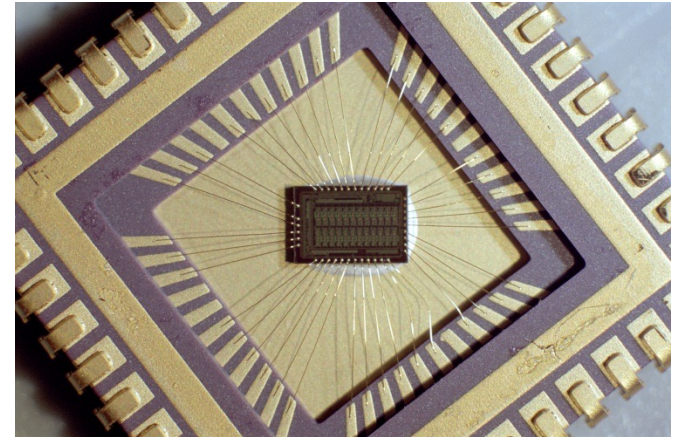
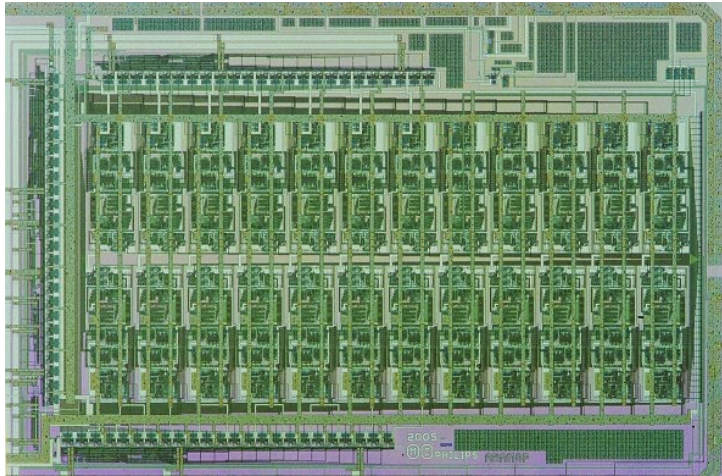
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

TECHNOLOGIE ET AUTRES



La Microélectronique Le Silicium

La Microélectronique



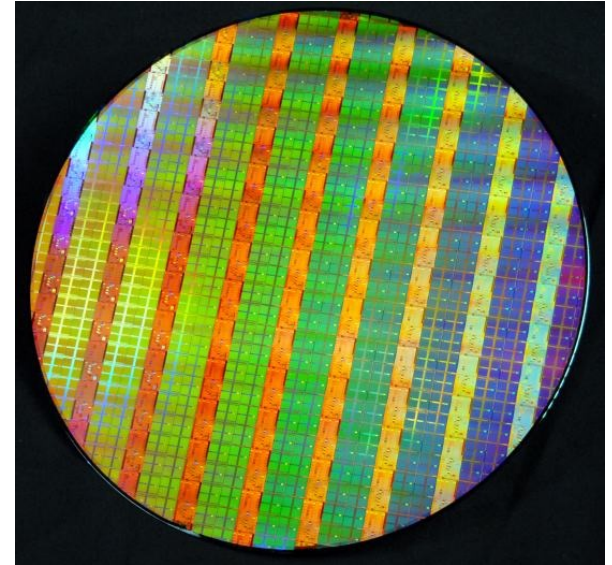
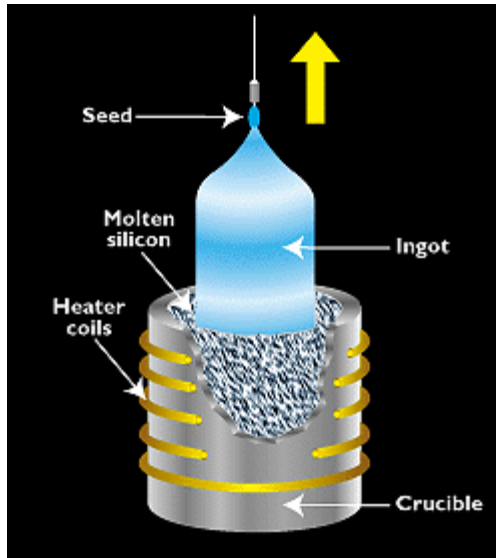
Le Marketing et la Publicité



La fabrication des CI



LINGOT DE SILICIUM: MÉTHODE CZOCHRALSKI



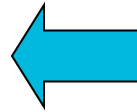
La fabrication des circuits intégrés

La Photolithographie

phénol formaldéhyde
+ diazonaphtoquinone



Le Traitement Thermique



Les Dépôts

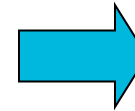
Oxyde
Nitrures
Siliciures
Tungstène

aluminium

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Le Dopage

Le diborane (B_2H_6)
La phosphine PH_3
L'arsine AsH_3



La Gravure

Sèche (CF_4 , C_2F_6 , BCl_3 , CCl_4)
ou humide (HF)

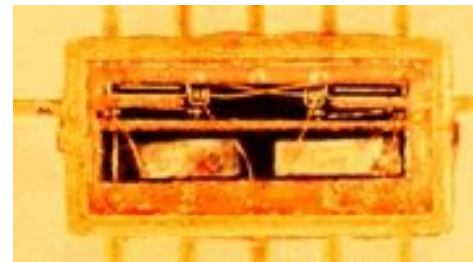


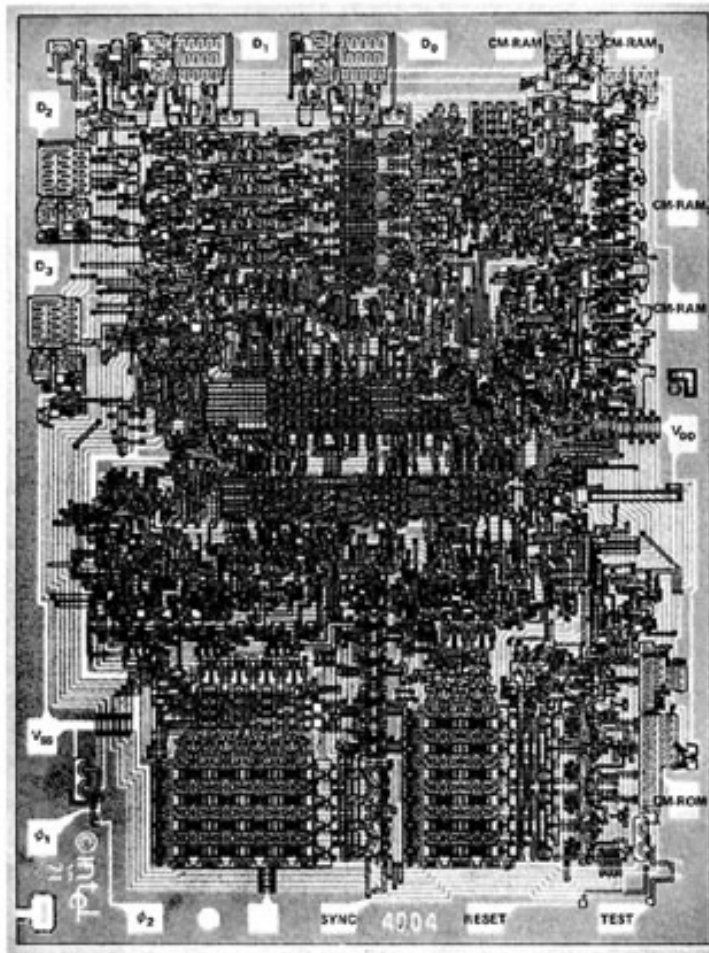
■ *L'électronique : Un domaine en évolution exponentielle...*

En 1947 : le premier transistor



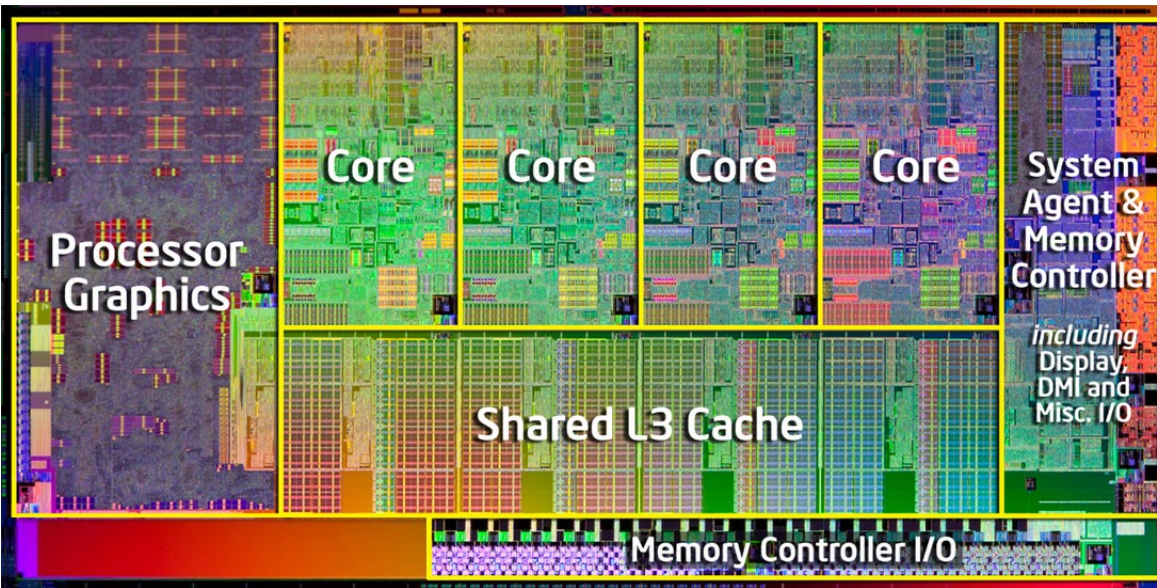
En 1957 : le premier CI (Texas / Kilby)



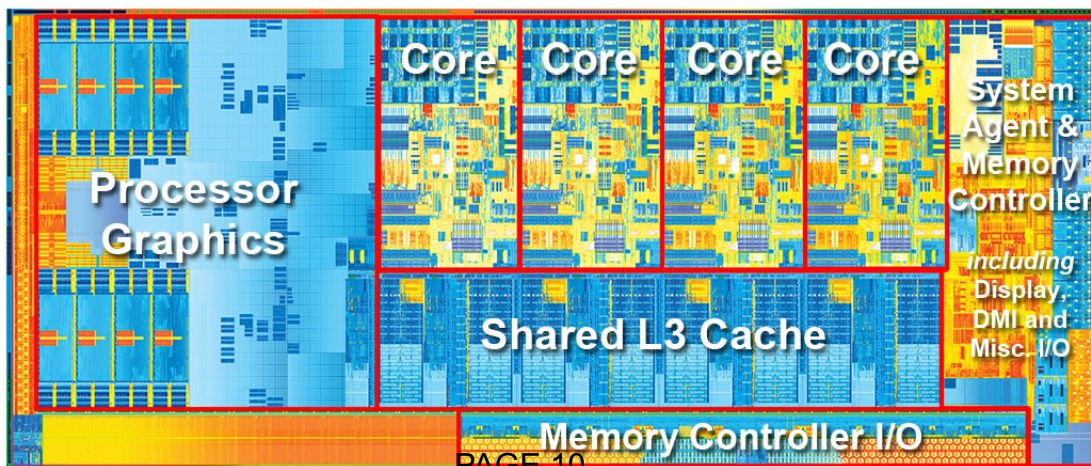


En 1971 : le premier Processeur

4004 d'INTEL : 15/11/1971
(2250 Transistors Bipolaires,
108 KHz, 4bits, 604 mots ad.)



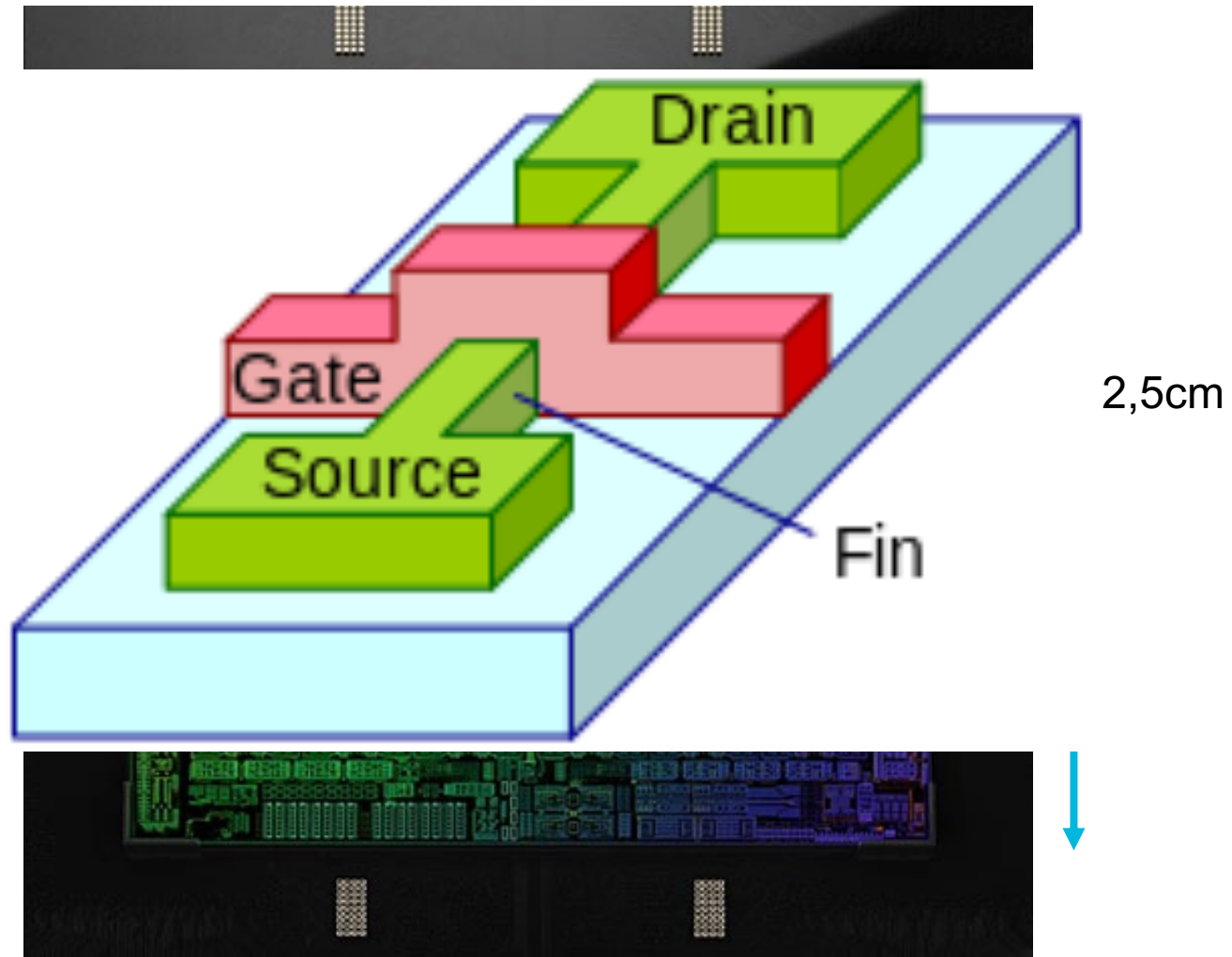
Sandy Bridge 2011
 32nm
 216mm²
 995.10⁶ Transistors MOS

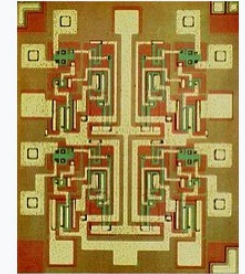


Ivy Bridge 2012
 22nm
 160mm²
 1.4 10⁹ Transistors MOS

NVIDIA AD102 POUR GPU RTX4090

GRAVURE	GPU	NOMBRE DE TRANSISTORS	SUPERFICIE <i>DIE</i>	DENSITÉ (MILLIONS DE TRANSISTORS / MM^2)
4 nm TSMC	AD102	76,3 Milliards	608,5 mm^2	125,4



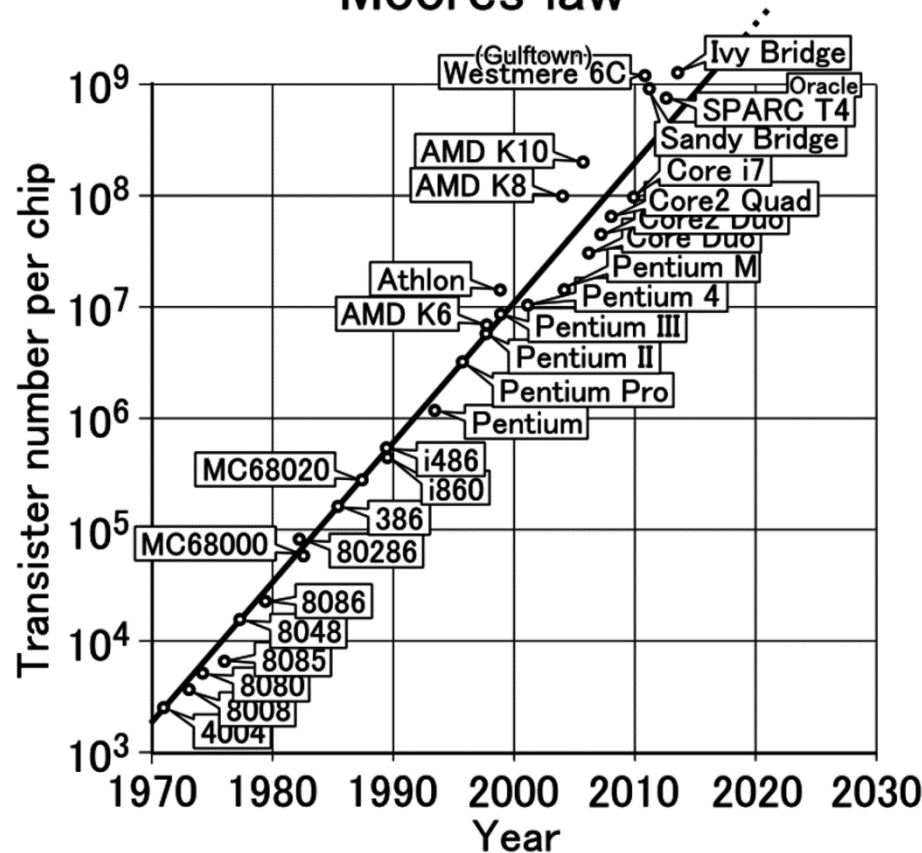


MOSFET scaling
(process nodes)

20 μm – 1968
10 μm – 1971
6 μm – 1974
3 μm – 1977
1.5 μm – 1981
1 μm – 1984
800 nm – 1987
600 nm – 1990
350 nm – 1993
250 nm – 1996
180 nm – 1999
130 nm – 2001
90 nm – 2003
65 nm – 2005
45 nm – 2007
32 nm – 2009
28 nm – 2010
22 nm – 2012
14 nm – 2014
10 nm – 2016
7 nm – 2018
5 nm – 2020
3 nm – 2022
2 nm ~ 2024

La « loi » empirique de Moore

Moore's law



Taille des transistor ▼ Taux d'intégration ▼ Vitesse de calcul

La « loi » empirique de Moore

Moore's Law: The number of transistors on microchips doubles 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

50,000,000,000

10,000,000,000

5,000,000,000

1,000,000,000

500,000,000

100,000,000

50,000,000

10,000,000

5,000,000

1,000,000

500,000

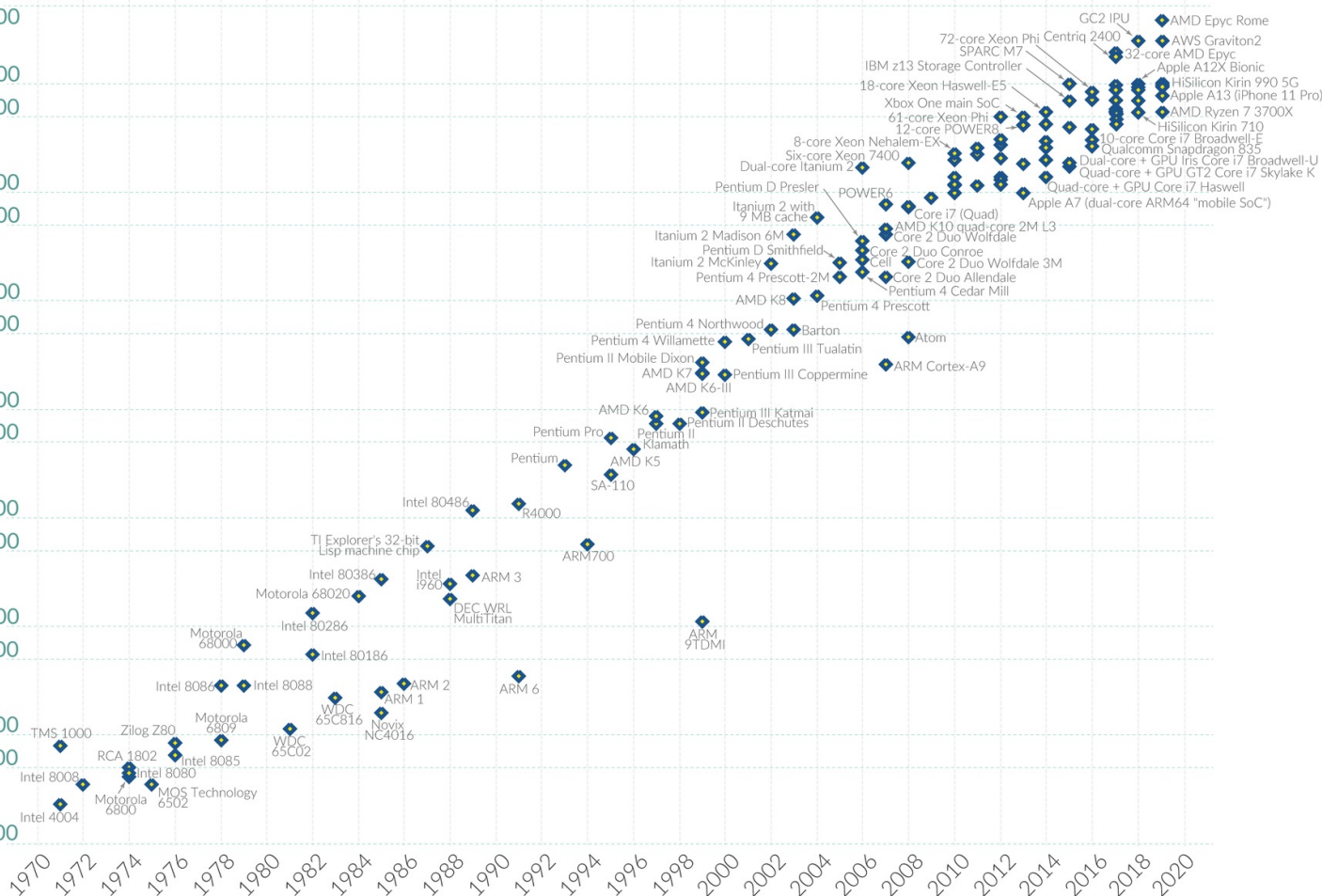
100,000

50,000

10,000

5,000

1,000

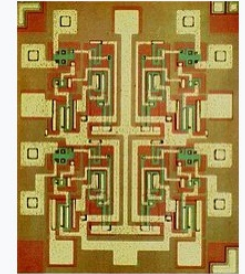


Data source: Wikipedia (wikipedia.org/wiki/Transistor_count)

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.

Semiconductor device fabrication



MOSFET scaling (process nodes)

20 μm – 1968

10 μm – 1971

6 μm – 1974

3 μm – 1977

1.5 μm – 1981

1 μm – 1984

800 nm – 1987

600 nm – 1990

350 nm – 1993

250 nm – 1996

180 nm – 1999

130 nm – 2001

90 nm – 2003

65 nm – 2005

45 nm – 2007

32 nm – 2009

28 nm – 2010

22 nm – 2012

14 nm – 2014

10 nm – 2016

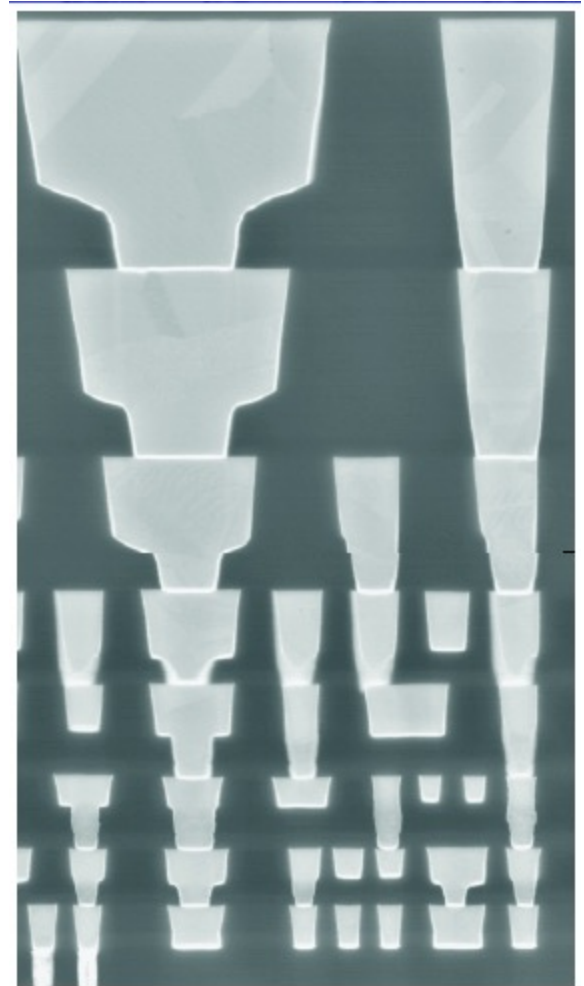
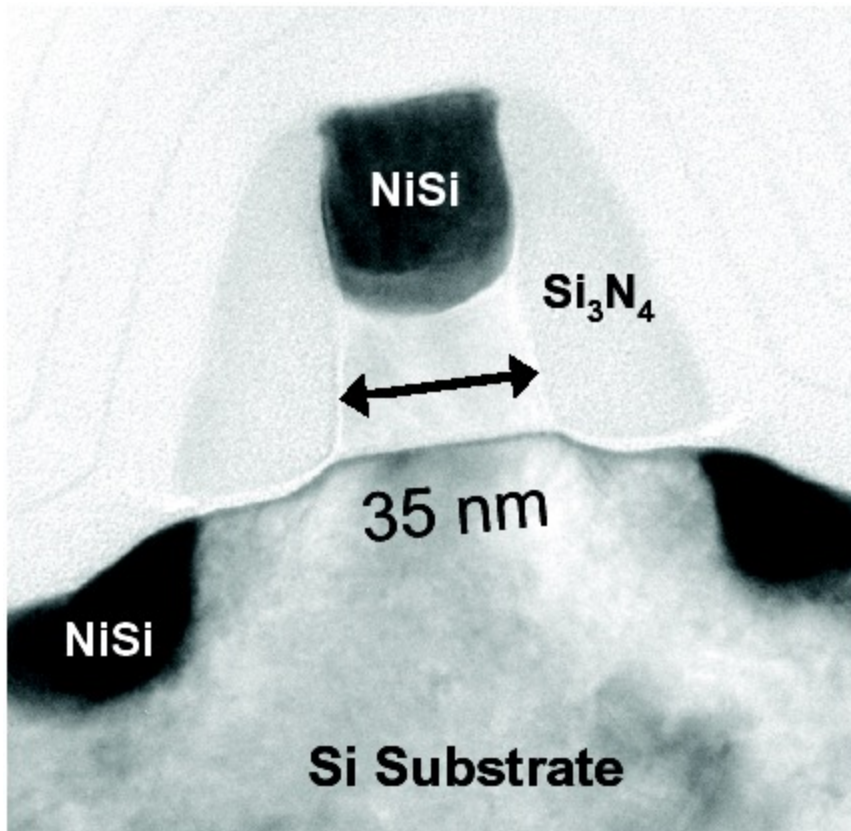
7 nm – 2018

5 nm – 2020

3 nm – 2022

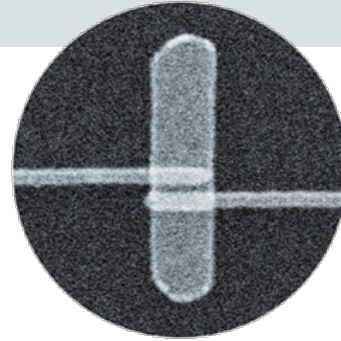
2 nm ~ 2024

Longueur de grille effective: 35 nm, épaisseur de diélectrique: 1.2 nm

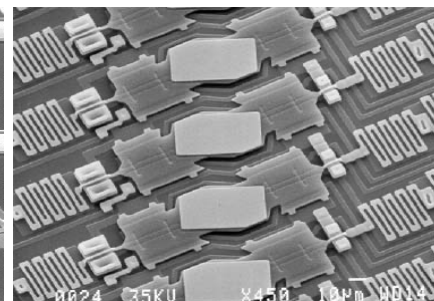
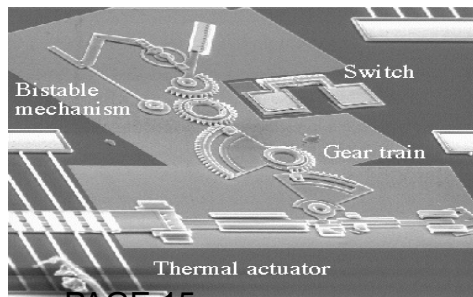
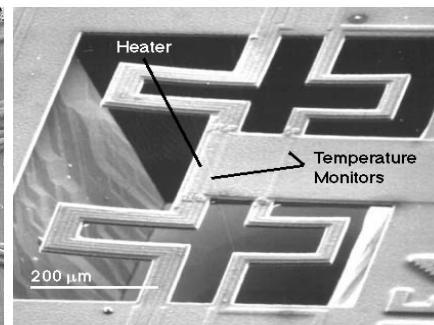
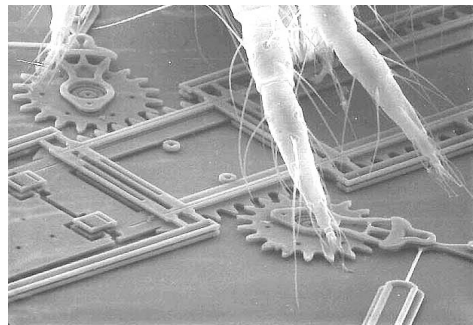


Transistors 65nm (INTEL) 2005

et demain... *La nano-électronique*

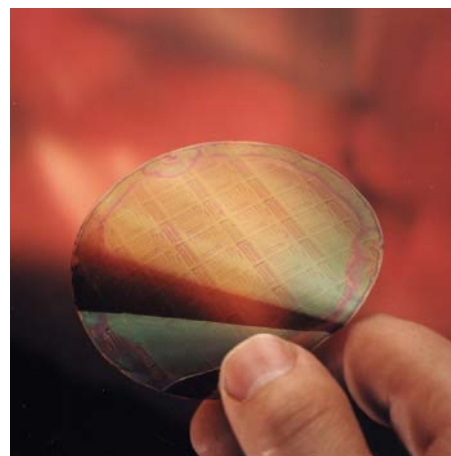


Couplage avec la micro-mécanique et l'optique (MEMS, MOEMS)...

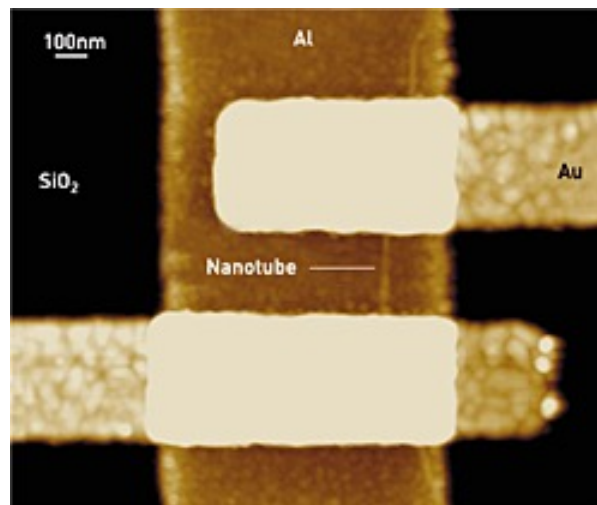


Les technologies émergentes:

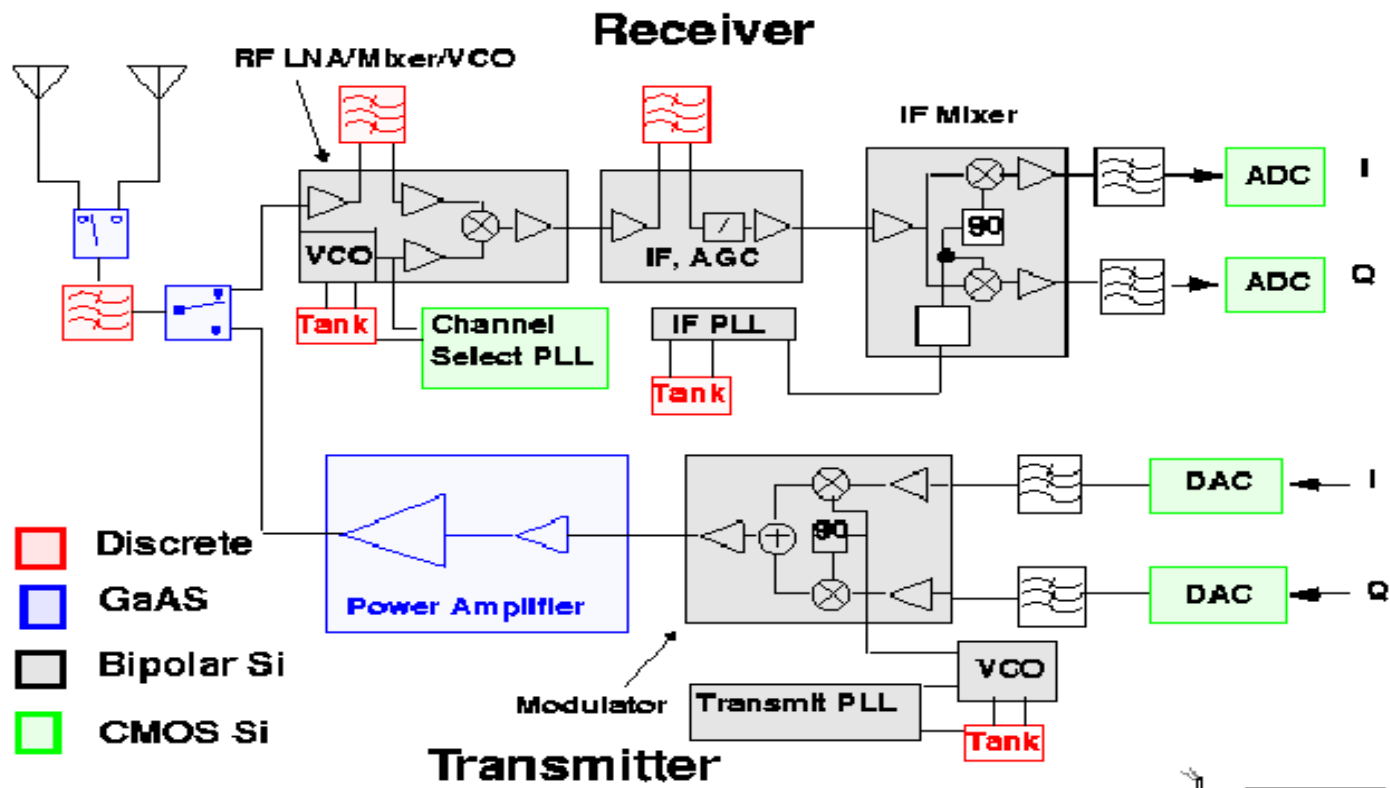
Electronique sur plastique



Electronique moléculaire
Une molécule comme composant

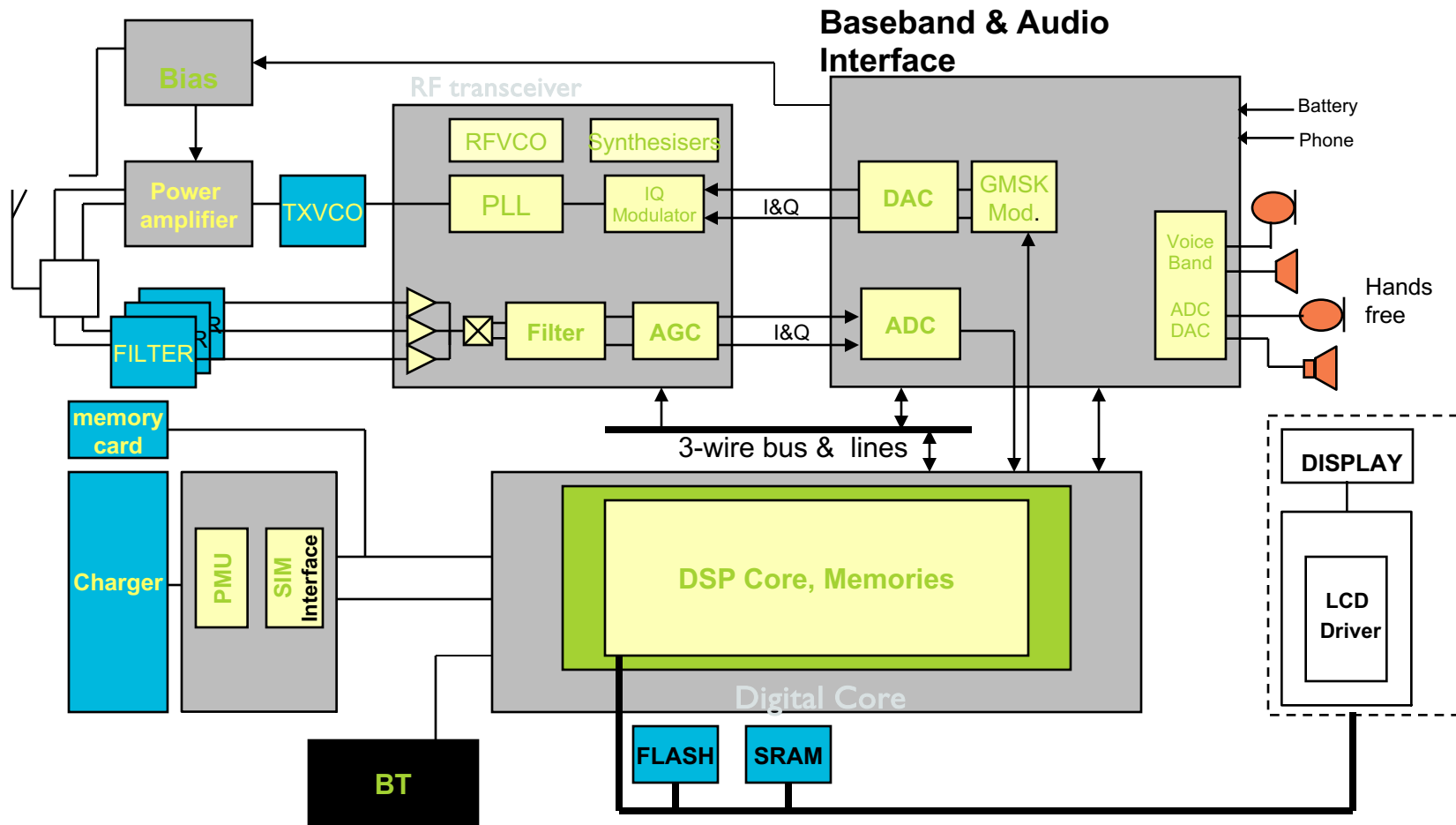


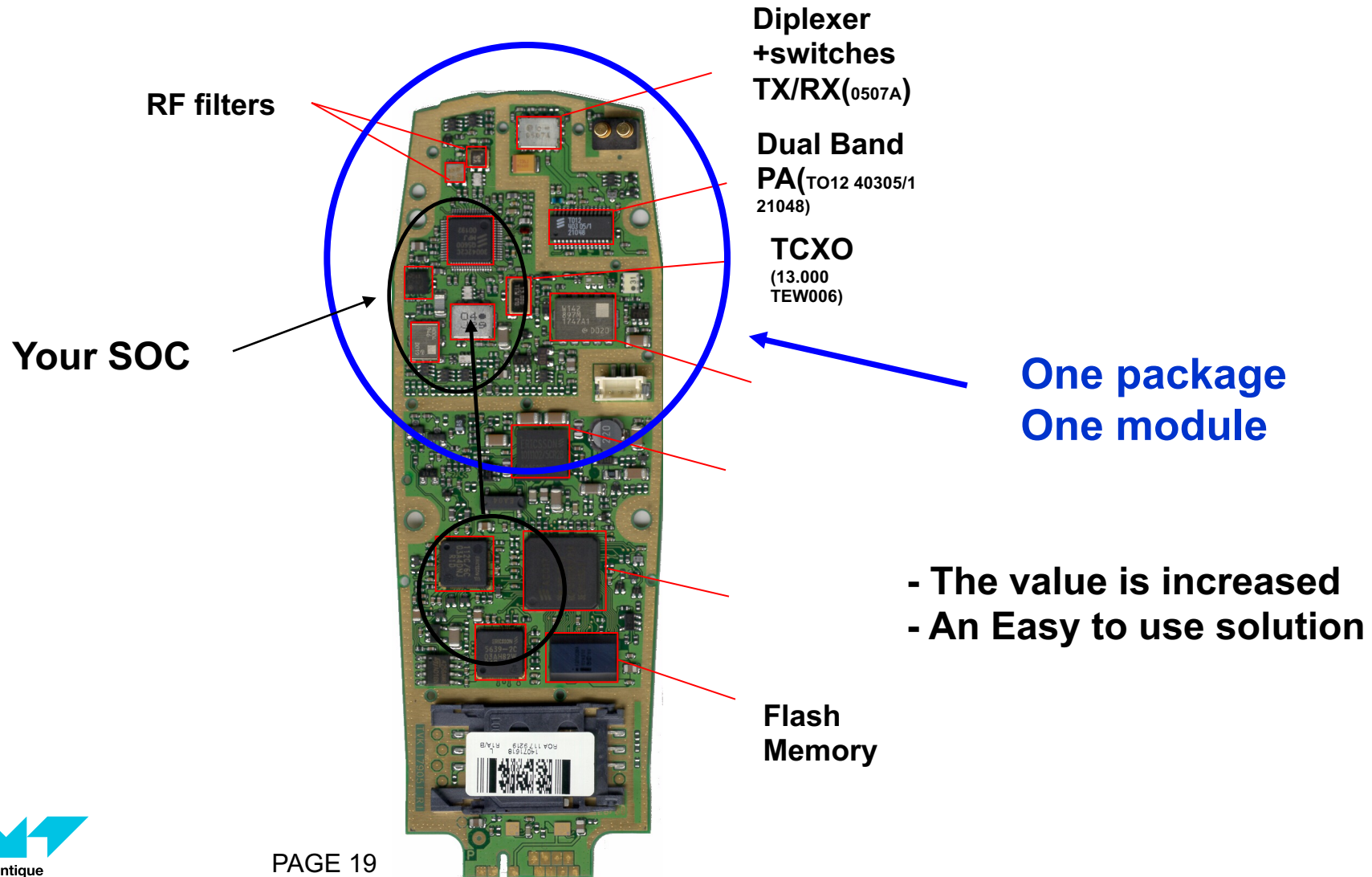
Émetteur / Récepteur RF



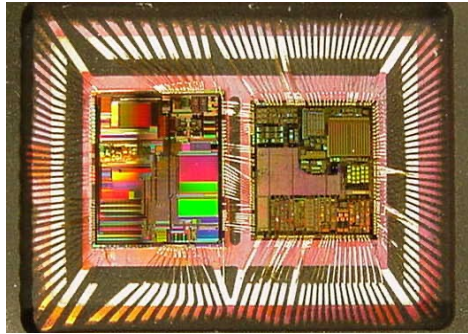
ISSCC97, CMOS RF Transceivers, Slide 9



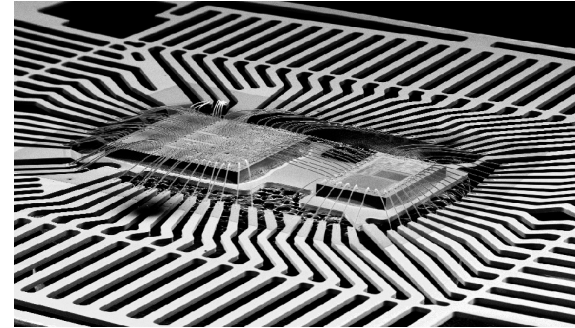




- ✓ Multi-chip packaging - 2 or more dies in the same package.

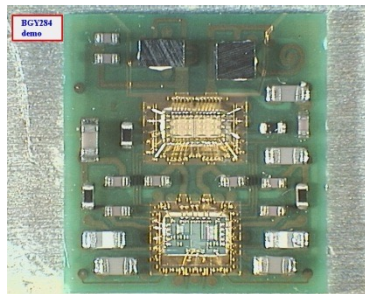


One chip TV

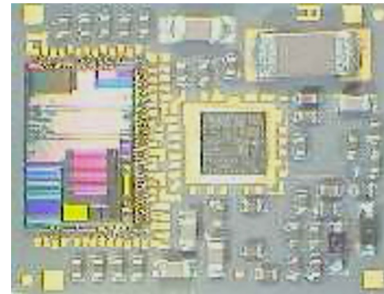


HDD Motor Controller

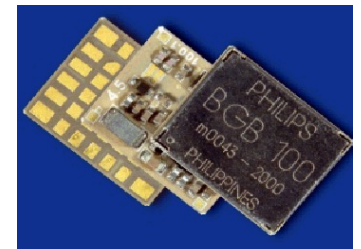
- ✓ Module - Integration of active dies and discrete components.



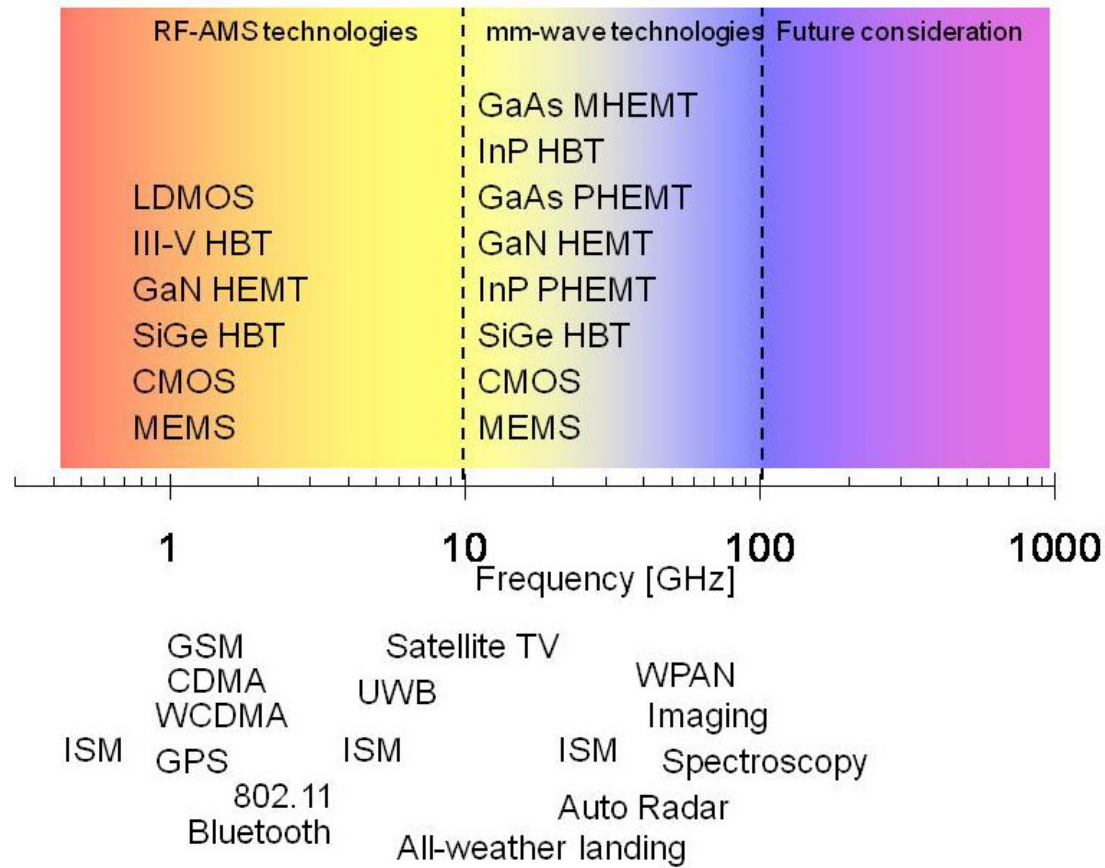
GSM Power amplifier



WLAN Module

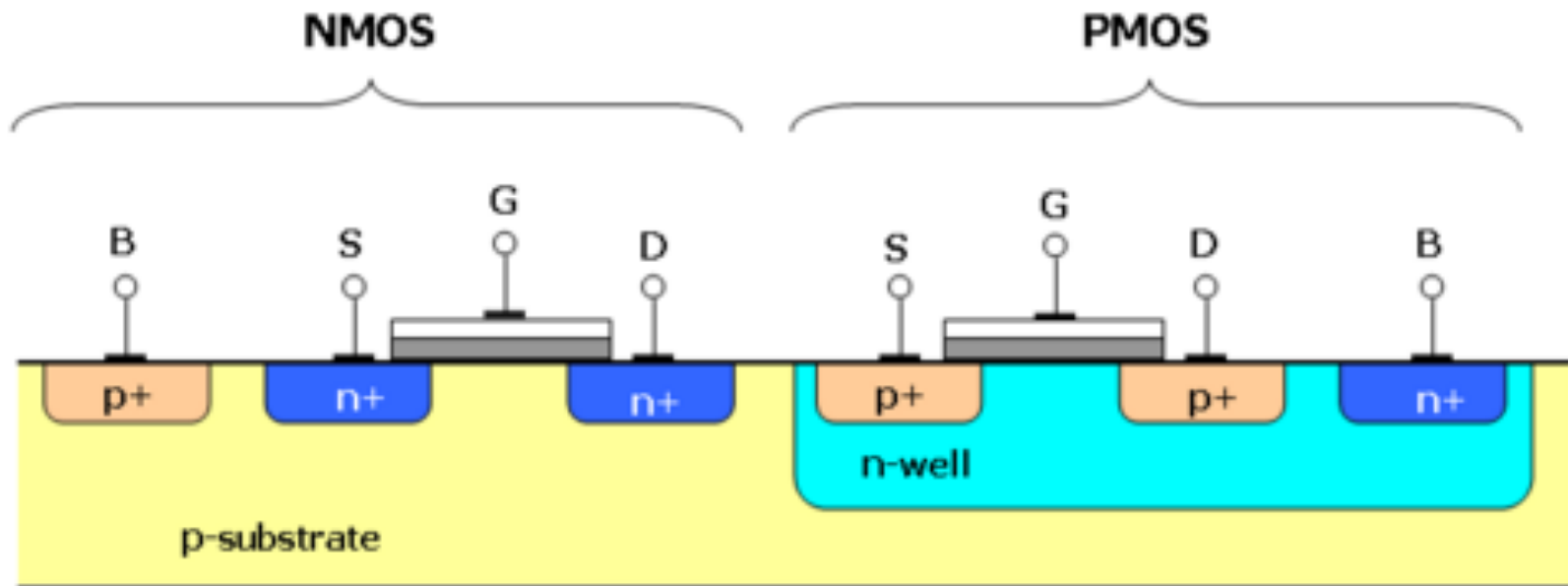


Bluetooth RF Module

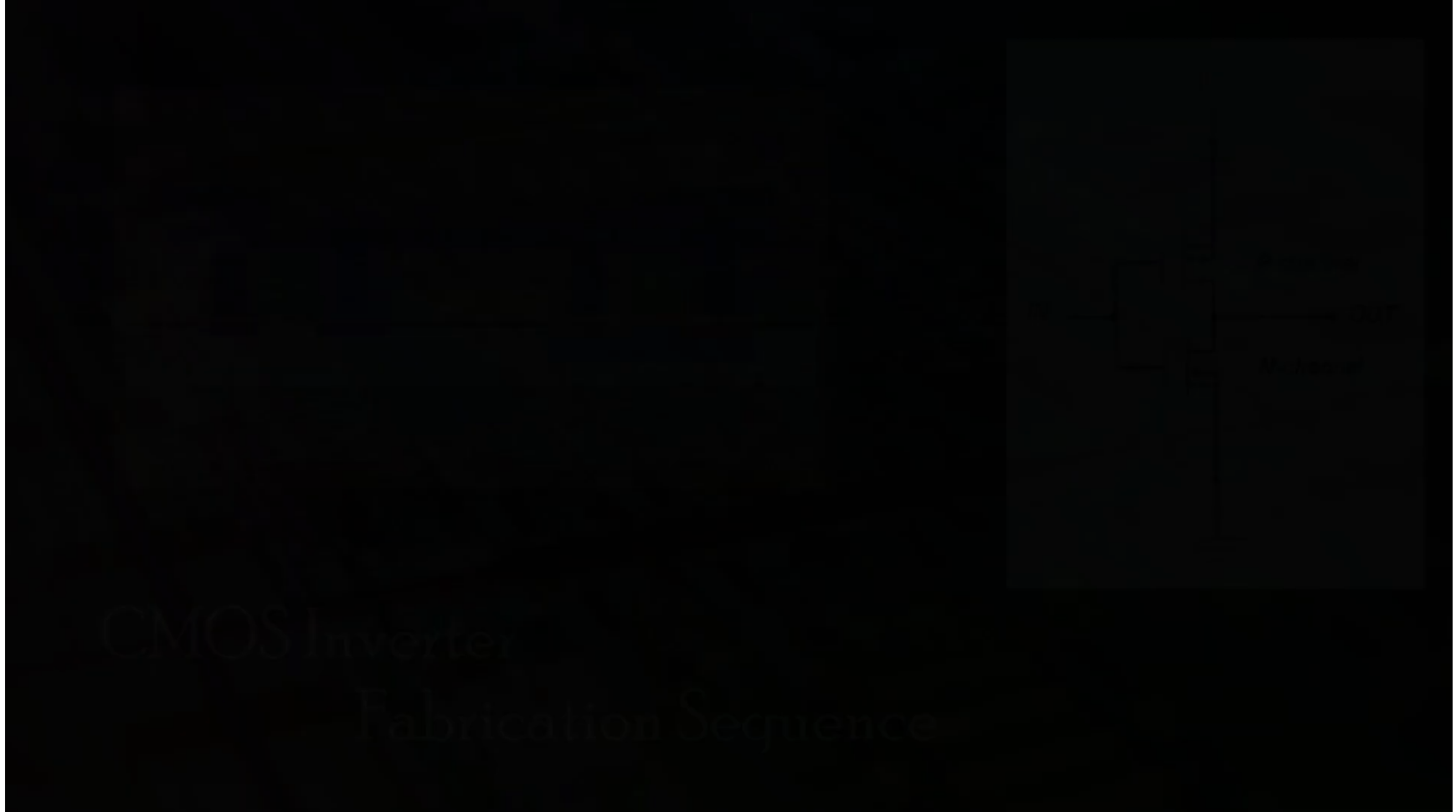


Technologie CMOS à caisson N

Les transistors PMOS sont réalisés dans le caisson N
et les transistors NMOS dans le substrat P



Technologie CMOS à caisson N



Le PC portable? Inoffensif pour l'environnement...



Cadmium
Batterie
Maladie rénale

Plomb
Carte Mère, Soudure
Système nerveux

Mercure
Écrans plats, Batteries
Pollution air et pluie

Chrome Hexavalent
Corrosion
Cancer du poumon

PVC
Isolant câble,
Émanation toxique brûle

Agents ignifugés bromés
Cartes mères
Carcinogène et mutagène

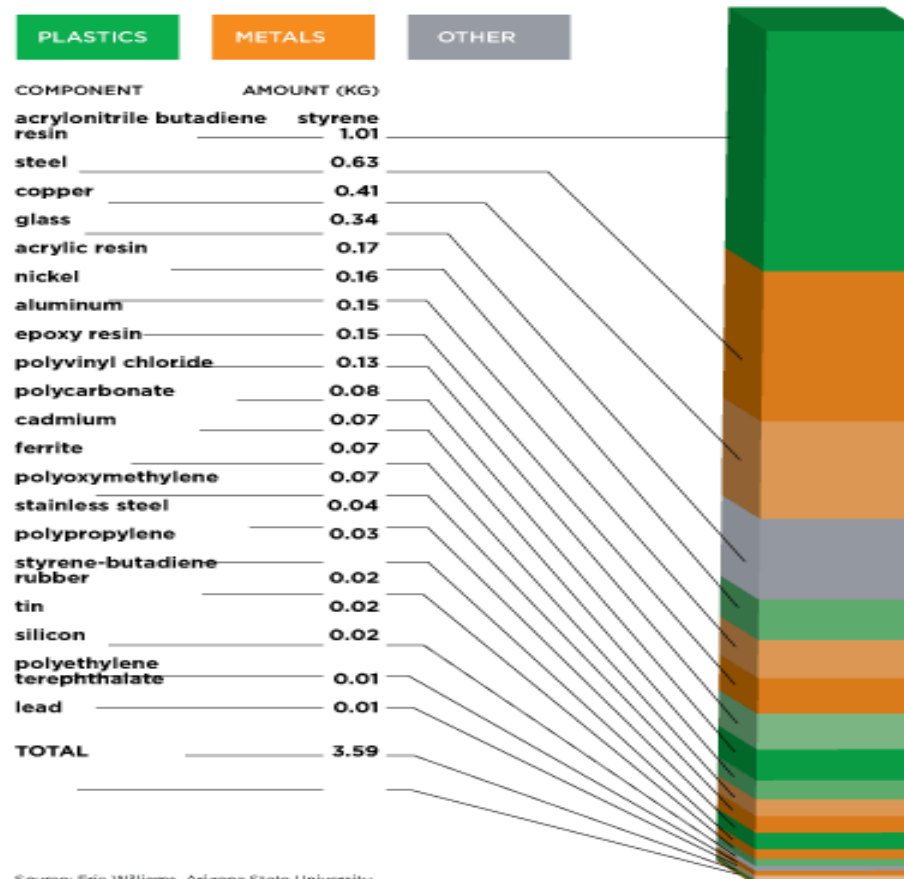
LA FIN DE VIE DE
ÉQUIPEMENTS
ÉLECTRONIQUES

Phtalates
Adoucit les PVC
Perturbateur endocrinien

Le PC portable? Inoffensif pour l'environnement...

THAT'S WHAT LITTLE NOTEBOOKS ARE MADE OF

Not sugar and spice, but a variety of decidedly more industrial substances make up today's computers. Here's the material composition of a typical notebook.



Le Téléphone Portable? Idem...



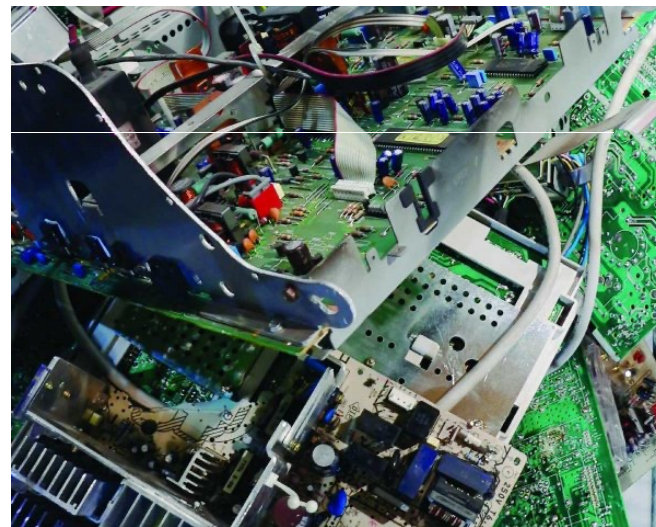
Entre 500 et 1000 composants

Plomb, Mercure, Cadmium, Beryllium

Agents ignifugés bromés

PVC

La fin de vie des équipements

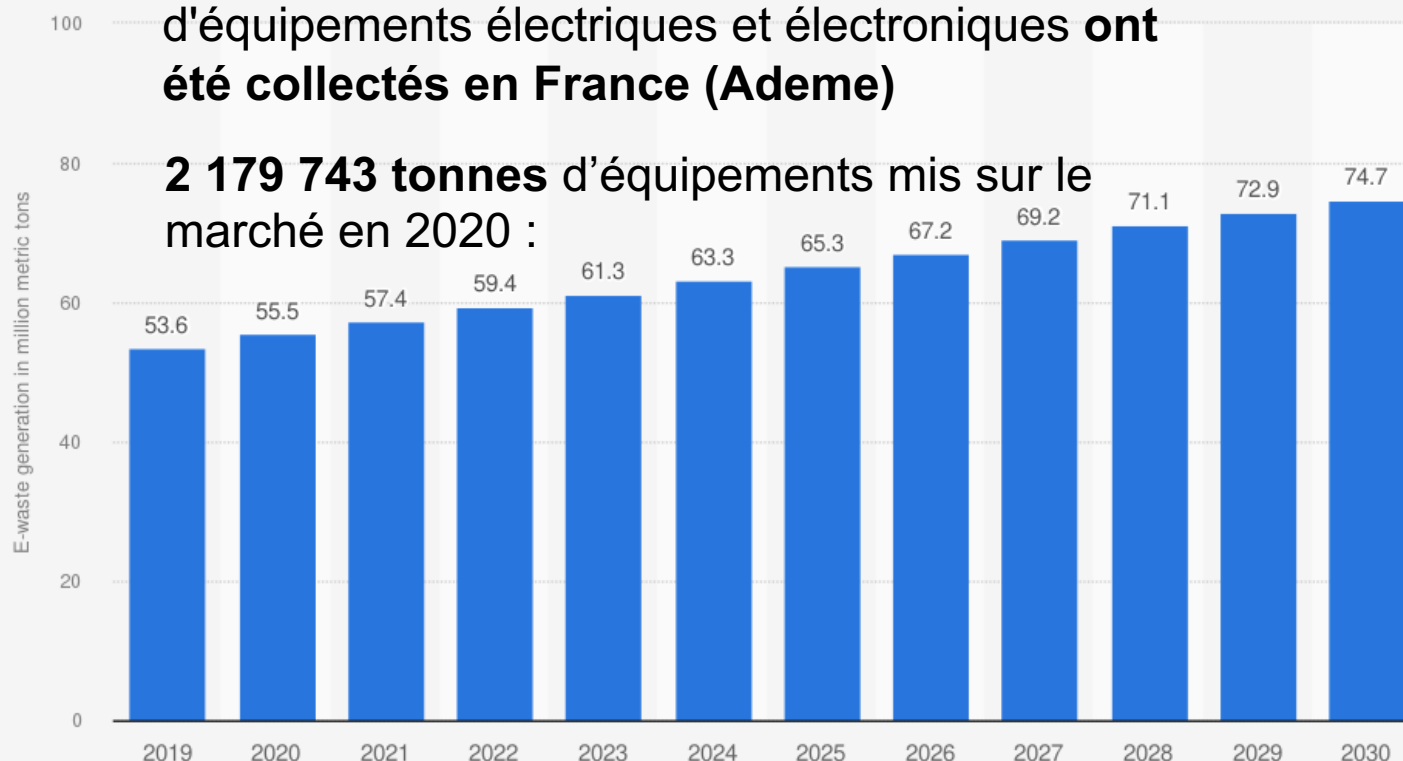


La fin de vie des équipements

Projected electronic waste generation worldwide from 2019 to 2030 (in million metric

tons)*
En 2020, **849 097 tonnes** de déchets
d'équipements électriques et électroniques ont
été collectés en France (Ademe)

2 179 743 tonnes d'équipements mis sur le
marché en 2020 :



Source
United Nations University
© Statista 2024

Additional Information:
Worldwide; United Nations University; 2019 to 2030



Décharge



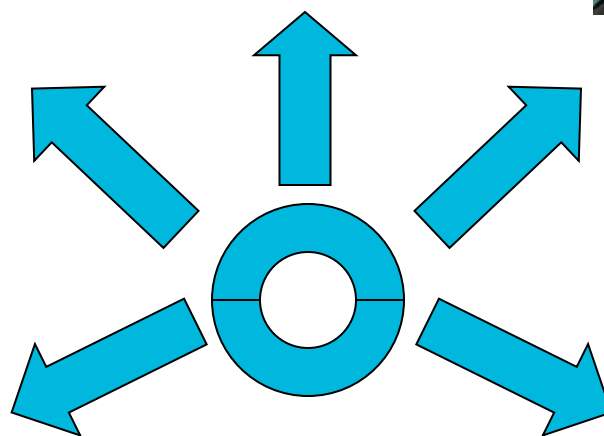
Incinération



Réutilisation



Recyclage



**QUE FAIRE DES
DECHETS?**



Exportation



Que faire des déchets?



Recyclage:

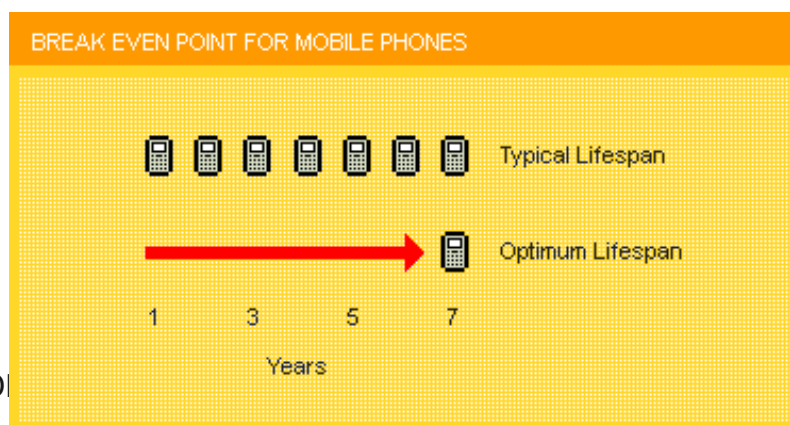
- ☐ Première étape vers la réutilisation des matières
- ☐ Substances chimiques toxiques nécessite la protection des personnes, du voisinage et de l'environnement.
- ☐ Dans les pays « développés »: construction d'usines spécialisées et sécurisées (En Europe, les plastiques ne sont pas recyclés (rejet brome dans l'atmosphère)).
- ☐ Dans les pays « en voie de développement »: Aucun contrôle!

Que faire des déchets?



Réutilisation:

- ❑ Peut améliorer la durée de vie des produits.
- ❑ Exportation des produits « obsolètes »
- ❑ Mais les produits sont déchargés vers ???



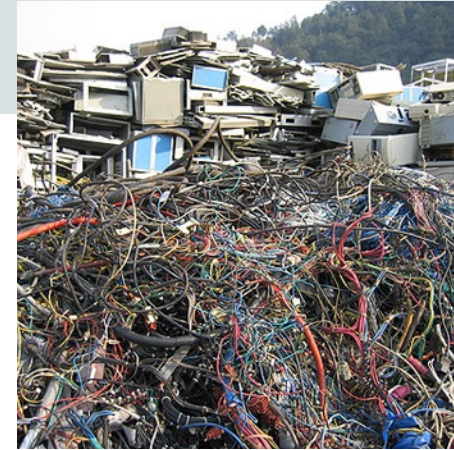
LA FIN DE VIE D
ÉQUIPEMENTS
ÉLECTRONIQUES

Que faire des déchets?



Incinération:

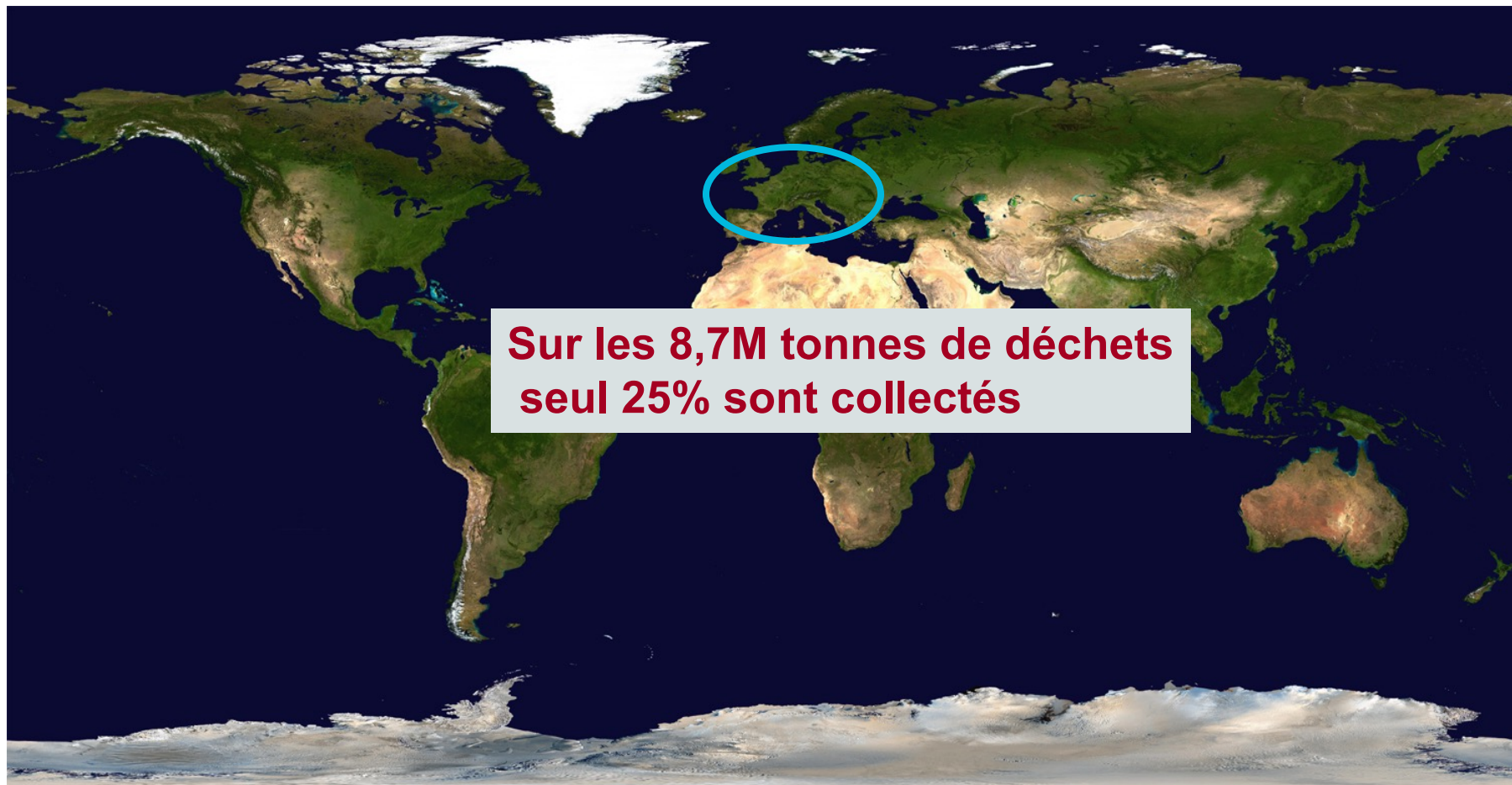
- ❑ Rejet de métaux lourds directement dans l'atmosphère (Plomb, Cadmium,...)
- ❑ Mercure se retrouve dans la chaîne alimentaire (Poisson).
- ❑ Agents ignifugés Bromés et PVC très toxique lorsqu'ils sont brûlés



Enfouissement:

- ❑ Selon US EPA, en 2000 4,6 millions de tonnes ont été entreposés dans des décharges à ciel ouvert. Impact sur l'environnement directe. DEEE représente 2% des déchets mais 70% de la toxicité.
- ❑ En Europe, Une réglementation est appliquée afin de limiter l'enfouissement de substances dangereuses.
- ❑ A Hong Kong 10 à 20% des PC sont jetés directement dans les décharges

Que faire des déchets?



**Sur les 8,7M tonnes de déchets
seul 25% sont collectés**

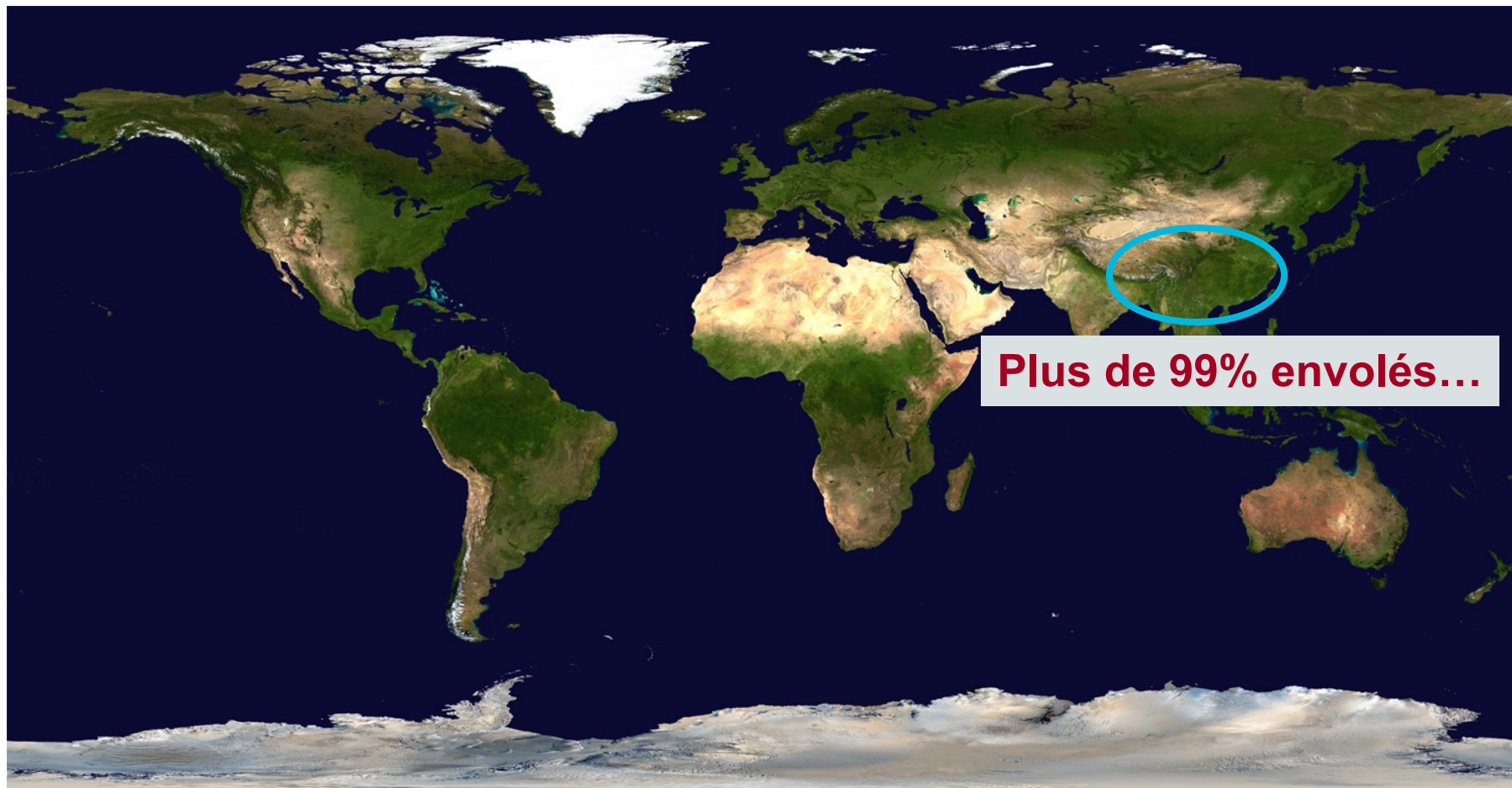
En 2007 Les Nations Unies estimaient entre 20 et 50M tonnes de déchets

LA FIN DE VIE DES
ÉQUIPEMENTS (X 3 pour 2010)
ÉLECTRONIQUES

Que faire des déchets?

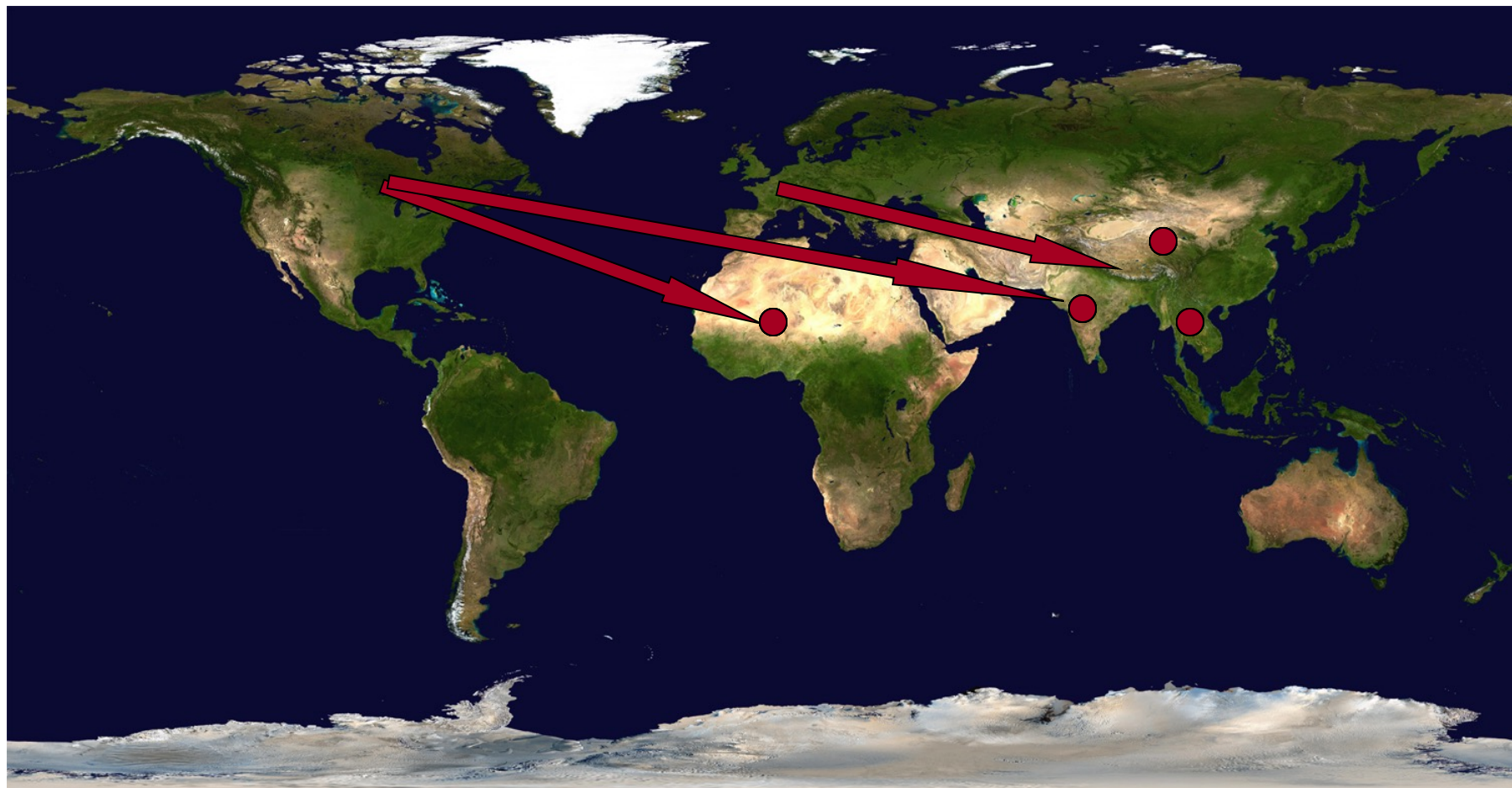


Que faire des déchets?



Plus de 99% envolés...

Que faire des déchets?



Exportation des déchets = Marché opaque et lucratif

LA FIN DE VIE DES
ÉQUIPEMENTS
ÉLECTRONIQUES

« Hidden Flow »

Que faire des déchets?



Que faire des déchets?

E 40



Exportation:

- ❑ Années 70: Lois environnementales pour les déchets dangereux.

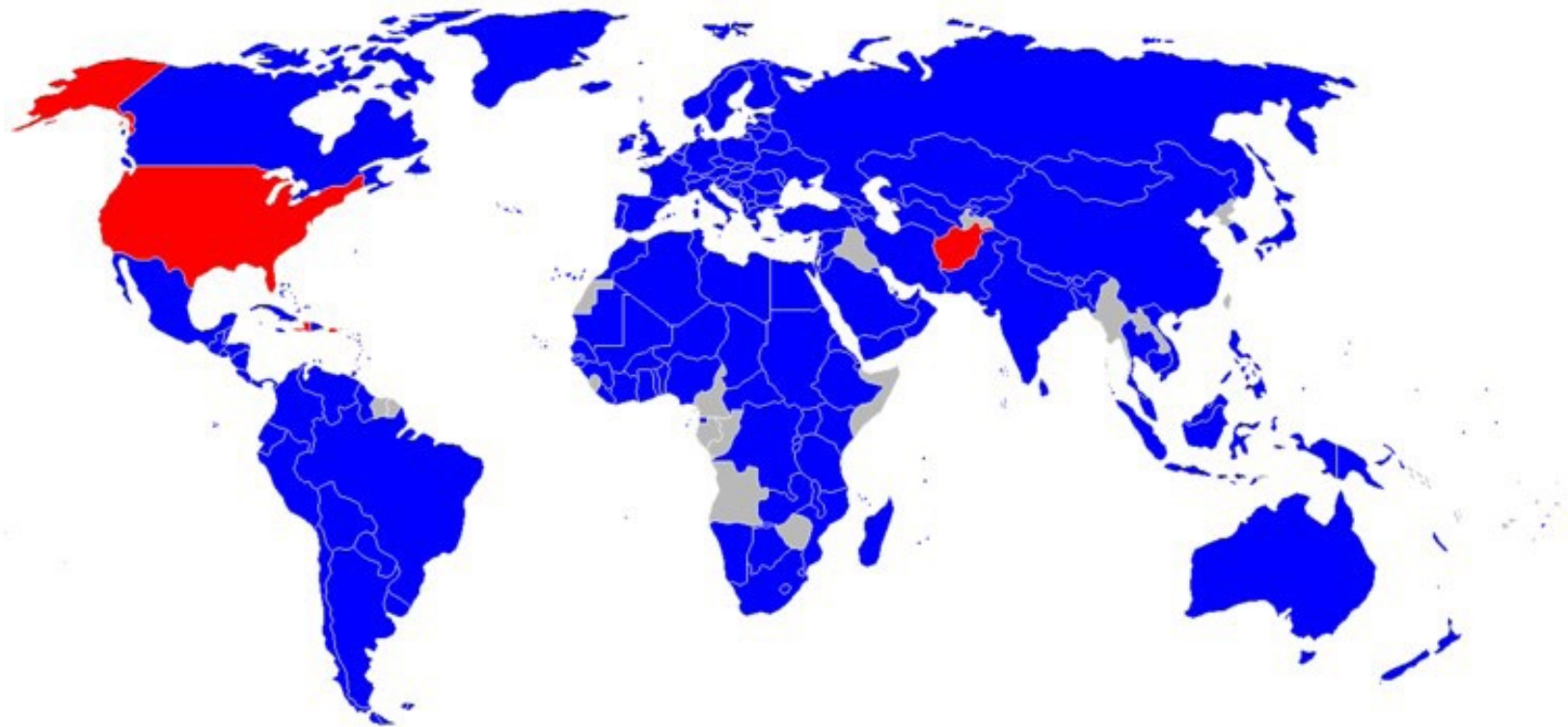
=> Augmentation des coûts de traitements.

- ❑ Transports internationaux moins chers

=> Croissance des flux de déchets à risque

Que faire des déchets?

E 41



LA FIN DE VIE DES
ÉQUIPEMENTS
ÉLECTRONIQUES



Exportation:

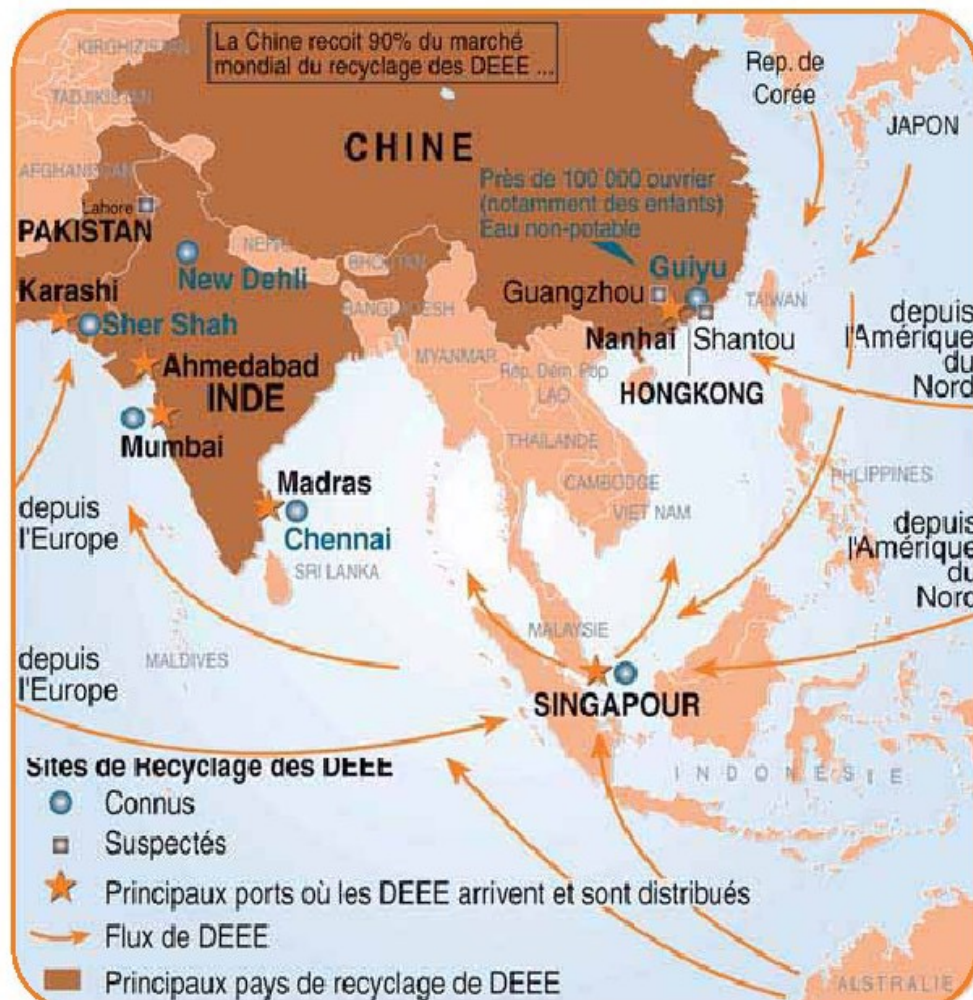
- ❑ En 1995: Extension BAN (Basel Area Network)
 - Interdiction stricte de l'exportation des DEEE
 - 63 pays ont ratifié
 - Opposants: Australie, Canada, USA, Nouvelle zelande ...



Exportation:

- ❑ Transfert régulier des pays « développés » vers ceux « en voie de développement ». Violation des règles internationales (Convention de Bâle)
- ❑ En Inde, 20000 tonnes de déchets sont traités par an par 25000 personnes à Delhi
- ❑ En 2001, la Chine a interdit l'importation des DEEE... Guiyu (Guangdong Province)

Guiyu en Chine



Sources de données: Banque Mondiale "World Development Indicators 2004", The Electronic Waste Guide, BAN, Silicon Valley Toxic Coalition, Toxic Link India, SCOPE, Greenpeace Chine 2002.

ELECTRONIQUES

Guiyu en Chine



LA FIN DE VIE DES
ÉQUIPEMENTS
ÉLECTRONIQUES

Guiyu en Chine



- ❑ 150000 personnes salaire moyen 1\$50/jour (16h)
- ❑ 1M tonne de déchets traités par an
- ❑ Tri + cuisine pour récupérer étain, cuivre, et les alliages pour les soudures.