

PHYSIQUE pour tous !

Cycle d'hiver : 20/27 janvier &
3/10 février 2026

De l'atome aux écomatériaux

PHYSIQUE pour tous !

Chapitre 4 – 1^{ère} partie

Du Moyen Âge à la Renaissance: quand les Matériaux ouvrent les Esprits !



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

Entre 1400 et 1600, 3 matériaux ont changé la vision du monde : le verre, le papier et l'acier

→ à la fin du Moyen-Âge, l'Europe sort des ténèbres



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

Entre 1400 et 1600, 3 matériaux ont changé la vision du monde : le verre, le papier et l'acier

→ à la fin du Moyen-Âge, l'Europe sort des ténèbres

→ seuls 12 éléments chimiques sont connus !



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

Entre 1400 et 1600, 3 matériaux ont changé la vision du monde : le verre, le papier et l'acier

→ à la fin du Moyen-Âge, l'Europe sort des ténèbres

→ seuls 12 éléments chimiques sont connus !

→ ces 3 matériaux vont permettre à des penseurs comme Nicolas de Cues, Giordano Bruno, Copernic ou Galilée de repenser le monde et poser les bases de la science moderne

Pourquoi peut-on dire cela ?



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

Le verre optique : voir l'invisible

- les premières lunettes sont inventées à Florence au XIII^e S. par le physicien Salvino Degli
- mais le verre utilisé à l'époque est de piètre qualité



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

Le verre optique : voir l'invisible

- les premières lunettes sont inventées à Florence au XIII^e S. par le physicien Salvino Degli
- mais le verre utilisé à l'époque est de piètre qualité
- le verre soufflé ultra-pur n'apparaît qu'au XV^e S. à Murano, près de Venise
- ce matériau va permettre l'invention des lentilles optiques



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

Le verre optique : voir l'invisible

→ la lentille optique à base de verre soufflé ultra-pur va permettre des progrès scientifiques inédits



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700



Le verre optique : voir l'invisible

- la lentille optique à base de verre soufflé ultra-pur va permettre des progrès scientifiques inédits
- Nicolas de Cues (1401-1464) propose que l'univers est infini (il est un précurseur de Copernic)
- citation que l'on retrouve dans son ouvrage « De la docte ignorance » : « *la vérité ne peut être atteinte que par des approximations successives, comme une lentille qui focalise la lumière* »
- ses travaux sur l'optique dépendaient des lentilles en verre de l'époque, de plus en plus précises



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



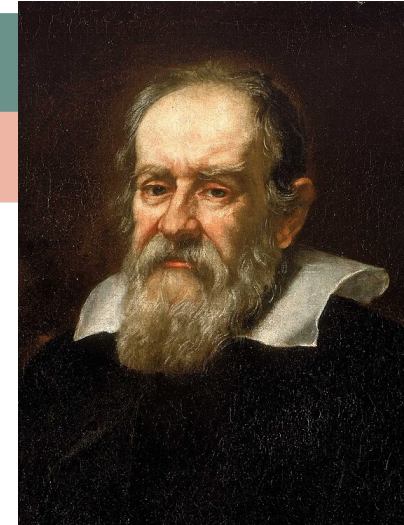
Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700



Le verre optique : voir l'invisible

→ Galilée (1564-1642) utilise une lunette astronomique en 1609 avec des lentilles vénitiennes pour découvrir les lunes de Jupiter et les cratères lunaires



Quand les matériaux ouvrent les esprits !

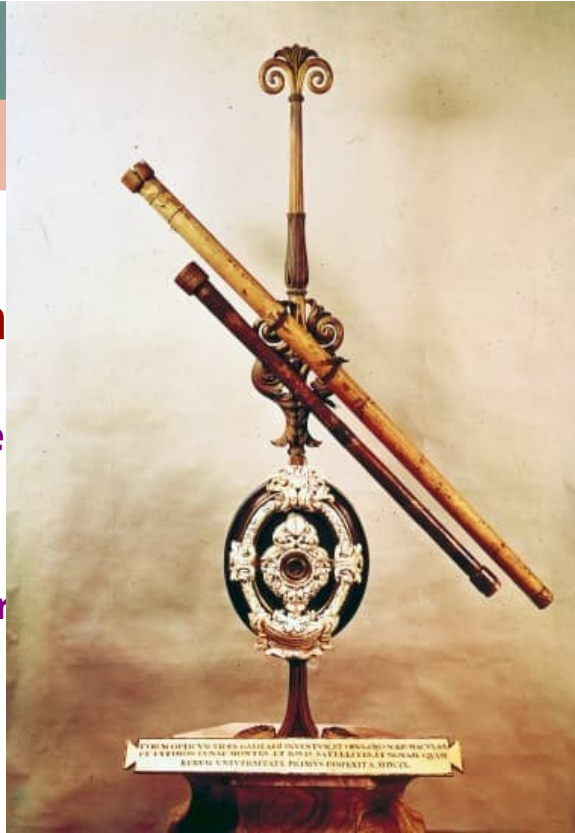


1492

Du
ma

Le verre

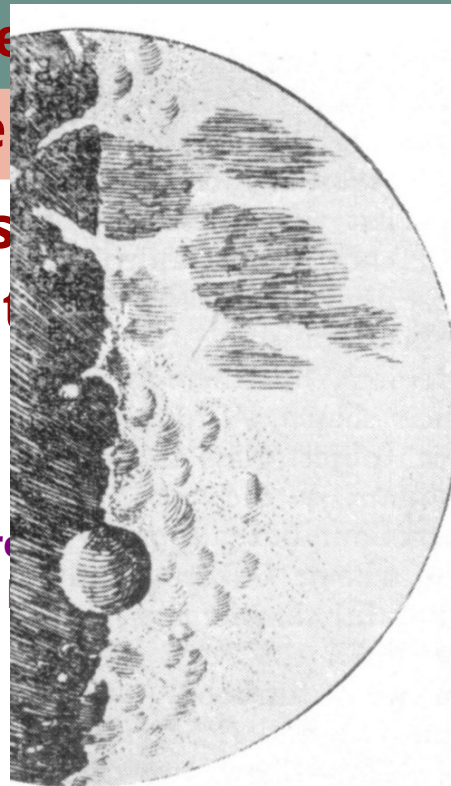
→ Galilée
découvrir



Les deux premières lunettes de Galilée (musée de Physique et d'histoire naturelle, à Florence)

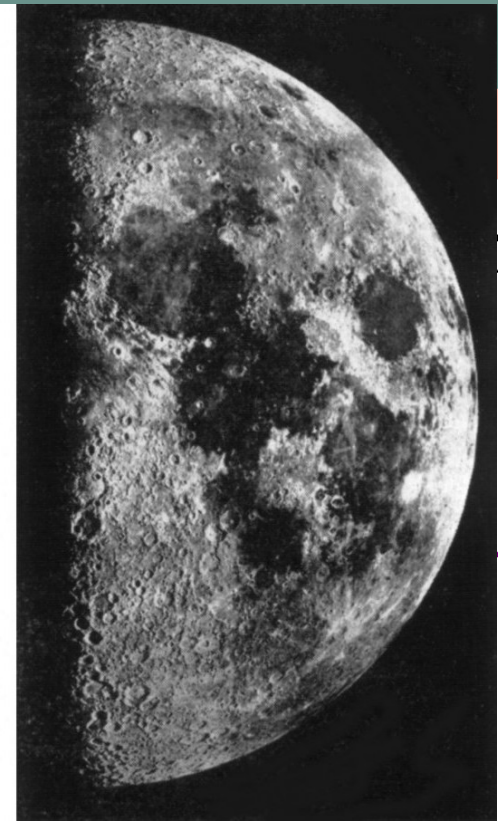
âge
re
ais
pri

astre
eres



Université

de Strasbourg



Les cratères de Lune dessinés
par Galilée (gauche)
Une vraie photo (droite)

700

ur



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

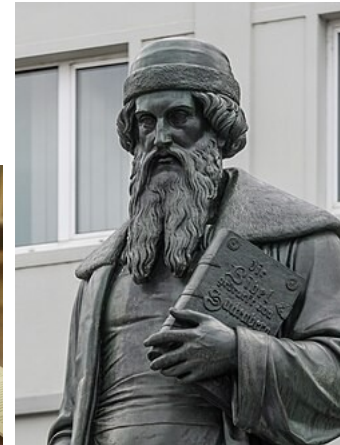
1700

Le papier : l'innovation technique qui diffuse les idées

- le papier de Fabriano est inventé en Italie au XIII^e S.
- il est fabriqué à partir de chanvre et de lin (recyclage de vieux tissus)
- moins cher que le parchemin, il permet la diffusion massive de textes (ex. Bible de Gutenberg, 1455)



Exemplaire de la Bible de Gutenberg
conservé à la New York Public Library



Johannes Gutenberg
(~1400-1468)



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

Le papier : l'innovation technique qui diffuse les idées

- la philosophie profite à plein de cette invention !
- Érasme (1467-1536) utilise le papier pour diffuser ses critiques de l'Église (« Éloge de la folie », 1511)
- sans papier, la Réforme protestante de Luther (1517) n'aurait pas eu le même impact



Érasme
(1466-1536)



Martin Luther
(1483-1546)



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

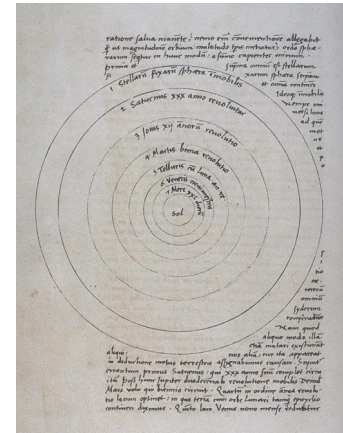
Le papier : l'innovation technique qui diffuse les idées

→ Copernic publie « De Revolutionibus Orbium Coelestium » en 1543, sur papier Fabriano

→ sorti du vieux schéma aristotélicien qui soutenait que c'est le soleil qui tourne autour de la terre, Copernic propose l'héliocentrisme



Nicolaus Copernicus
(1473-1543)



Martin Luther
(1483-1546)



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

Le papier : l'innovation technique qui diffuse les idées

→ en 1582, après une longue période d'études, le calendrier grégorien (calendrier solaire actuel) remplace le calendrier Julien devenu obsolète

→ de nombreux mathématiciens et astronomes jésuites ont travaillé sur la création de ce calendrier



Le pape Grégoire XIII
(1502-1585)



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

Le papier : l'innovation technique qui diffuse les idées

→ c'est dans ce contexte et grâce aux progrès en métallurgie, notamment de l'acier, que vont se développer en Europe différents centres d'activités astronomiques et que l'usage de la boussole et de l'astrolabe se démocratise



Astrolabe planisphérique
des ateliers Jean Fusoris
(France, 1400)



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

Le papier : l'innovation technique qui diffuse les idées

→ dans « De l'Infinito, Universo e Mondi », 1584, Giordano Bruno défend l'infini de l'univers, inspiré par les instruments de navigation (boussoles, astrolabes)



Giordano Bruno
(1548-1600)



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

Le papier : l'innovation technique qui diffuse les idées

→ dans « De l'Infinito, Universo e Mondi », 1584, Giordano Bruno défend l'infini de l'univers, inspiré par les instruments de navigation (boussoles, astrolabes)

→ citation de Bruno :

« *Nous affirmons qu'il existe une infinité de terres, une infinité de soleils et un éther infini* ».



Giordano Bruno
(1548-1600)



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

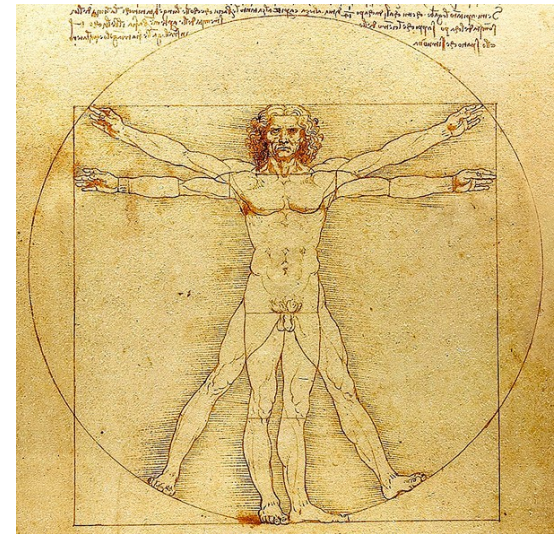
1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

L'acier de Tolède (Espagne) et de Damas (Syrie)

→ les lames flexibles et résistantes (0,5 à 1,5 % de carbone) pour les instruments chirurgicaux permettent les progrès de la médecine





Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

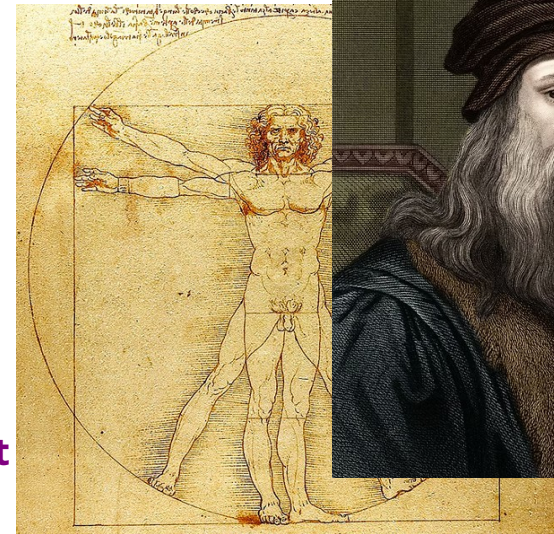
1700

L'acier de Tolède (Espagne) et de Damas (Syrie)

→ les lames flexibles et résistantes (0,5 à 1,5 % de carbone) pour les instruments chirurgicaux permettent les progrès de la médecine

→ Léonard de Vinci était un chercheur de génie, précurseur de l'anatomie

→ plus de 200 planches d'anatomie nous sont connues, mêlant notations, dessins et croquis





Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

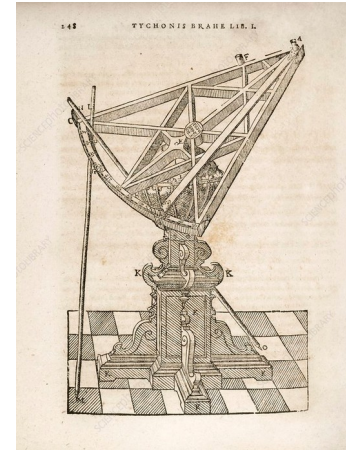
1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

L'acier de Tolède (Espagne) et de Damas (Syrie)

→ Tycho Brahe utilise des instruments en acier pour leur précision (comme le sextant) pour réaliser ses observations du ciel



Le sextant triangulaire
en acier de Tycho Brahe, 1582



Tycho Brahe
(1546-1601)



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

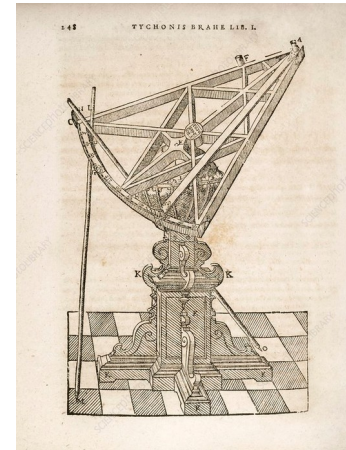
Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

L'acier de Tolède (Espagne) et de Damas (Syrie)

→ Tycho Brahe utilise des instruments en acier pour leur précision (comme le sextant) pour réaliser ses observations du ciel

→ c'est en analysant les observations précises de Tycho Brahe que Kepler découvre que l'orbite des planètes est elliptique et non circulaire et qu'il établit ses lois sur le mouvement des planètes (1609-1619)



Le sextant triangulaire en acier de Tycho Brahe, 1582



Johannes Kepler (1571-1630)



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

C'est aussi l'époque des grands explorateurs

→ Christophe Colomb découvre l'Amérique



Christophe Colomb (1451-1506)
Étudiant, un compas à la main

Christophe Colomb étudiant (page 3).



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

C'est aussi l'époque des grands explorateurs

→ Christophe Colomb découvre l'Amérique

→ Amerigo Vespucci explore l'Amérique du sud

→ Vasco de Gama découvre la route des Indes maritimes



Vasco de Gama
(1460-1524)



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

Du Moyen-Âge à la Renaissance : quand les matériaux ouvrent l'esprit !

1700

C'est aussi l'époque des grands explorateurs

- Christophe Colomb découvre l'Amérique
- Amerigo Vespucci explore l'Amérique du sud
- Vasco de Gama découvre la route des Indes maritimes
- Magellan fait le tour du monde



Fernand de Magellan
(1480-1521)



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

La transition vers la révolution scientifique

1700

Les matériaux ne sont pas que de la matière inerte : ils sont les outils qui ont permis à l'homme de repenser sa place dans l'univers !

→ le verre, le papier et l'acier ont permis :

- l'observation : Galilée → télescope
- la diffusion : Gutenberg → imprimerie
- la mesure : Kepler → instruments en acier



Quand les matériaux ouvrent les esprits !



Moyen-âge - Renaissance

L'âge de la remise en question

1492

La transition vers la révolution scientifique

1700

De nouveaux défis attendent maintenant les hommes !

→ **XVII^e S. : la science devient expérimentales**

→ **révolution industrielle : le charbon et l'acier vont changer le monde...mais aussi le détruire !**

PHYSIQUE pour tous !

Chapitre 4 - 2ème partie

La révolution industrielle



Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Charbon, acier, pollution : le prix du progrès

1900

Charbon et machines à vapeur :

- une nouvelle énergie clé : le CHARBON MINÉRAL !
- le charbon de coke va permettre de fondre le fer : métallurgie → sidérurgie
- la machine à vapeur est inventée (Newcomen, 1712) → révolution des transports (trains, bateaux)
- procédé Bessemer (1856) : permet la production de masse de l'acier



Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Charbon, acier, pollution : le prix du progrès

1900

L'homme redécouvre ce que la nature a à lui offrir, mais sans retenue !

- avant 1700, seuls 12 éléments chimiques étaient connus !
- en 1900, les scientifiques en connaîtront 80 !
- de 1792 à 1849, 24 éléments vont être identifiés dont Al, B, Br, Cd, Ca, Cé, Li, Mg, Na, Ti...
- de 1850 à 1899, 24 autres le seront dont Cé, Ga, Ge, Hé, In, Kr, Né, Po, Ra, Rb, Sc, Tl, Xé...



1700

Tableau périodique des éléments chimiques

Groupe		Tableau périodique des éléments chimiques																VIII A																			
Période		I A												III B		IV B		V B		VI B		VII B		18													
1	↓	Hydrogène 1 H 1,007975		II A																						Hélium 2 He 4,002602											
2		Lithium 3 Li 6,9395		Béryllium 4 Be 9,0121831		← nom de l'élément (gaz , liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa) ← numéro atomique ← symbole chimique ← masse atomique relative [ou celle de l'isotope le plus stable] ⚖ [CIAAW "Atomic Weights 2013" + rev. 2015]										Bore 5 B 10,8135		Carbone 6 C 12,0106		Azote 7 N 14,006855		Oxygène 8 O 15,99940		Fluor 9 F 18,99840316		Néon 10 Ne 20,1797 (6)											
3		Sodium 11 Na 22,98976928		Magnésium 12 Mg 24,3055		III A		IV A		V A		VI A		VII A		VIII		I B		II B		Aluminium 13 Al 26,9815385		Silicium 14 Si 28,085 (1)		Phosphore 15 P 30,97376200		Soufre 16 S 32,0675		Chlore 17 Cl 35,4515		Argon 18 Ar 39,948 (1)					
4		Potassium 19 K 39,0983 (1)		Calcium 20 Ca 40,078 (4)		Scandium 21 Sc 44,955908 (5)		Titane 22 Ti 47,867 (1)		Vanadium 23 V 50,9415 (1)		Chrome 24 Cr 51,9961 (6)		Manganèse 25 Mn 54,938044		Fer 26 Fe 55,845 (2)		Cobalt 27 Co 58,933194		Nickel 28 Ni 58,6934 (4)		Cuivre 29 Cu 63,546 (3)		Zinc 30 Zn 65,38 (2)		Gallium 31 Ga 69,723 (1)		Germanium 32 Ge 72,630 (8)		Arsenic 33 As 74,921595		Sélénium 34 Se 78,971 (8)		Brome 35 Br 79,904		Krypton 36 Kr 83,798 (2)	
5		Rubidium 37 Rb 85,4678 (3)		Strontium 38 Sr 87,62 (1)		Yttrium 39 Y 88,90584		Zirconium 40 Zr 91,224 (2)		Niobium 41 Nb 92,90638		Molybdène 42 Mo 95,94		Technétium 43 Tc [98]		Ruthénium 44 Ru 101,07 (2)		Rhodium 45 Rh 102,90550		Palladium 46 Pd 106,42		Argent 47 Ag 107,8682		Cadmium 48 Cd 112,411		Indium 49 In 114,818 (1)		Étain 50 Sn 118,710 (7)		Antimoine 51 Sb 121,760 (1)		Tellure 52 Te 127,60 (3)		Iode 53 I 126,90447		Xénon 54 Xe 131,293 (6)	
6		Césium 55 Cs 132,905452		Baryum 56 Ba 137,327 (7)		Lanthanides 57-71		Hafnium 72 Hf 178,49 (2)		Tantale 73 Ta 180,94788		Wolfram 74 W 183,84		Réhenium 75 Re 186,207 (1)		Iridium 76 Ir 192,222 (1)		Platine 77 Pt 195,084		Or 78 Au 196,96657		Mercur 80 Hg 200,59		Thallium 81 Tl 204,3835		Plomb 82 Pb 207,2 (1)		Bismuth 83 Bi 208,98040		Polonium 84 Po [209]		Astate 85 At [210]		Radon 86 Rn [222]			
7		Francium 87 Fr [223]		Radium 88 Ra [226]		Actinides 89-103		Rutherfordium 104 Rf [261]		Dubnium 105 Db [262]		Seaborgium 106 Sg [266]		Berkélium 107 Bk [267]		Kalifornium 108 Cf [271]		Einsteinium 109 Es [272]		Fermium 110 Fm [277]		Mendelevium 111 Md [281]		Nobelium 112 No [285]		Livermorium 116 Lv [293]		Tenneesse 117 Ts [294]		Oganesson 118 Og [294]							

Métaux						Non métaux								
Alcalins	Alcalino-terreux	Lanthanides	Actinides	Métaux de transition	Métaux pauvres	Métalloïdes	Autres non-métaux	Halogènes	Gaz nobles	Non classés	primordial	désintégration d'autres éléments	synthétique	



Pollution : le prix du progrès !



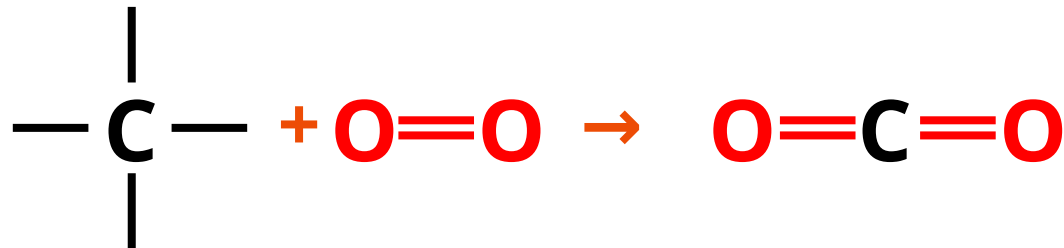
Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Charbon : impact environnemental

1900





Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Charbon : impact environnemental

1900

1 tonne de charbon = 3,5 tonnes de CO₂ !





Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Charbon et acier : impact sanitaire

1900

Smog industriel de Londres en 1873 : 700 morts en 1 semaine !!

→ poussière industrielle 'bicolore' :

→ rouge du minerai de fer

→ noir du charbon



Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

La machine à vapeur de James Watt (1769)

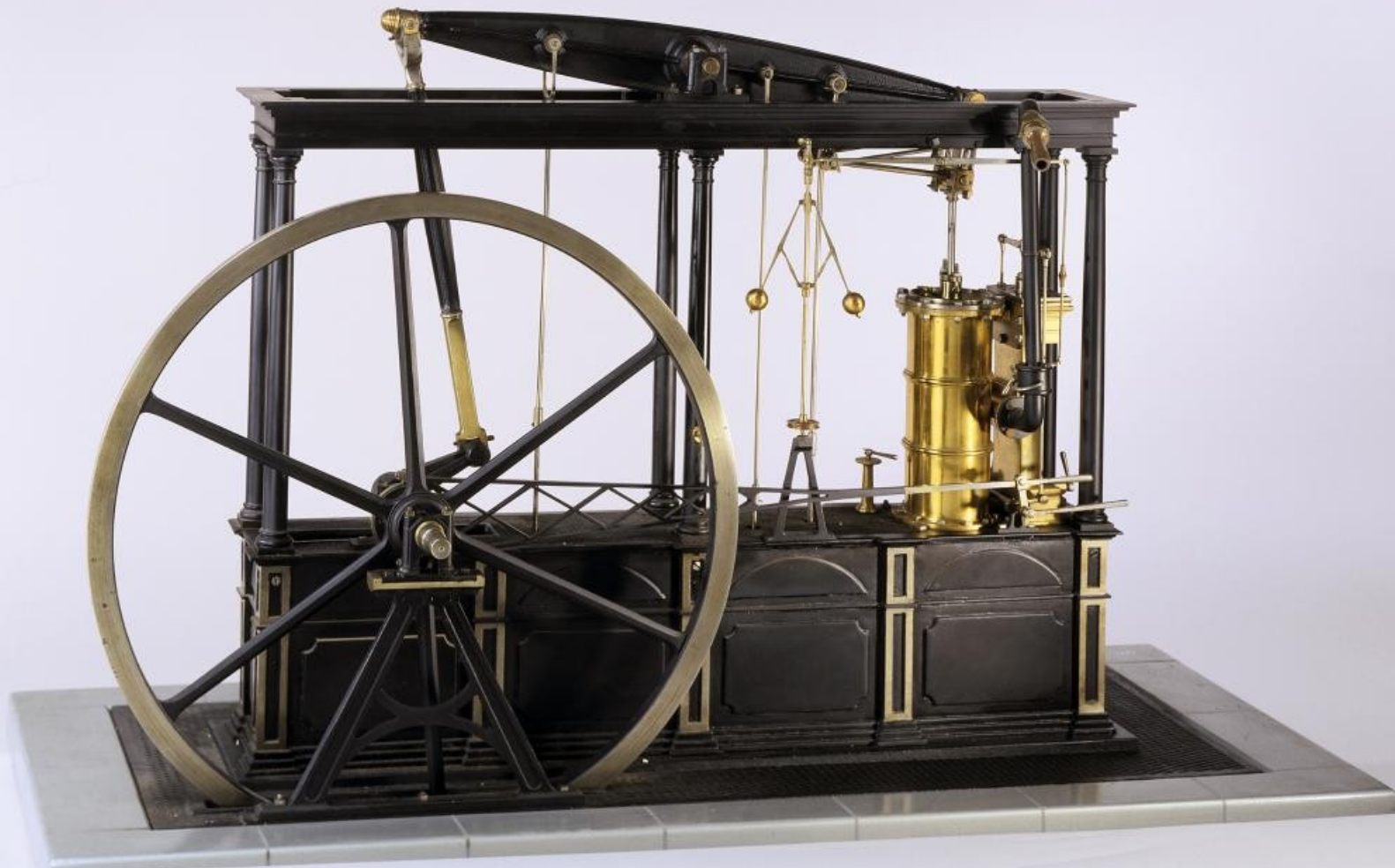
1900



1700



1900





1700

La machine à vapeur

la machine à vapeur de James Watt

WATT : La machine à vapeur

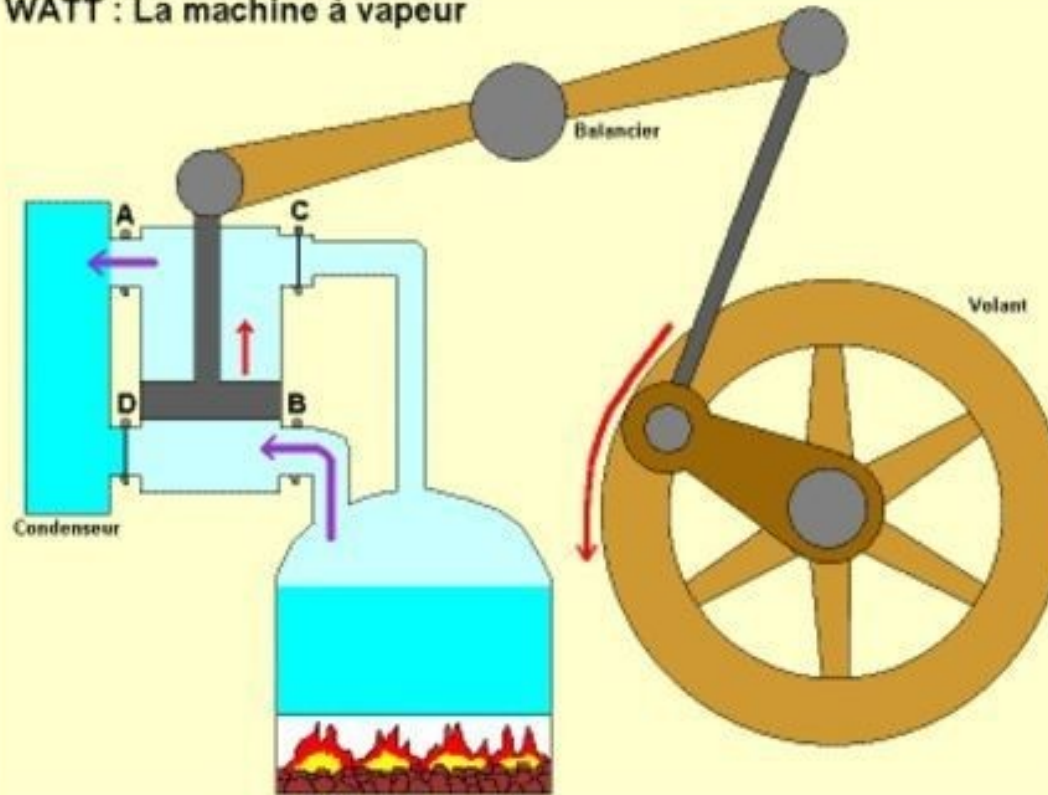


schéma de fonctionnement de la machine de Watt



1900



1700

35 billion t

30 billion t

25 billion t

20 billion t

15 billion t

10 billion t

5 billion t

0 t

1750

1800

1850

1900

1950

2021

World



1900



Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Acier et urbanisation

1900

De nouveaux défis attendent maintenant les hommes !

→ l'acier sert de squelette pour les ponts, les rails, les premiers gratte-ciels

→ Tour Eiffel, 1889, 7 300 tonnes de structure métallique...



Pollution : le prix du progrès !



1700

Acier et urbanisation

1900

Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

Pollution et santé

- Scories, déchets des haut-fourneaux : sols pollués par les métaux lourds
- déforestation pour le charbon de bois (avant l'avènement du coke)
- maladies : silicose (poussière de charbon)
- travail des enfants...



Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Santé publique et conditions ouvrières

1900

Certains patrons d'exploitations minières, comme Charles Vane, troisième marquis de Londonderry, s'obstinent à défendre à la Chambre des Lords, au nom de l'Association des propriétaires de mines du Yorkshire, le droit d'employer des « moutards » au fond.



Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Santé publique et conditions ouvrières

1900

Plusieurs catastrophes alertent l'opinion publique britannique sur la question du travail des enfants. À l'été 1838, dans le sud du comté de Yorkshire, des pluies torrentielles provoquent une inondation du fond qui cause la mort de 26 enfants, âgés de 8 à 17 ans.



1700



1900

En Angleterre, ce n'est qu'en 1842 qu'une loi a réglementé le travail des enfants, notamment dans les mines de charbon



Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900



Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

"De l'arbre à hévéa au pneu moderne : comment le soufre a tout changé"



Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

Contexte historique :

- le caoutchouc naturel (latex de l'hévéa) est utilisé par les Aztèques et les Mayas depuis longtemps
- ils en faisaient des balles, des sandales etc.
- mais ce latex se ramollissait fortement à la chaleur et durcissait avec le froid
- ce qui le rendait impossible à utiliser pour des applications industrielles (ex. pneus de voitures)



Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

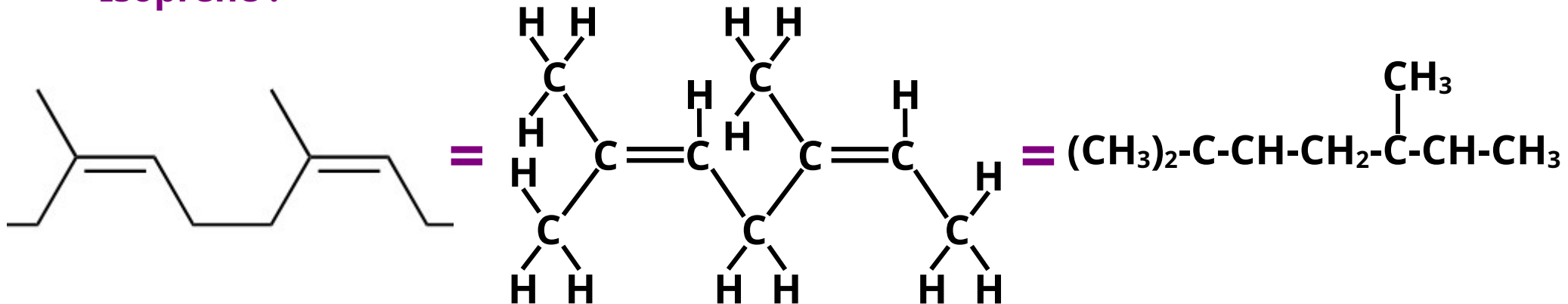
L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

Isoprène :





Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

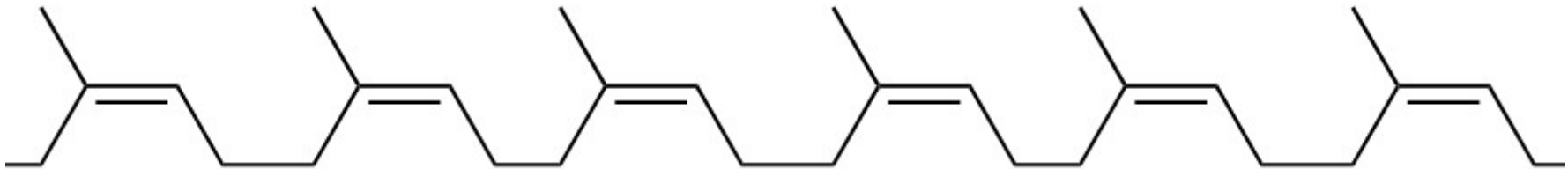
L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

Polyisoprène :





Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

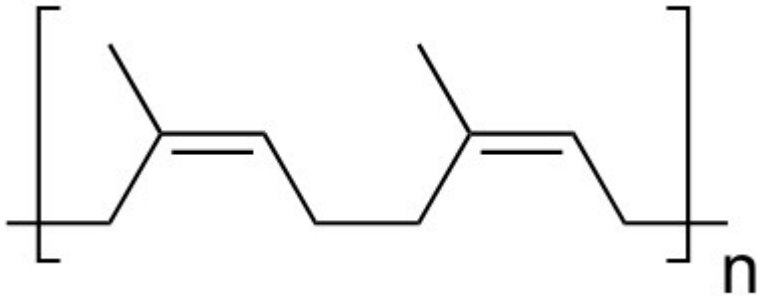
L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

Polyisoprène :





Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

La vulcanisation (Charles Goodyear, 1839) :

→ l'ajout de souffre (1 à 3%) dans l'hévéa + chauffage (140-160°C) → vulcanisation

→ des ponts disulfure (-S-S-) se forment entre les chaînes de polymère

→ cela transforme la molécule en réseau 3D :

Polyisoprène (caoutchouc) + soufre → caoutchouc vulcanisé (réseau 3D)



Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

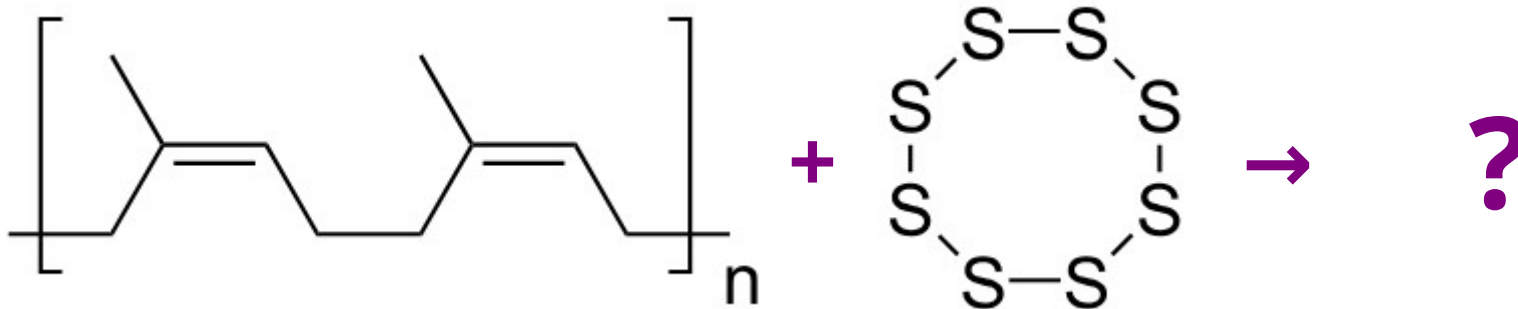
L'Ère du Charbon et de l'Acier

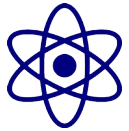
1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

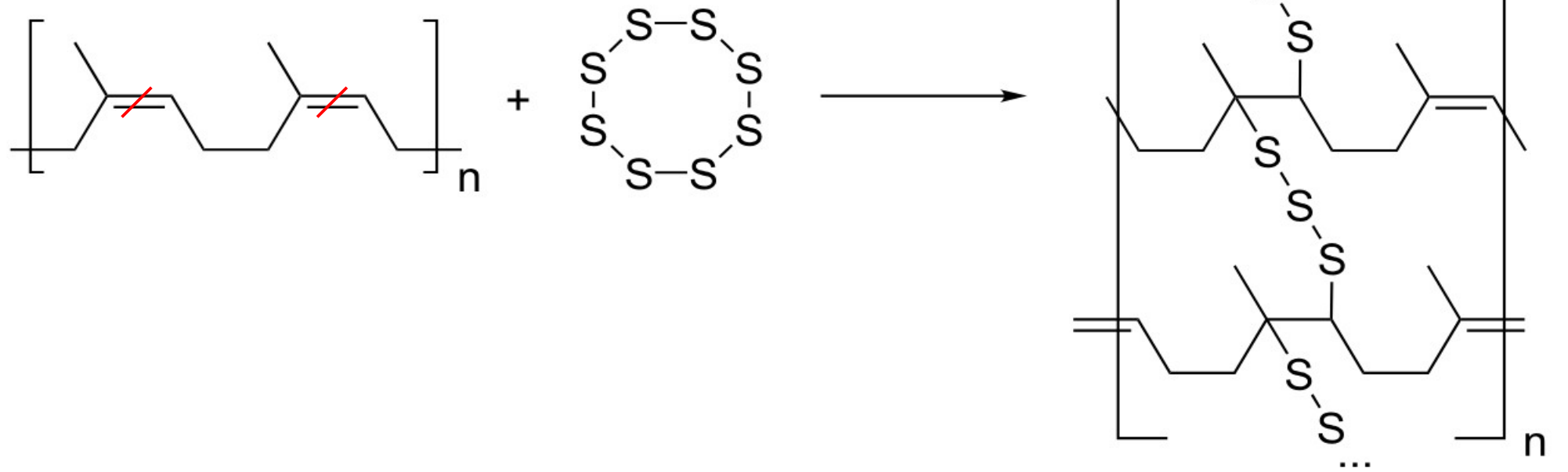
1900

Polyisoprène :





Polyisoprène vulcanisé :





Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

La vulcanisation (Charles Goodyear, 1839) :

- résistance mécanique : x 10
- stabilité thermique : ne fond plus
- élasticité : conserve de bonnes propriétés, idéales pour des pneumatiques



Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

Le caoutchouc vulcanisé : impact environnemental

- le soufre est une ressource abondante
- actuellement, on l'extrait du pétrole dont il est un sous-produit
- l'hévéa est produit dans des plantations intensives → déforestation en Asie du Sud-Est

TODAY

Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

Structure d'un pneu moderne : un composite complexe !

→ Un pneu = 200 matériaux et 5 couches différentes !

TODAY

Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

Les pneus : les matériaux clés :

- le caoutchouc synthétique : styrène-butadiène (SBR), un dérivé du pétrole
- noir de carbone : renforce la résistance (il est issu de la combustion complète d'huiles)
- silice (SiO_2) : améliore l'adhérence sur sol mouillé (remplace partiellement le noir de C)
- fibres textiles : polyester ou nylon pour la carcasse

TODAY

Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Révolutions Industrielles

Carbon et de l'Acier



1700

1900

du caoutchouc (1839)

1. la bande de roulement (gomme pneu)
2. les nappes ceintures (gomme pneu résistant à l'usure)
3. la carcasse : câbles fin d'acier ou fibre synthétique
4. les tringles : câbles d'acier tressé
5. les flancs : gomme pneu rigide

TODAY

Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Composition typique d'un pneu (2024)

Couche	Matériaux	Rôle	% en masse
Bande de roulement	Caoutchouc synthétique (SBR) + silice	Adhérence et usure	30 %
Nappe de sommet	Fibres d'acier ou Kevlar	Résistance au choc	15 %
Flancs	Caoutchouc naturel + noir de carbone	flexibilité	10 %
Carcasse	Câble d'acier ou polyester	Structure porteuse	25 %
Tringle	Fil d'acier enrobé de caoutchouc	Ancrage sur la jante	5 %
Additifs	Souffre, huiles, antioxydants	Vulcanisation et protection	15 %



Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

Problèmes environnementaux :

→ pétrole : 60 % des matériaux d'un pneu sont issus du pétrole

→ noir de carbone : lorsque le pneu roule, émission de particules fines polluantes de suie

→ durée de vie : un pneu s'use en 50 000 km :

→ 600 millions de pneus usagés / an en Europe !



Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

Recyclabilité des pneus, défis et solutions :

→ composite complexe : mélange de caoutchouc, acier et textile → difficile à séparer



Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

Recyclabilité des pneus, défis et solutions :

- composite complexe : mélange de caoutchouc, acier et textile → difficile à séparer
- la pyrolyse (chauffage à 500°C sans oxygène) propose une solution partielle :
 - elle produit du gaz, une huile réutilisable comme carburant et du noir de C
 - inconvénient : coûteuse en énergie (chauffage) et émission de CO₂



Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

Recyclabilité des pneus, défis et solutions :

- composite complexe : mélange de caoutchouc, acier et textile → difficile à séparer
- la pyrolyse (chauffage à 500°C sans oxygène) propose une solution partielle :
 - elle produit du gaz, une huile réutilisable comme carburant et du noir de C
 - inconvénient : coûteuse en énergie (chauffage) et émission de CO₂
- pneus abandonnés = risques d'incendie (libèrent des toxines) et niches à moustiques



Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

Méthode	Avantages	Limites	Exemple
Broyage (granulats)	Réutilisation pour routes, terrains de sport	Libère des microplastiques	Revêtement de stades
Pyrolyse	Récupère 60 % d'huile réutilisable	Coûteuse en énergie	Société Pyrolisis (Pays-Bas)
De-vulcanisation	Recycle le caoutchouc en nouveaux pneus	Chimique, peu industrialisée	Projet DeLink
Valorisation énergétique	Brûlé dans des cimenteries	Émissions de CO ₂	LafargeHolcim (France)

TODAY

Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

Innovations durables :

TODAY

Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

Innovations durables :

→ pneus « verts » :

→ silice + caoutchouc naturel (ex. pneus Michelin « Energy Saver »)

TODAY

Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

Innovations durables :

→ pneus « verts » :

→ silice + caoutchouc naturel (ex. pneus Michelin « Energy Saver »)

→ pneus biodégradables : recherche sur des polymères à base d'algues ou de guayule (plante alternative à l'hévéa)

TODAY

Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

Innovations durables :

→ pneus « verts » :

→ silice + caoutchouc naturel (ex. pneus Michelin « Energy Saver »)

→ pneus biodégradables : recherche sur des polymères à base d'algues ou de guayule (plante alternative à l'hévéa)

→ recyclage biologique :

→ des bactéries savent décomposer le caoutchouc (ex. Pseudomonas)

→ des champignons savent décomposer les additifs pétrochimiques (ex. Aspergillus)

TODAY

1700 V



TODAY

1900



TODAY

Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Vulcanisation : la révolution du caoutchouc (1839)

1900

Dépassement de la limite planétaire :

- 90 % des pneus finissent en décharge ou incinérés
 - dépassement des capacités de recyclage naturel
- des recherches sont menées sur des alternatives biosourcées (guayule, algues)
- recyclabilité et économie circulaire : Michelin vise 100 % de pneus recyclés d'ici 20250



Pollution : le prix du progrès !



Révolutions Industrielles

L'Ère du Charbon et de l'Acier

1700

Santé publique et conditions ouvrières

1900

"Le charbon, l'acier et le caoutchouc vulcanisé ont construit le monde moderne, mais au prix d'une pollution sans précédent. Au XX^e siècle, un nouveau matériau va tout changer : le plastique, dérivé du pétrole."

PHYSIQUE pour tous !

Chapitre 4 - 3ème partie

Le début de la fin ??



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Plastiques, semi-conducteurs et composites

2000



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Plastiques : la révolution pétrochimique

2000

Petite histoire des polymères :

- le premier matériaux polymère clé : la bakélite (1907)
- le polyéthylène apparaît en 1933
- peu de temps après, en 1935, le nylon arrive → premiers textiles synthétiques
- les premiers emballages en plastique arrivent en 1950 → consommation de masse



Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Plastiques : la révolution pétrochimique

2000

Petite histoire des polymères :

- en 2024, 400 millions de tonnes de plastiques ont été produits
- microplastiques : 5 000 milliards de particules dans les océans
- le plastique est non biodégradable : durée de vie = 450 ans !



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Plastiques : la révolution pétrochimique

2000

C'est quoi la bakélite ?



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

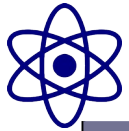
1900

Plastiques : la révolution pétrochimique

2000

C'est quoi la bakélite ?

- le premier plastique fait de polymère synthétique
- développé entre 1907 et 1909 par le belge Léo Baekeland
- polycondensation entre du phénol et du méthanal



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

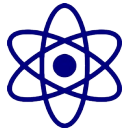
1900

Plastiques : la révolution pétrochimique

2000

Bakélite : c'est quoi la polycondensation ?

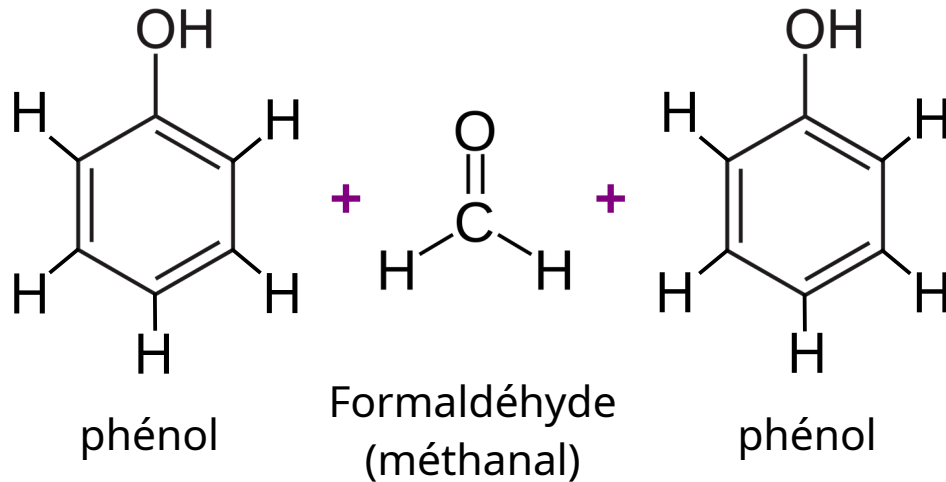
→ c'est comme en cuisine : quand on chauffe, on évapore de l'eau !

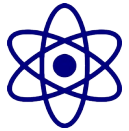


Pollution : le prix du progrès !

Plastiques : la révolution pétrochimique

Bakélite : c'est quoi la polycondensation ?

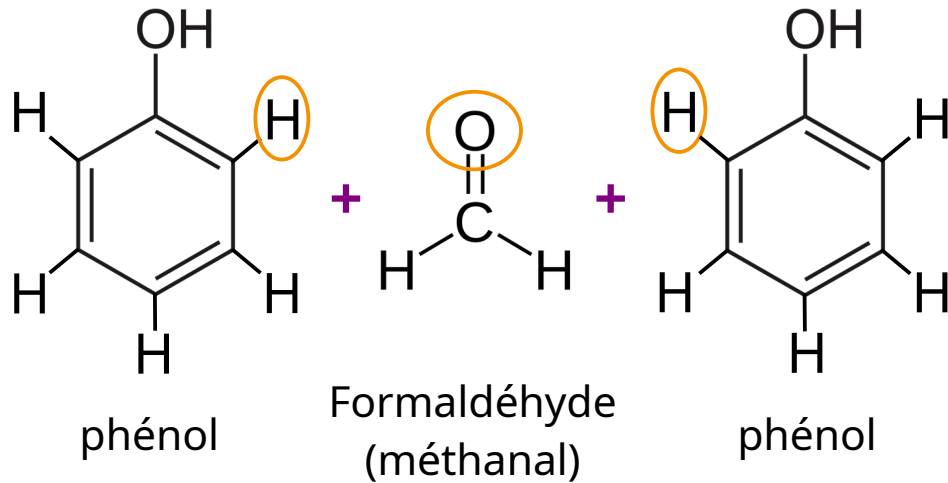


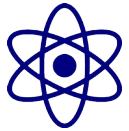


Pollution : le prix du progrès !

Plastiques : la révolution pétrochimique

Bakélite : c'est quoi la polycondensation ?

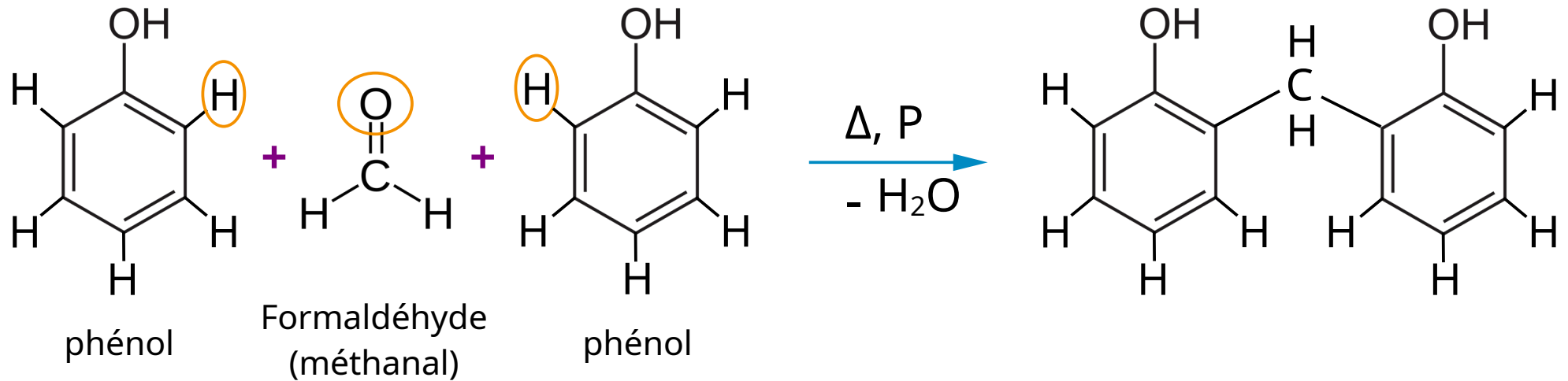


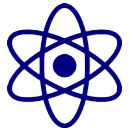


Pollution : le prix du progrès !

Plastiques : la révolution pétrochimique

Bakélite : c'est quoi la polycondensation ?

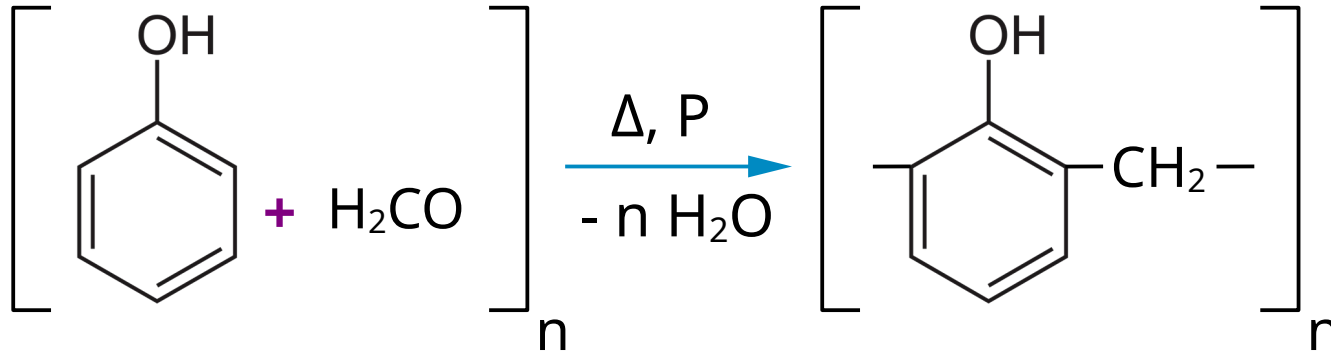


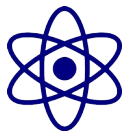


Pollution : le prix du progrès !

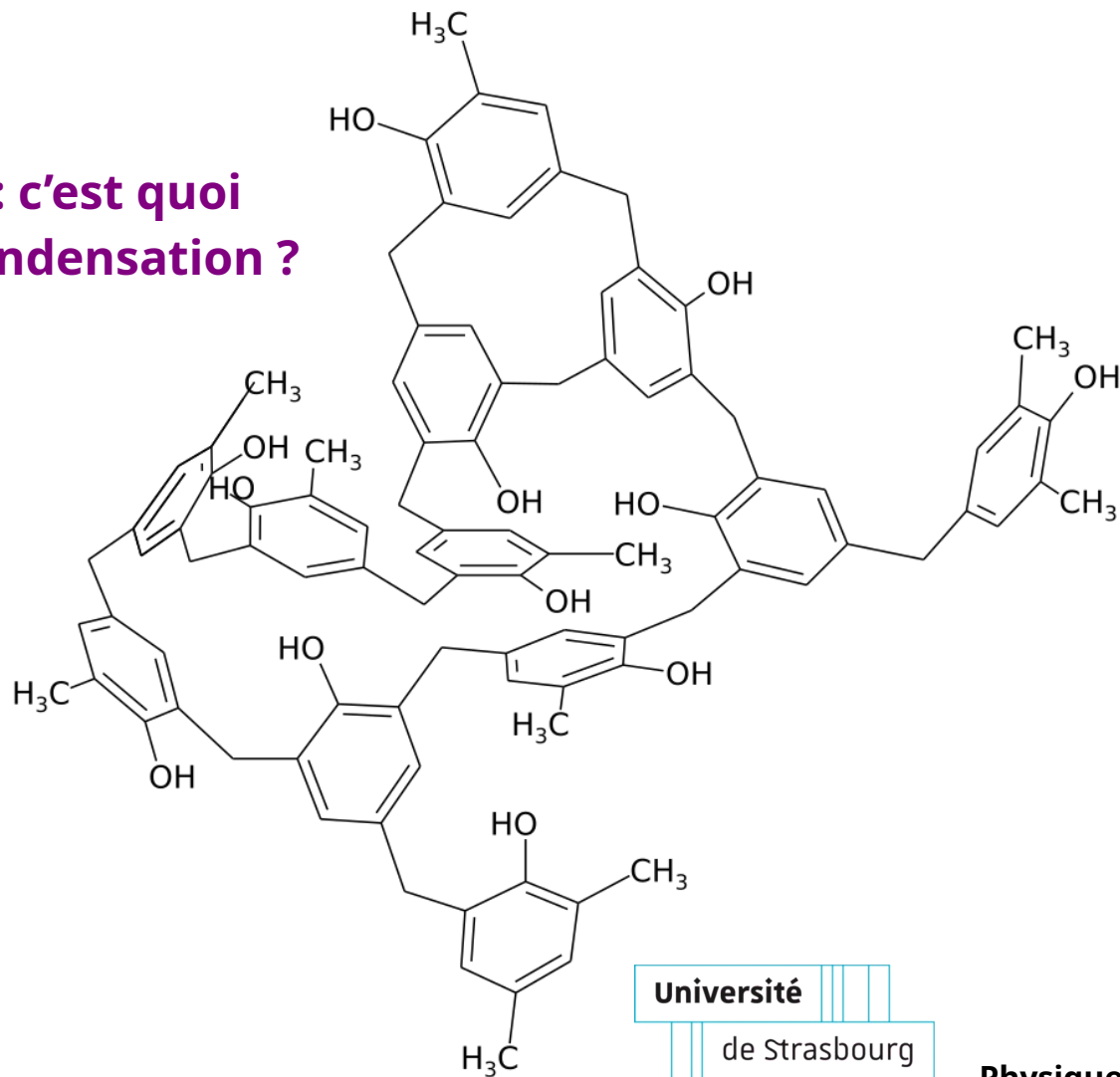
Plastiques : la révolution pétrochimique

Bakélite : c'est quoi la polycondensation ?





Bakélite : c'est quoi la polycondensation ?





Pollution : le prix du progrès !

Plastiques : la révolution pétrochimique

Bakélite :



Microphone (vers 1930)



Téléphone PTT24 (PTT, 1942)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

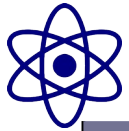
1900

Plastiques : la révolution pétrochimique

2000

C'est quoi la bakélite ?

- utilisée dans la 1ère moitié du XX^e S. pour ses propriétés isolantes, thermorésistantes et esthétiques
- fabrication en masse d'objets techniques ou de la vie quotidienne
- les objets en bakélite font aujourd'hui la joie des collectionneurs d'accessoires rétros
Art déco



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

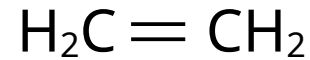
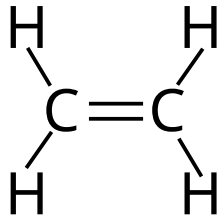
1900

Plastiques : la révolution pétrochimique

2000

Le polyéthylène

→ ce terme désigne les polymères à base d'éthylène :





Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Plastiques : la révolution pétrochimique

2000

Le polyéthylène

- le polyéthylène, ou PE, est issu de la pétrochimie
- c'est le plastique le couramment utilisé dans le monde !
- inventé par un chimiste allemand, Hans von Pechmann, en 1898



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

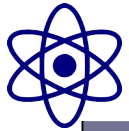
1900

Plastiques : la révolution pétrochimique

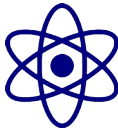
2000

Le polyéthylène

- simple et peu cher, PE = 100 millions de tonnes / an
- c'est 1/3 des plastiques produits
- c'est 1/2 des emballages produits



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

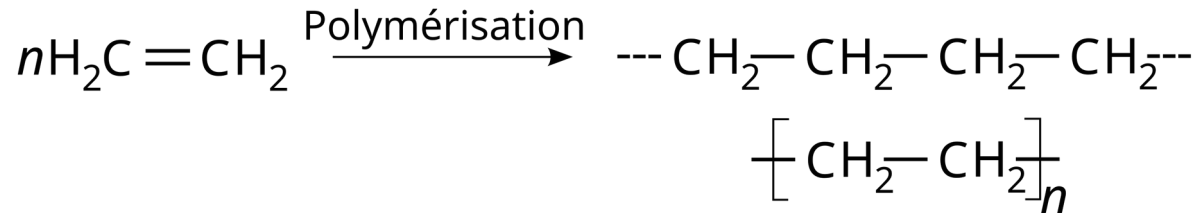
L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

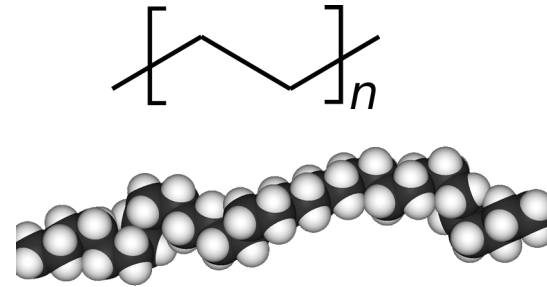
Plastiques : la révolution pétrochimique

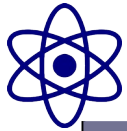
C'est quoi le polyéthylène ?



Monomère :
éthylène

Polymère :
polyéthylène





Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Plastiques : la révolution pétrochimique

2000

C'est quoi le polyéthylène ?

- le PE est une polyoléfine (monomère avec liaison double), comme le polypropylène (PP) et le polystyrène (PS)
- mais contrairement au PP, la résistance mécanique du PE fléchit très vite dès 75-90°C
- sa nature paraffinique (des liaisons covalentes uniquement) explique sa grande inertie chimique
- c'est aussi ce qui explique qu'il produise beaucoup de micro-plastiques !



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Plastiques : la révolution pétrochimique

2000

Polyéthylène : impacts environnementaux et sanitaires

- la combustion de PE dégage plus de 200 gaz différents !
- certains sont toxiques : furanes, acétaldéhyde, hydrocarbures insaturés, benzène, acide acétique, acide propanoïque, NO, CO et CO₂
- ce sont des polluants atmosphériques



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Plastiques : la révolution pétrochimique

2000

Polyéthylène : impacts environnementaux et sanitaires

→ il existe des solutions de polymérisation à partir d'éthylène issu d'éthanol obtenu par fermentation de canne à sucre



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

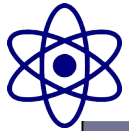
L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

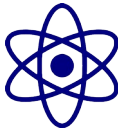
Plastiques : la révolution pétrochimique

2000

C'est quoi le nylon ?



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

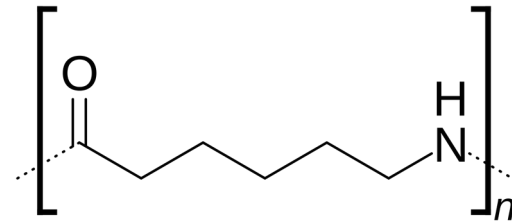
1900

2000

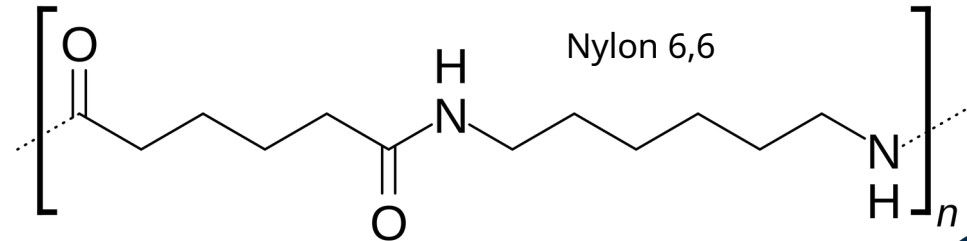
Plastiques : la révolution pétrochimique

C'est quoi le nylon ?

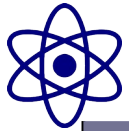
→ inventé en 1935 par Wallace Carothers
de Du Pont de Nemours



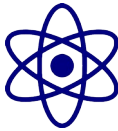
Nylon 6



Nylon 6,6



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

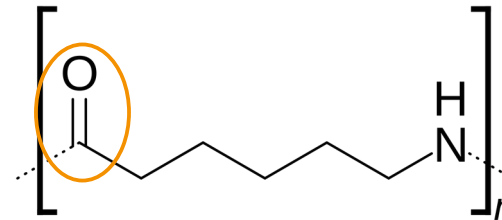
2000

Plastiques : la révolution pétrochimique

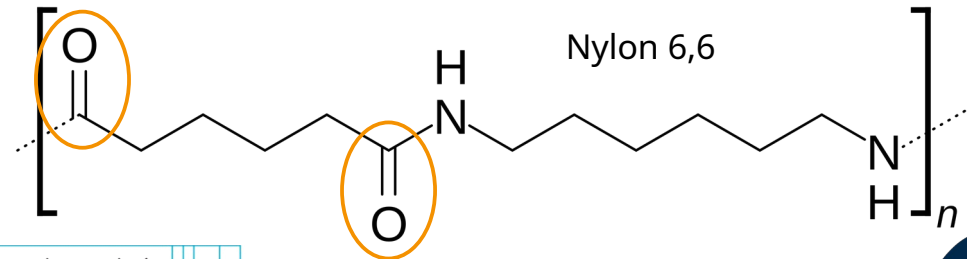
C'est quoi le nylon ?

→ inventé en 1935 par Wallace Carothers de Du Pont de Nemours

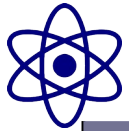
→ s'obtient par polycondensation à chaud entre un acide ou un diacide carboxylique



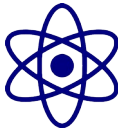
Nylon 6



Nylon 6,6



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

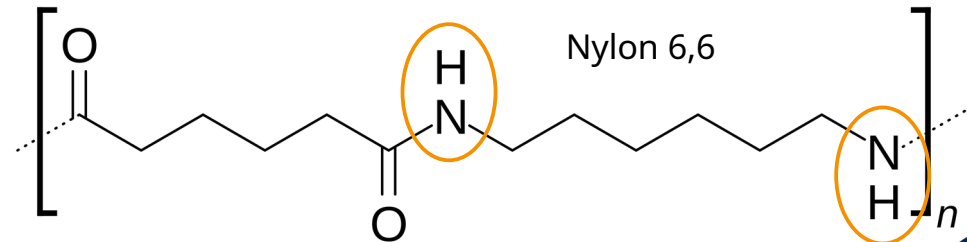
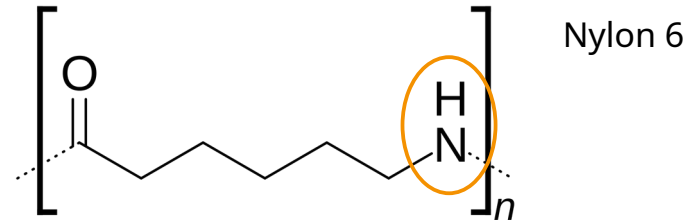
2000

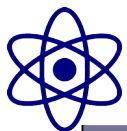
Plastiques : la révolution pétrochimique

C'est quoi le nylon ?

→ inventé en 1935 par Wallace Carothers de Du Pont de Nemours

→ s'obtient par polycondensation à chaud entre un acide ou un diacide carboxylique avec une amine ou une diamine





Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

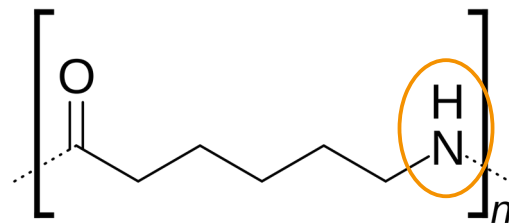
Plastiques : la révolution pétrochimique

C'est quoi le nylon ?

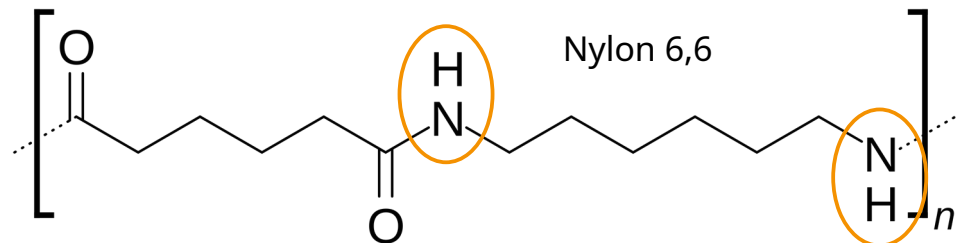
→ inventé en 1935 par Wallace Carothers de Du Pont de Nemours

→ s'obtient par polycondensation à chaud entre un acide ou un diacide carboxylique avec une amine ou une diamine

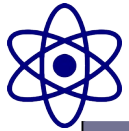
→ ce qui donne finalement un polyamide



Nylon 6



Nylon 6,6



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Plastiques : la révolution pétrochimique

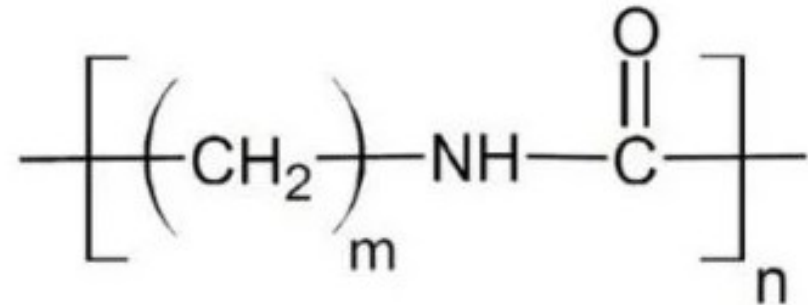
2000

C'est quoi le nylon ?

→ inventé en 1935 par Wallace Carothers
de Du Pont de Nemours

→ s'obtient par polycondensation à chaud
entre un acide ou un diacide carboxylique
avec une amine ou une diamine

→ ce qui donne finalement un polyamide



Polyamide



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Plastiques : la révolution pétrochimique

2000

C'est quoi le nylon ?

→ outre ses applications textiles, il sert aussi à fabriquer des pièces mécaniques (en particulier dans l'industrie automobile)

→ on peut le mouler à chaud : on dit que c'est un thermoplastique



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

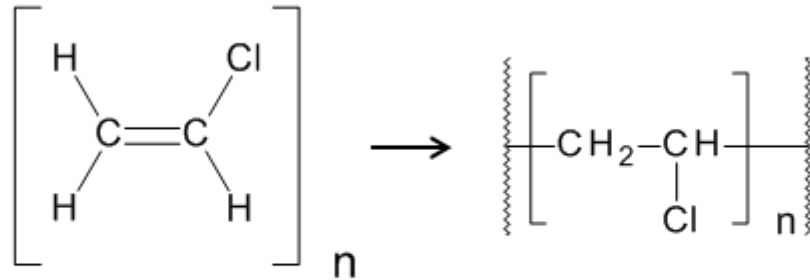
L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

1. le polychlorure de vinyle (PVC) : $(\text{CH}_2\text{-CHCl})_n$



Chlorure de vinyle

Polychlorure de vinyle



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

1. le polychlorure de vinyle (PVC) : $(\text{CH}_2\text{-CHCl})_n$

→ production annuelle : 40 millions de tonnes (3^e polymère le plus produit)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

1. le polychlorure de vinyle (PVC) : $(\text{CH}_2\text{-CHCl})_n$

→ applications courantes :

- tuyaux (eau, égouts)
- fenêtres et revêtements de sol
- isolation de câbles électriques
- emballages alimentaires (films, bouteilles)
- jouets et matériel médical (tuyaux, poches de sang)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

1. le polychlorure de vinyle (PVC) : $(\text{CH}_2\text{-CHCl})_n$

→ additifs toxiques :

- phtalates (plastifiants) → perturbateurs endocriniens
→ malformations génitales, cancers
- plomb et cadmium (stabilisants) → neurotoxiques et cancérigènes
- dioxines : libérées lors de la combustion (incinération, feux sauvages)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

1. le polychlorure de vinyle (PVC) : $(\text{CH}_2\text{-CHCl})_n$

→ impacts environnementaux :

- pollution des sols et de l'eau : phtalates et métaux lourds
→ ex. Chine : les sols autour des usines contiennent 10x plus de Pb
- persistance : le PVC met 100 ans à se dégrader
- microplastiques : le PVC se fragmente en microplastiques qui contaminent les océans et les organismes marins



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

1. le polychlorure de vinyle (PVC) : $(\text{CH}_2\text{-CHCl})_n$

→ recyclabilité du PVC :

- très difficile : seulement 5 % du PVC en Europe est recyclé !
- les additifs toxiques (phtalates, métaux lourds) compliquent le recyclage
- mais des alternatives existent !



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

1. le polychlorure de vinyle (PVC) : $(\text{CH}_2\text{-CHCl})_n$

→ alternatives au PVC :

- polyéthylène (PE) ou polypropylène (PP) pour les tuyaux
- linoléum (matériau naturel) pour les sols
- éventuellement des écomatériaux comme le PLA (acide polylactique), un polymère à base de maïs



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

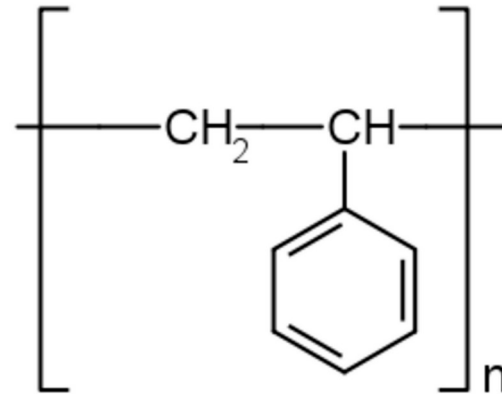
L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

2000

2. le polystyrène (PS) : $(\text{CH}_2\text{-CH}\varphi)_n$





Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

2000

2. le polystyrène (PS) : $(\text{CH}_2\text{-CH}\varphi)_n$

→ production annuelle : 15 millions de tonnes (5^e polymère le plus produit)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

2. le polystyrène (PS) : $(\text{CH}_2\text{-CH}\varphi)_n$

→ applications courantes :

- emballages alimentaires (barquettes, gobelets)
- isolation (mousse polystyrène expansé : PSE)
- jouets et matériel de bureau (stylos, boîtiers de CD...)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

2. le polystyrène (PS) : $(\text{CH}_2\text{-CH}\varphi)_n$

→ impacts environnementaux :

- pollution marine : le PS représente 10-15 % des déchets plastiques marins ! (rapport UNEP 2022)
- fragmentation rapide en microplastiques (moins de 2 ans sous UV)
 - les microbilles de PS sont ingérés par le plancton et entrent dans la chaîne alimentaire !



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

2. le polystyrène (PS) : $(\text{CH}_2\text{-CH}\varphi)_n$

→ impacts environnementaux :

- non biodégradable : les microplastiques de PS mettent plus de 500 ans à se dégrader

→ accumulation dans les sols et les sédiments marins



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

2. le polystyrène (PS) : $(\text{CH}_2\text{-CH}\varphi)_n$

→ impacts environnementaux :

- non biodégradable : les microplastiques de PS mettent plus de 500 ans à se dégrader

→ accumulation dans les sols et les sédiments marins

Que penseront de nous les archéologues de demain ??



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

2. le polystyrène (PS) : $(\text{CH}_2\text{-CH}\varphi)_n$

→ recyclabilité du PS :

- très difficile : seulement 1 à 2 % du PS est recyclé ! (difficile à nettoyer, léger mais volumineux)
- valorisable énergétiquement (par incinération) mais émission de CO_2 et de styrène (risque accru de leucémie)
- mais des alternatives existant !



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

2. le polystyrène (PS) : $(\text{CH}_2\text{-CH}\varphi)_n$

→ alternatives au PS :

- le PLA pour les emballages
- des écomatériaux comme le chanvre ou le liège pour l'isolation



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

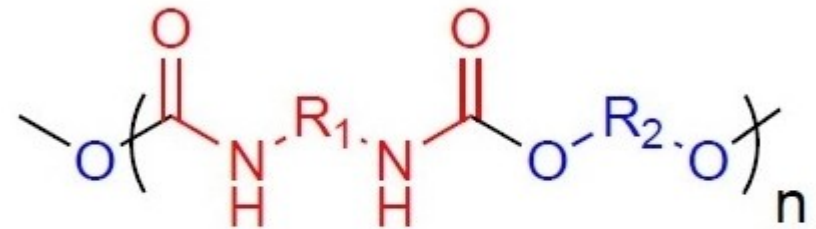
L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

3. le polyuréthane (PU) : $(R_1-NH-CO-O-R_2)_n$



Polyuréthane



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

3. le polyuréthane (PU) : $(R_1-NH-CO-O-R_2)_n$

→ production annuelle : 25 millions de tonnes (4^e polymère le plus produit)

→ polymère à base d'isocyanates



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

3. le polyuréthane (PU) : $(R_1-NH-CO-O-R_2)_n$

→ applications courantes :

- mousses : matelas, sièges de voiture, isolants
- revêtements : vernis, colles
- chaussures, vêtements (en élasthanne)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

3. le polyuréthane (PU) : $(R_1-NH-CO-O-R_2)_n$

→ impacts environnementaux :

- émissions de CO_2 : la production de PU émet 3-5 kg de CO_2 / kg de PU (à cause des solvants et de l'énergie nécessaire)
- microplastiques : les mousses de PU se désagrègent en poussières fines (ex. les matelas libèrent des particules fines dans l'air intérieur)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

3. le polyuréthane (PU) : $(R_1-NH-CO-O-R_2)_n$

→ impacts sanitaires :

- isocyanates : toxiques, irritants pulmonaires, asthme professionnel
- libérés lors de la fabrication du PU ou de sa combustion

→ ex. la 'catastrophe de Bhopal' (Inde) en 1984 : l'explosion d'une usine de production de pesticides qui a dégagé 40 tonnes d'isocyanates de méthyle (précurseur du PU)

→ 3500 morts la première nuit, plus de 20 000 en tout !



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

3. le polyuréthane (PU) : $(R_1-NH-CO-O-R_2)_n$

→ recyclabilité du PU :

- non-recyclable ! Moins de 1 % du PU est recyclé (car thermodurcissable)
- incinération : émission de cyanure d'hydrogène (HCN) (pas idéal!)
- mais des possibilités sont en cours d'étude !



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

3. le polyuréthane (PU) : $(R_1-NH-CO-O-R_2)_n$

→ recyclabilité du PU : des solutions émergentes

- la pyrolyse (chauffage sans oxygène) permet de récupérer des polyols
- des projets de recyclage chimique sont en cours d'investigation



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

3. le polyuréthane (PU) : $(R_1-NH-CO-O-R_2)_n$

→ alternatives au PU :

- le latex naturel peut remplacer les mousses de PU
- des extraits d'algues peuvent remplacer les isolants en PU
- écomatériaux : mousses à base de mycélium



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

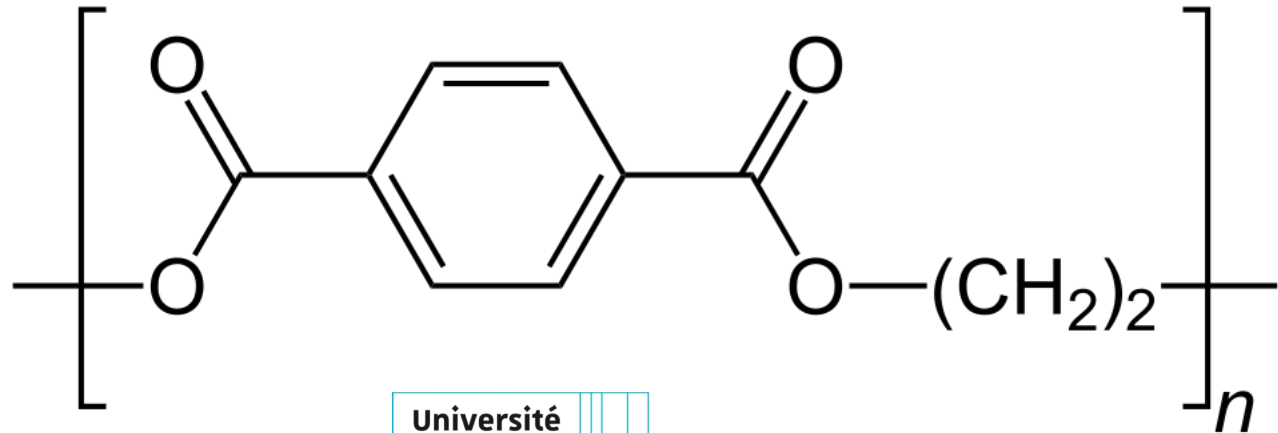
L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

4. le polyéthylène téréphtalate (PET) : $(-\text{COO}-\varphi-\text{COO}-(\text{CH}_2)_2-)_n$





Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

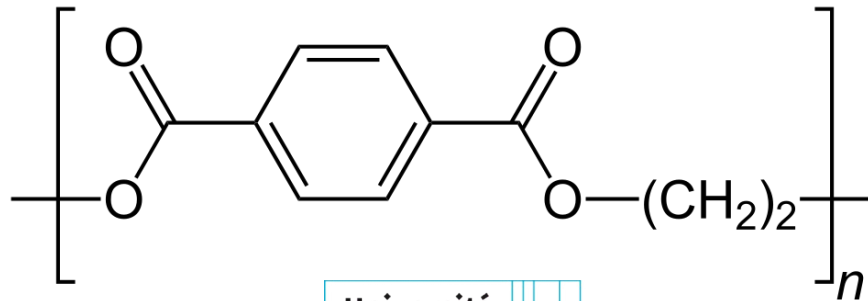
1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

4. le polyéthylène téréphtalate (PET) : $(-\text{COO}-\varphi-\text{COO}-(\text{CH}_2)_2-)_n$

→ production annuelle : 30 millions de tonnes (emballage le plus produit)





Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

4. le polyéthylène téréphtalate (PET) : $(-\text{COO}-\varphi-\text{COO}-(\text{CH}_2)_2-)_{\text{n}}$

→ applications courantes :

- bouteilles (eau, sodas)
- fibres textiles (polyester pour les vêtements)
- emballages alimentaires (barquettes, films)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

4. le polyéthylène téréphtalate (PET) : $(-\text{COO}-\varphi-\text{COO}-(\text{CH}_2)_2-)_n$

→ impacts environnementaux :

- pollution marine : le PET représente 20 % des déchets plastiques marins !
- fragmentation des microplastiques sous l'effet des UV et des vagues
 - une bouteille en PET met 450 ans à se dégrader...
 - et se fragmente en 1,5 millions de microplastiques !!



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

4. le polyéthylène téréphtalate (PET) : $(-\text{COO}-\varphi-\text{COO}-(\text{CH}_2)_2-)_n$

→ impacts sanitaires :

- perturbateurs endocriniens : les bouteilles de PET libèrent des phtalates
- pollution : une étude britannique de 2021 (université de Newcastle) a trouvé des microplastiques dans 83 % des échantillons d'eau du robinet



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

4. le polyéthylène téréphtalate (PET) : $(-\text{COO}-\varphi-\text{COO}-(\text{CH}_2)_2-)_n$

→ recyclabilité du PET :

- seulement 30 % du PET est recyclé en Europe
- incinération : les 70 % restant sont incinérés ou exportés !
- les PET recyclés sont souvent transformés en fibres (moins noble que les bouteilles)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

4. le polyéthylène téréphtalate (PET) : $(-\text{COO}-\varphi-\text{COO}-(\text{CH}_2)_2-)_n$

→ recyclabilité du PET : technologies

- recyclage mécanique : broyage + lavage
- recyclage chimique : dépolymérisation et retour au monomère
ex. société Carbios, en France



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

4. le polyéthylène téréphtalate (PET) : $(-\text{COO}-\varphi-\text{COO}-(\text{CH}_2)_2-)_n$

→ alternatives au PET :

- utilisation de PLA (acide polylactique)
- remplacement des emballages en PET par du verre ou de l'aluminium
- mise en place de consignes !



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

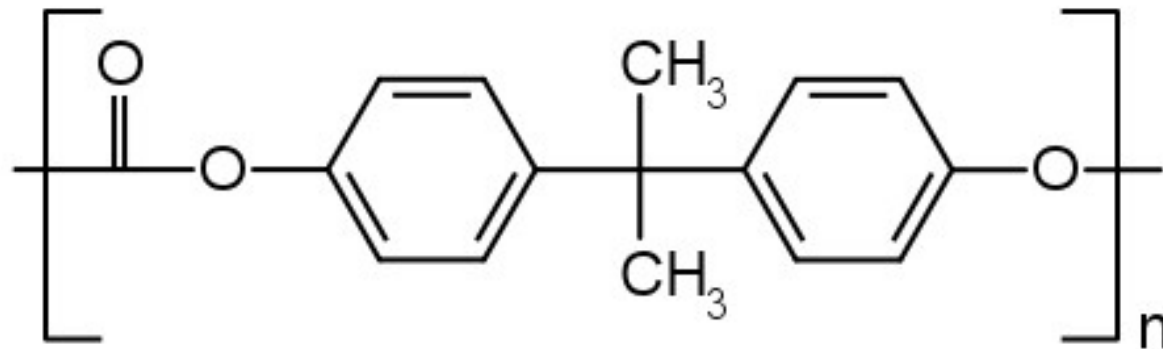
L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

5. le polycarbonate (PC) : $(\text{CO-O-}\varphi\text{-C}(\text{CH}_3)_2\text{-}\varphi\text{-O-})_n$





Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

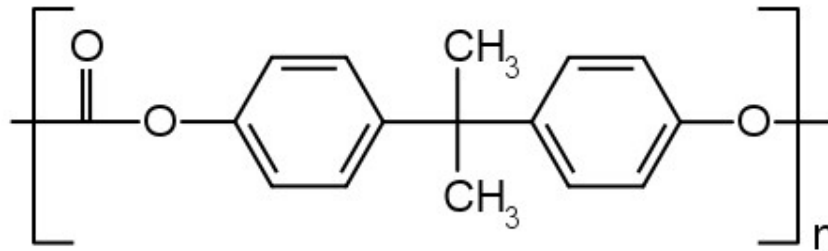
1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

5. le polycarbonate (PC) : $(\text{CO-O-}\varphi\text{-C}(\text{CH}_3)_2\text{-}\varphi\text{-O-})_n$

→ production annuelle : 5 millions de tonnes





Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

5. le polycarbonate (PC) : $(\text{CO-O-}\varphi\text{-C}(\text{CH}_3)_2\text{-}\varphi\text{-O-})_n$

→ applications courantes :

- bouteilles réutilisables (ex. bouteilles d'eau sportive)
- lunettes de soleil, verre de sécurité
- CD/DVC
- biberons (interdits en Europe depuis 2011 à cause du bisphénol A)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

5. le polycarbonate (PC) : $(\text{CO-O-}\varphi\text{-C}(\text{CH}_3)_2\text{-}\varphi\text{-O-})_n$

→ impacts sanitaires :

- bisphénol A (BPA) : perturbateur endocrinien (obésité, cancer du sein, fertilité)
(ex. biberons interdits à cause effet sur le développement cérébral des enfants)

- fragmentation des microplastiques :

 - le PC se fragmente en particules nanométriques qui peut traverser la peau !

 - des microplastiques de PC ont été retrouvés dans le placenta humain !!



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

5. le polycarbonate (PC) : $(\text{CO-O-}\varphi\text{-C}(\text{CH}_3)_2\text{-}\varphi\text{-O-})_n$

→ impacts environnementaux :

- seulement 10 % du PC est recyclé : difficile, à cause des additifs comme PBA
- l'incinération du PC émet des vapeurs chargées de dioxines et de BPA



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

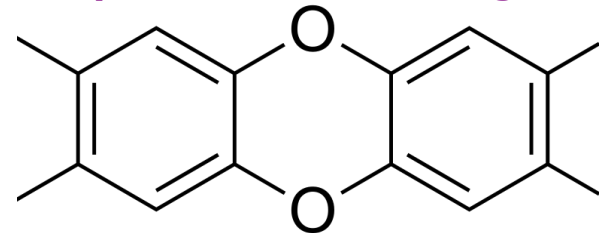
2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

5. le polycarbonate (PC) : $(\text{CO-O-}\varphi\text{-C}(\text{CH}_3)_2\text{-}\varphi\text{-O-})_n$

→ dioxines :

- polluants organiques persistants (POP) présents dans le monde entier, dans l'environnement
- elles s'accumulent dans la chaîne alimentaire, principalement dans les graisses animales
- à la fois très persistantes et très toxiques





Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

5. le polycarbonate (PC) : $(\text{CO-O-}\varphi\text{-C}(\text{CH}_3)_2\text{-}\varphi\text{-O-})_n$

→ recyclabilité du PC :

- recyclage enzymatique : une enzyme découverte par l'Université de Portsmouth (UK) permettrait de dégrader le PC



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : les 5 polymères les plus nocifs

5. le polycarbonate (PC) : $(\text{CO-O-}\varphi\text{-C}(\text{CH}_3)_2\text{-}\varphi\text{-O-})_n$

→ alternatives au PC :

- Tritan™ : un copolymère sans BPA
- remplacement des bouteilles en PC par du verre ou de l'acier inox
- écomatériaux : verre incassable (ex. Gorilla Glass)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Plastiques : résumé

2000

Pollution globale :

- microplastiques :

- 9,5 millions de tonnes de plastiques finissent dans les océans chaque année !

- 50 % des microplastiques proviennent du PVC, PS et PET



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Plastiques : résumé

2000

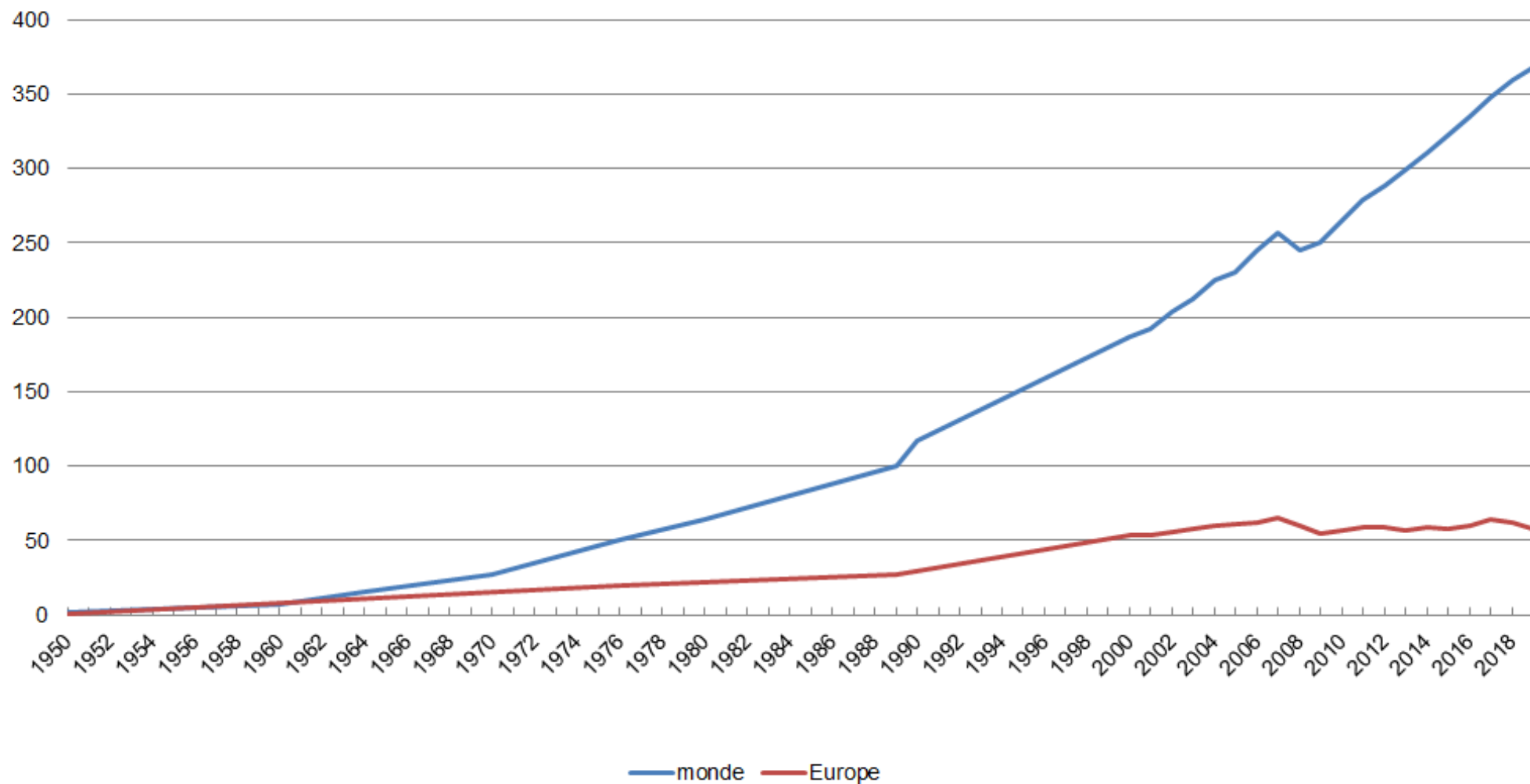
Pollution globale :

- toxicité :

→ phtalates, BPA, styrène sont des perturbateurs endocriniens → cancers, malformations

→ dioxines : produites par le PVC, elle sont cancérigènes

En millions de tonnes





Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Plastiques : résumé

2000

Un véritable problème de recyclage : mais des alternatives existent !

Polymère	Taux de Recyclage (UE, 2024)	Principaux Obstacles	Alternatives Durables
PVC	5%	Additifs toxiques, coût élevé.	Linoléum, PLA
PS	1–2%	Léger, difficile à collecter.	Mycelium, PLA
PU	<1%	Structure thermodurcissable.	Latex naturel, algues
PET	30%	Downcycling, contamination alimentaire.	PLA, verre consigné
PC	10%	BPA, complexité chimique.	Tritan™, verre



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : résumé

Solutions pour demain ?

- éco-conception :

- consigner toutes les bouteilles ! (ex. Allemagne : taux de recyclage PET = 98%)
- interdire les additifs toxiques (ex. UE : interdiction du BPA et des phtalates)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : résumé

Solutions pour demain ?

- innovations :

- polymères biodégradables : PLA, PHA (polyhydroxyalcanoates, biodégradables en 6 mois)
- recyclage chimique : ex. société Carbios (France) pour le PET



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Plastiques : résumé

Solutions pour demain ?

- réglementation :

→ directive UE sur les plastiques à usage unique : interdiction depuis 2021 des couverts en PS, pailles en PVC etc.

→ taxonomie verte : classification des matériaux durables



1900

Pla

Plage de la réserve naturelle de Sian Ka'an (Mexique)



2000

Tortue prise au piège dans un sac plastique



1900



2000





1900

Townsville (Australie)



000



Iguane marin, île de Santa Cruz, Galapagos



1900



000





1900



000

Requin baleine, Golfe d'Aden



Crabe éponge sous un morceau de plastique, Edithbourg, Australie



1900



000



Macaque rhésus, Temple de Pashupatinath (Népal)



1900



000





Pollution : le prix du progrès !



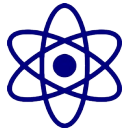
Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Semi-conducteurs : la révolution électronique

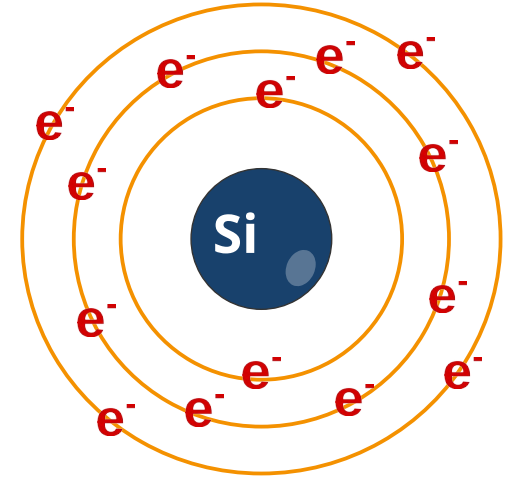
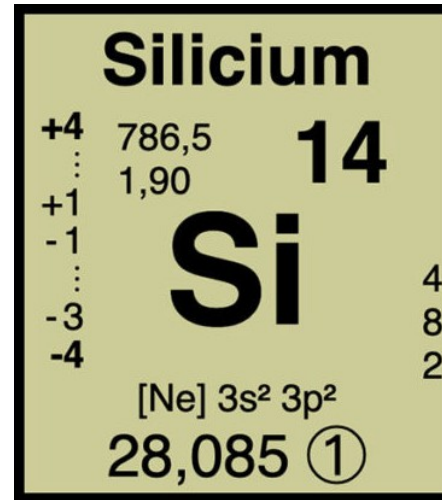
2000



Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium





Semi-conducteurs : la révolution électronique

Silicium

2,33 g/cm³

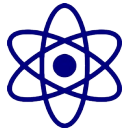
$T_F = 1\,414^\circ\text{C}$

$$EN_{Si} = 1,9$$

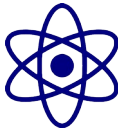
(EN_c = 2,55)

	Silicium	
+4 ⋮ +1 -1 ⋮ -3 -4	786,5 1,90 Si [Ne] 3s ² 3p ² 28,085 ①	14 4 8 2

Groupes	I																	VII A																																																	
Periodes	1																	18																																																	
1	Hydrogène 1 H 1,00794																	Hélium 2 He 4,00260																																																	
2	Lithium 3 Li 6,939	Béryllium 4 Be 9,0121831															Bore 5 B 10,812	Carbone 6 C 12,011	Azote 7 N 14,00643	Oxygène 8 O 15,9994	Fluor 9 F 18,9984032	Neon 10 Ne 20,1797																																													
3	Sodium 11 Na 22,98976928	Magnésium 12 Mg 24,305															Aluminium 13 Al 26,9815385	Silicium 14 Si 28,0855	Phosphore 15 P 30,97376209	Soufre 16 S 32,065	Chlore 17 Cl 35,453	Argon 18 Ar 39,948																																													
4	Potassium 19 K 39,0983(1)	Calcium 20 Ca 40,078(4)	Scandium 21 Sc 44,955908(5)	Titane 22 Ti 47,867(1)	Vanadium 23 V 50,9415(1)	Chrome 24 Cr 51,9961(8)	Manganèse 25 Mn 54,938044	Fer 26 Fe 55,845(2)	Cobalt 27 Co 58,933194	Nickel 28 Ni 58,6934(4)	Cuivre 29 Cu 63,546(3)	Zinc 30 Zn 65,38(2)	Gallium 31 Ga 69,723(1)	Germanium 32 Ge 72,630(8)	Argent 33 Ag 107,8682(2)	Or 34 As 74,921595	Sélénium 35 Se 78,9718(8)	Brome 36 Br 79,904																																																	
5	Rubidium 37 Rb 85,4678(3)	Sr 38 Sr 87,62(1)	Yttrium 39 Y 88,90584	Zirconium 40 Zr 91,224(2)	Niobium 41 Nb 92,90637	Molybdène 42 Mo 95,94(1)	Technétium 43 Tc [98]	Rhodium 44 Ru 101,07(2)	Ruthénium 45 Rh 101,07(2)	Palladium 46 Pd 106,42(1)	Argent 47 Ag 107,8682(2)	Cadmium 48 Cd 112,414(4)	Indium 49 In 114,818(1)	Étain 50 Sn 118,710(7)	Antimoine 51 Sb 121,760(1)	Tellure 52 Te 127,60(3)	Iode 53 I 126,90447	Xénon 54 Xe 131,29(3)																																																	
6	Césium 55 Cs 132,90545	Baryum 56 Ba 137,327(7)	Lanthanides 57-71		Hafnium 72 Hf 178,49(2)	Tantale 73 Ta 180,94788	Tungstène 74 W 183,84(1)	Rhénium 75 Re 186,207(1)	Osmium 76 Os 190,23(2)	Iridium 77 Ir 192,22(2)	Platine 78 Pt 195,084(1)	Mercury 80 Hg 200,592(5)	Thallium 81 Tl 204,3835	Plomb 82 Pb 207,2(1)	Bismuth 83 Bi 208,9804	Poivre 84 Po [209]	Ast 85 At [210]	Rn 86 Rn [222]																																																	
7	Francium 87 Fr [223]	Radium 88 Ra [226]	Actinides 89-103		Thorium 90 Th 232,0377	Protactinium 91 Pa 231,03688	Sébérium 92 Sb 226,02536	Béryllium 93 Bh 264,101(8)	Hassium 94 Hs 277	Méthane 95 Mc [288]	Darmstadtium 96 Ds [281]	Rémoindium 97 Rg [282]	Copernicium 98 Cn [285]	Nihonium 99 Nh [286]	Flerovium 100 Fl [289]	Moscovium 101 Mc [289]	Livermorium 102 Lv [293]	Oganesson 103 Og [294]																																																	
<table><tr><td colspan="10">Métaux</td><td colspan="9">Non métaux</td></tr><tr><td>Lanthane 57 La 138,90547</td><td>Cérium 58 Ce 140,116(1)</td><td>Praseodyme 59 Pr 140,90766</td><td>Néodyme 60 Nd 144,242(8)</td><td>Prométhium 61 Pm [145]</td><td>Samarium 62 Sm 150,36(2)</td><td>Europium 63 Eu 151,964(1)</td><td>Gadolinium 64 Gd 157,25(3)</td><td>Terbium 65 Tb 158,92535</td><td>Dysprosium 66 Dy 162,500(1)</td><td>Holmium 67 Ho 164,93033</td><td>Erbium 68 Er 167,259(8)</td><td>Thulium 69 Tm 168,93422</td><td>Ytterbium 70 Yb 173,045</td><td>Lutécium 71 Lu 174,9668</td></tr><tr><td>Actinium 89 Ac [227]</td><td>Thorium 90 Th 232,0377</td><td>Protactinium 91 Pa 231,03688</td><td>Uranium 92 U 238,02891</td><td>Néptunium 93 Np [237]</td><td>Plutonium 94 Pu [244]</td><td>Americium 95 Am [243]</td><td>Curium 96 Cm [247]</td><td>Berkélium 97 Bk [247]</td><td>Californium 98 Cf [251]</td><td>Einsteinium 99 Es [252]</td><td>Fermium 100 Fm [257]</td><td>Mendelevium 101 Md [258]</td><td>Noébiium 102 No [259]</td><td>Lavrentium 103 Lr [262]</td></tr></table>																			Métaux										Non métaux									Lanthane 57 La 138,90547	Cérium 58 Ce 140,116(1)	Praseodyme 59 Pr 140,90766	Néodyme 60 Nd 144,242(8)	Prométhium 61 Pm [145]	Samarium 62 Sm 150,36(2)	Europium 63 Eu 151,964(1)	Gadolinium 64 Gd 157,25(3)	Terbium 65 Tb 158,92535	Dysprosium 66 Dy 162,500(1)	Holmium 67 Ho 164,93033	Erbium 68 Er 167,259(8)	Thulium 69 Tm 168,93422	Ytterbium 70 Yb 173,045	Lutécium 71 Lu 174,9668	Actinium 89 Ac [227]	Thorium 90 Th 232,0377	Protactinium 91 Pa 231,03688	Uranium 92 U 238,02891	Néptunium 93 Np [237]	Plutonium 94 Pu [244]	Americium 95 Am [243]	Curium 96 Cm [247]	Berkélium 97 Bk [247]	Californium 98 Cf [251]	Einsteinium 99 Es [252]	Fermium 100 Fm [257]	Mendelevium 101 Md [258]	Noébiium 102 No [259]	Lavrentium 103 Lr [262]
Métaux										Non métaux																																																									
Lanthane 57 La 138,90547	Cérium 58 Ce 140,116(1)	Praseodyme 59 Pr 140,90766	Néodyme 60 Nd 144,242(8)	Prométhium 61 Pm [145]	Samarium 62 Sm 150,36(2)	Europium 63 Eu 151,964(1)	Gadolinium 64 Gd 157,25(3)	Terbium 65 Tb 158,92535	Dysprosium 66 Dy 162,500(1)	Holmium 67 Ho 164,93033	Erbium 68 Er 167,259(8)	Thulium 69 Tm 168,93422	Ytterbium 70 Yb 173,045	Lutécium 71 Lu 174,9668																																																					
Actinium 89 Ac [227]	Thorium 90 Th 232,0377	Protactinium 91 Pa 231,03688	Uranium 92 U 238,02891	Néptunium 93 Np [237]	Plutonium 94 Pu [244]	Americium 95 Am [243]	Curium 96 Cm [247]	Berkélium 97 Bk [247]	Californium 98 Cf [251]	Einsteinium 99 Es [252]	Fermium 100 Fm [257]	Mendelevium 101 Md [258]	Noébiium 102 No [259]	Lavrentium 103 Lr [262]																																																					
<table><tr><td colspan="10">Métaux</td><td colspan="9">Non métaux</td></tr><tr><td>Alcalins</td><td>Alcalino-terreux</td><td>Lanthanides</td><td>Actinides</td><td>Métaux de transition</td><td>Métaux pauvres</td><td>Métalloïdes</td><td>Autres non-métaux</td><td>Halogènes</td><td>Gaz nobles</td><td>Non classés</td><td>primordial</td><td>néoclassiques</td><td>d'autres</td><td>synthétiques</td></tr></table>																			Métaux										Non métaux									Alcalins	Alcalino-terreux	Lanthanides	Actinides	Métaux de transition	Métaux pauvres	Métalloïdes	Autres non-métaux	Halogènes	Gaz nobles	Non classés	primordial	néoclassiques	d'autres	synthétiques															
Métaux										Non métaux																																																									
Alcalins	Alcalino-terreux	Lanthanides	Actinides	Métaux de transition	Métaux pauvres	Métalloïdes	Autres non-métaux	Halogènes	Gaz nobles	Non classés	primordial	néoclassiques	d'autres	synthétiques																																																					



Notions essentielles pour comprendre les semi-conducteurs

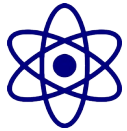


Semi-conducteurs : la révolution électronique

D'où vient le silicium ?

- le silicium est le 2^{ème} élément le plus présent dans la croûte terrestre (après l'oxygène)
- on le trouve sous forme de silice (SiO_2), composant principal du sable et du quartz
- on le réduit ensuite avec du carbone à 1700°C :





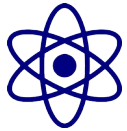
Pollution : le prix du progrès !



Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

→ par sa structure électronique, $[\text{Ne}] 3s^2 3p^2$, le silicium a 4 électrons de valence (sur la 3^e couche)



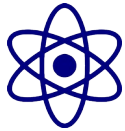
Pollution : le prix du progrès !



Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

- par sa structure électronique, $[\text{Ne}] 3s^2 3p^2$, le silicium a 4 électrons de valence (sur la 3^e couche)
- il va donc chercher à compléter la sous-couche p avec 4 électrons pour arriver à 8



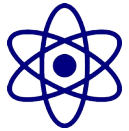
Pollution : le prix du progrès !



Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

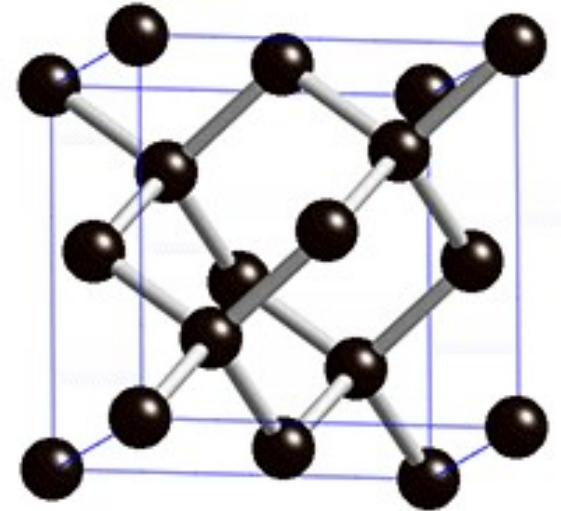
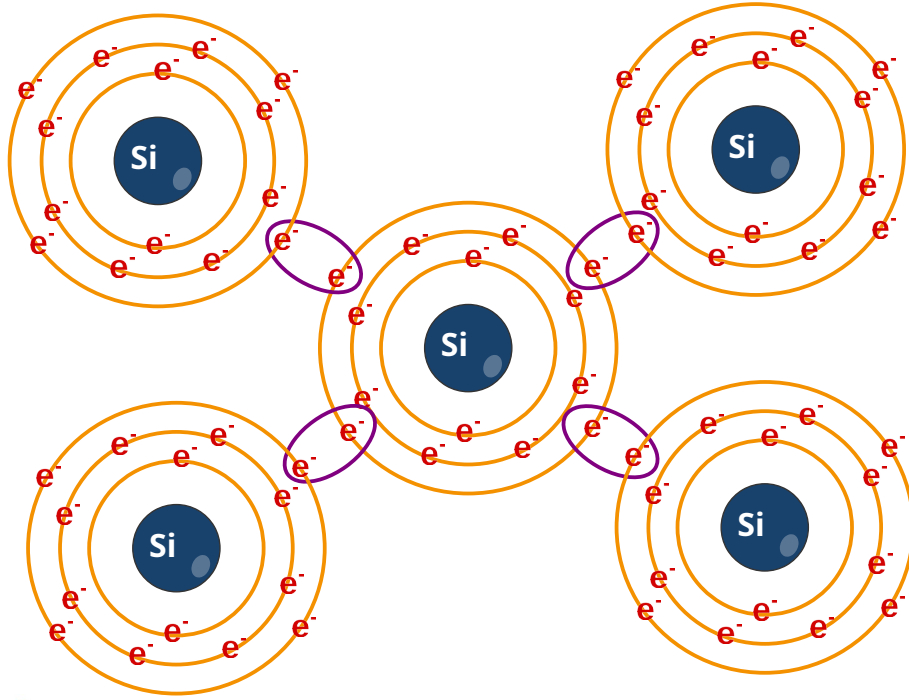
- par sa structure électronique, $[\text{Ne}] 3s^2 3p^2$, le silicium a 4 électrons de valence (sur la 3^e couche)
- il va donc chercher à compléter la sous-couche p avec 4 électrons pour arriver à 8
- tout comme le carbone, le silicium peut alors faire 4 liaisons covalentes avec 4 autres Si :

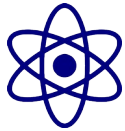


Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium



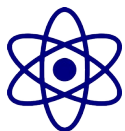


Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

- mais le silicium a une électronégativité peu élevée (1,9 contre 2,55 pour C)
- il est donc capable de libérer un électron un peu plus facilement que C
- le caractère covalent de sa liaison est donc moins prononcé que celui de C
- le silicium propose donc un schéma de partage d'électrons à mi-chemin entre covalence et liaison métallique
- pour mieux comprendre, intéressons-nous aux énergies d'ionisation de Si :

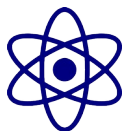


Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

niveau	énergie Ionisation (eV)
3p2	8,2
3p1	16,3
3s2	33,5
3s1	45,1
2p6	166,8
2p5	205,3
2p4	246,5
2p3	303,5
2p2	351,1
2p1	401,4
2s2	476,4
2s1	523,4
1s2	2437,6
1s1	2673,2



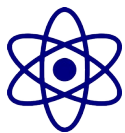
Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

niveau	énergie ionisation (eV)
3p ₂	8,2
3p ₁	16,3
3s ₂	33,5
3s ₁	45,1
2p ₆	166,8
2p ₅	205,3
2p ₄	246,5
2p ₃	303,5
2p ₂	351,1
2p ₁	401,4
2s ₂	476,4
2s ₁	523,4
1s ₂	2437,6
1s ₁	2673,2



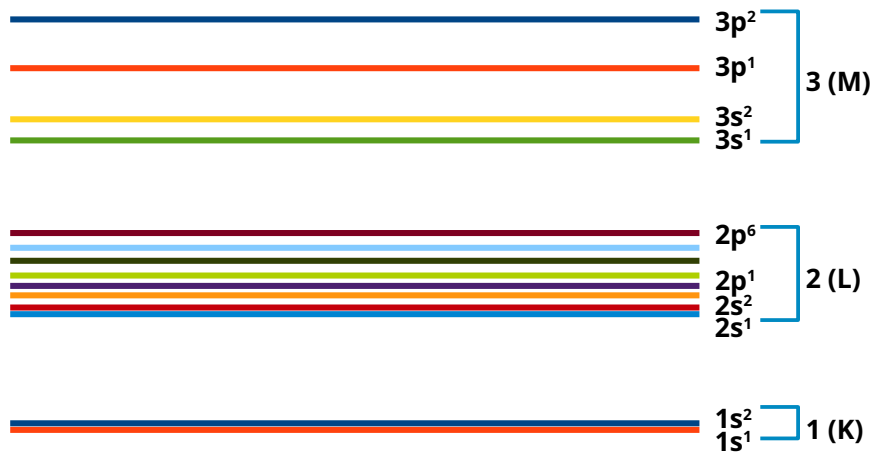


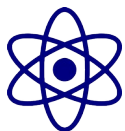
Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

niveau	énergie Ionisation (eV)
3p2	8,2
3p1	16,3
3s2	33,5
3s1	45,1
2p6	166,8
2p5	205,3
2p4	246,5
2p3	303,5
2p2	351,1
2p1	401,4
2s2	476,4
2s1	523,4
1s2	2437,6
1s1	2673,2



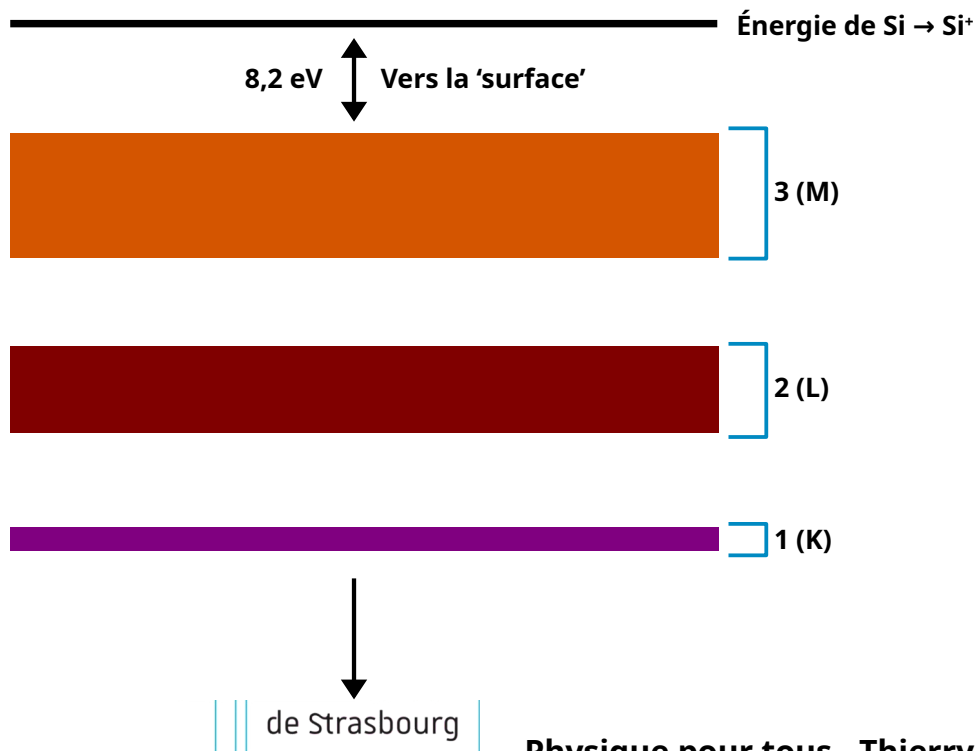


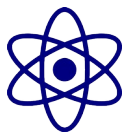
Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

niveau	énergie ionisation (eV)
3p2	8,2
3p1	16,3
3s2	33,5
3s1	45,1
2p6	166,8
2p5	205,3
2p4	246,5
2p3	303,5
2p2	351,1
2p1	401,4
2s2	476,4
2s1	523,4
1s2	2437,6
1s1	2673,2



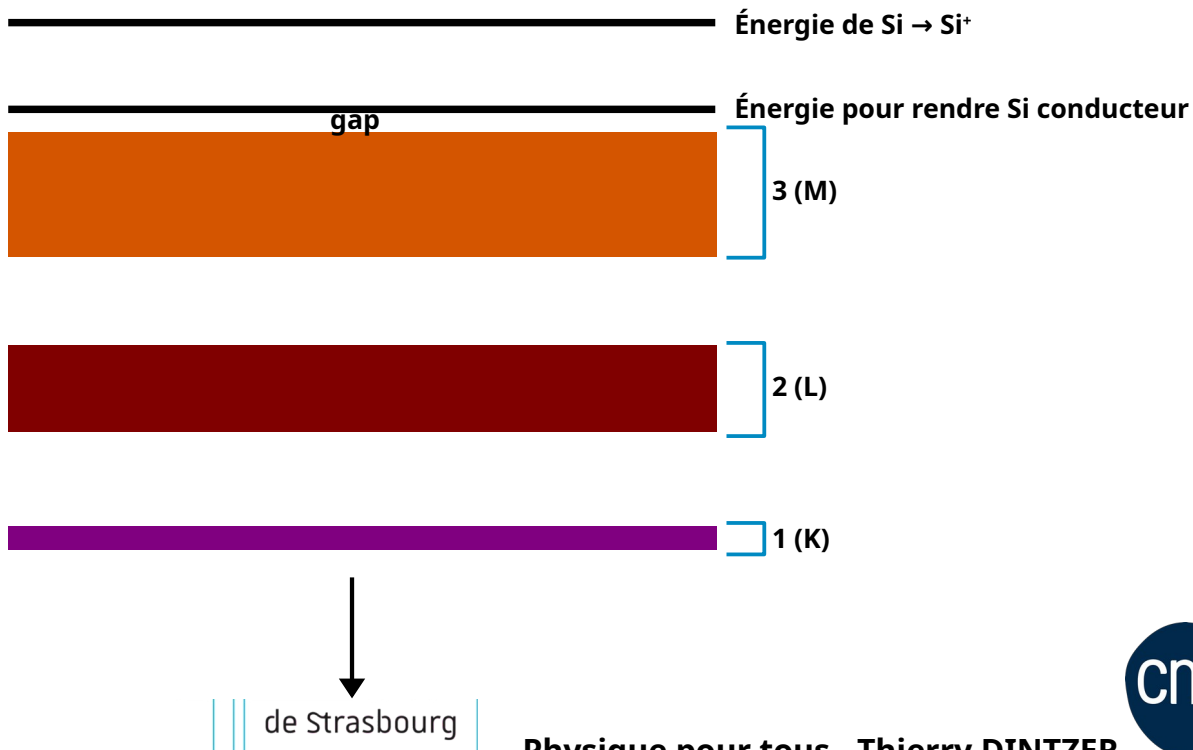


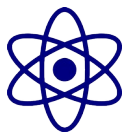
Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

niveau	énergie ionisation (eV)
3p2	8,2
3p1	16,3
3s2	33,5
3s1	45,1
2p6	166,8
2p5	205,3
2p4	246,5
2p3	303,5
2p2	351,1
2p1	401,4
2s2	476,4
2s1	523,4
1s2	2437,6
1s1	2673,2



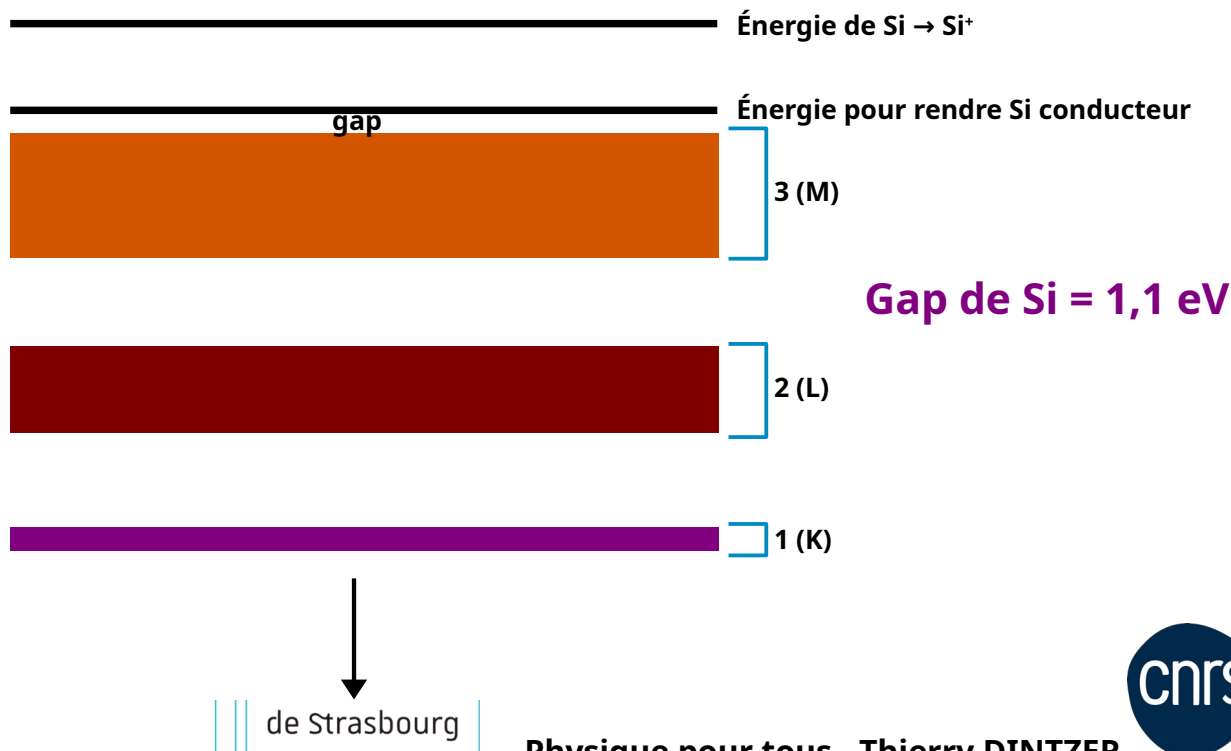


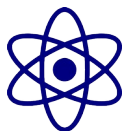
Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

niveau	énergie ionisation (eV)
3p2	8,2
3p1	16,3
3s2	33,5
3s1	45,1
2p6	166,8
2p5	205,3
2p4	246,5
2p3	303,5
2p2	351,1
2p1	401,4
2s2	476,4
2s1	523,4
1s2	2437,6
1s1	2673,2



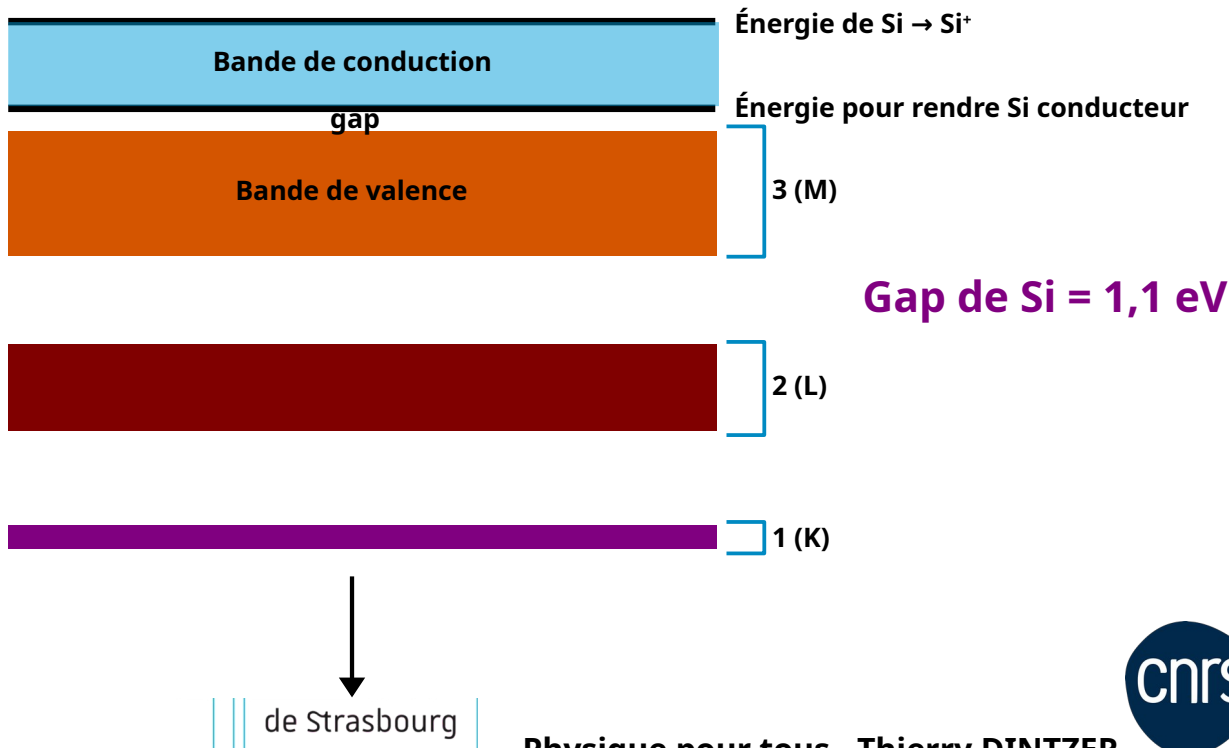


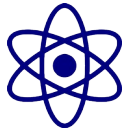
Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

niveau	énergie ionisation (eV)
3p2	8,2
3p1	16,3
3s2	33,5
3s1	45,1
2p6	166,8
2p5	205,3
2p4	246,5
2p3	303,5
2p2	351,1
2p1	401,4
2s2	476,4
2s1	523,4
1s2	2437,6
1s1	2673,2

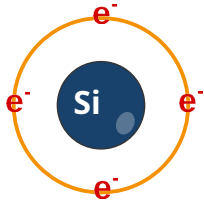


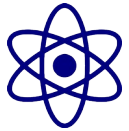


Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

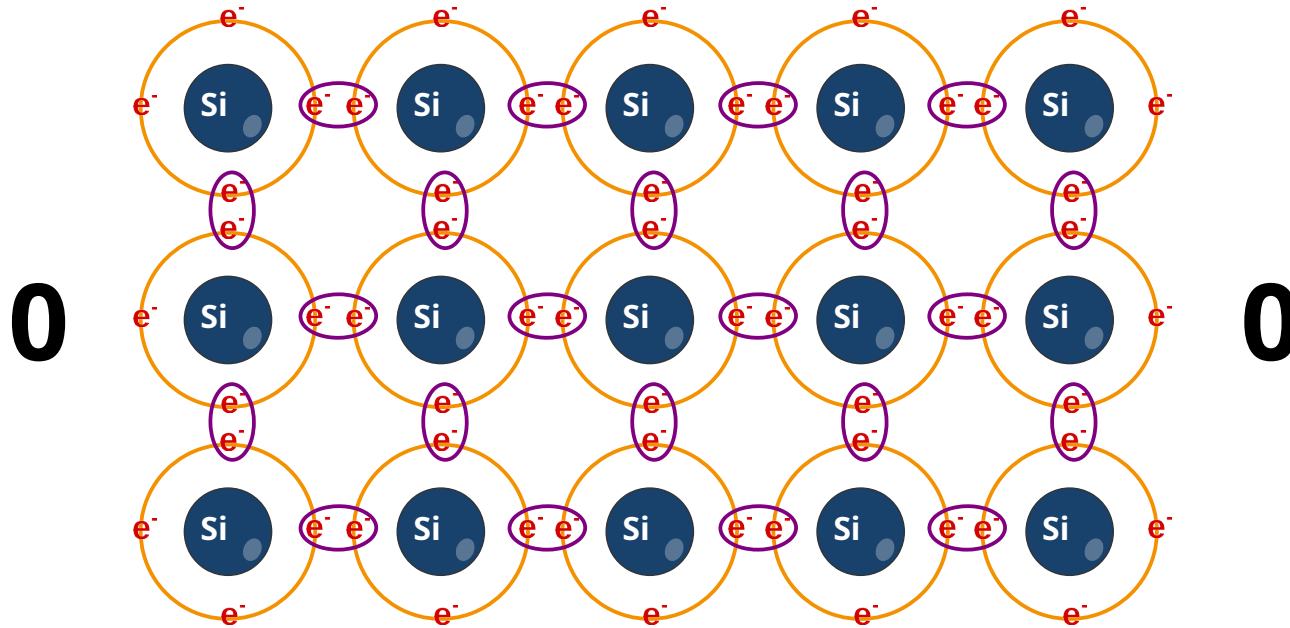




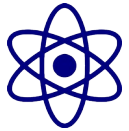
Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium



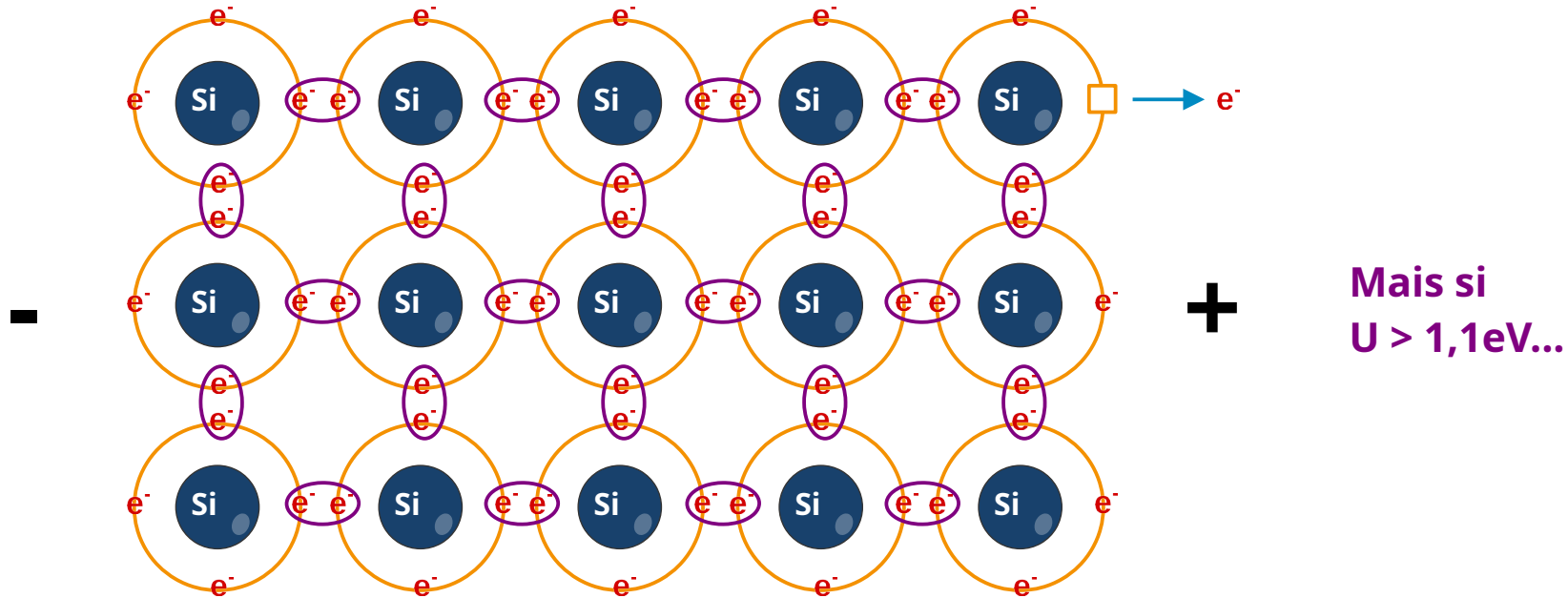
En l'absence de
tension ou si
 $U < 1,1\text{eV}$

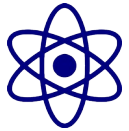


Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

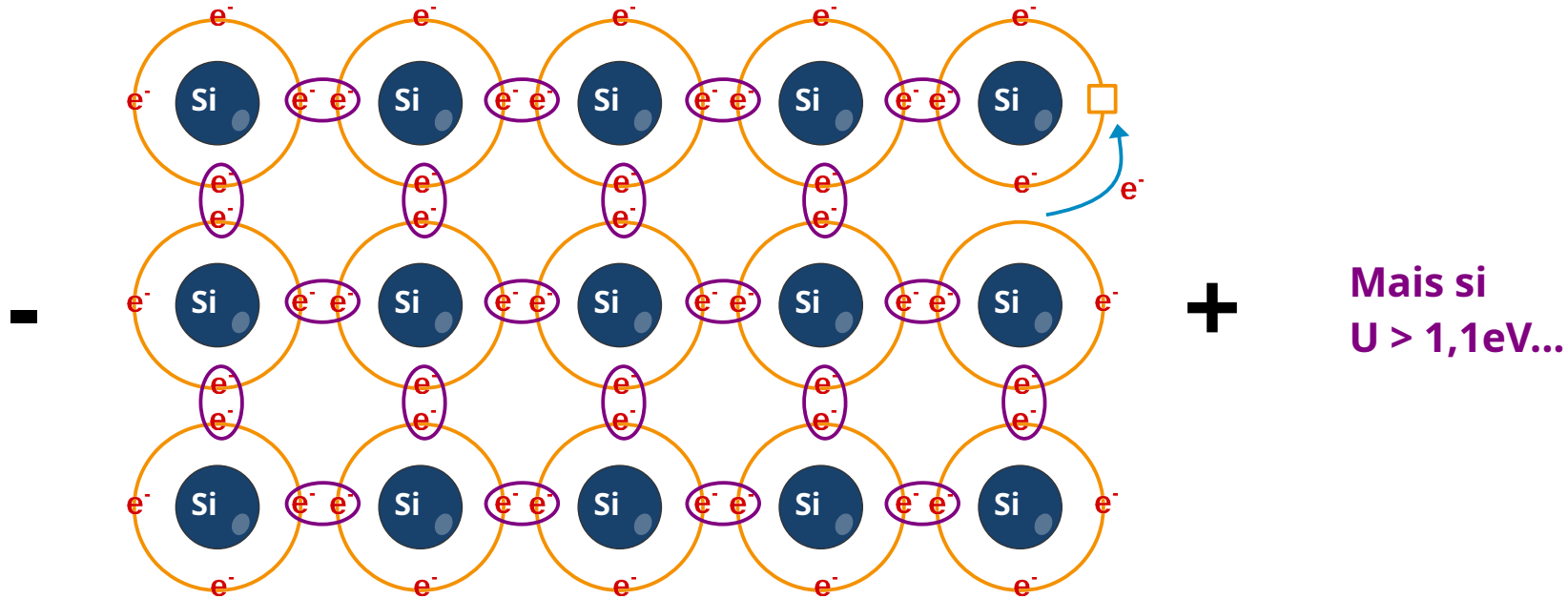


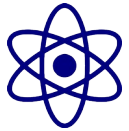


Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

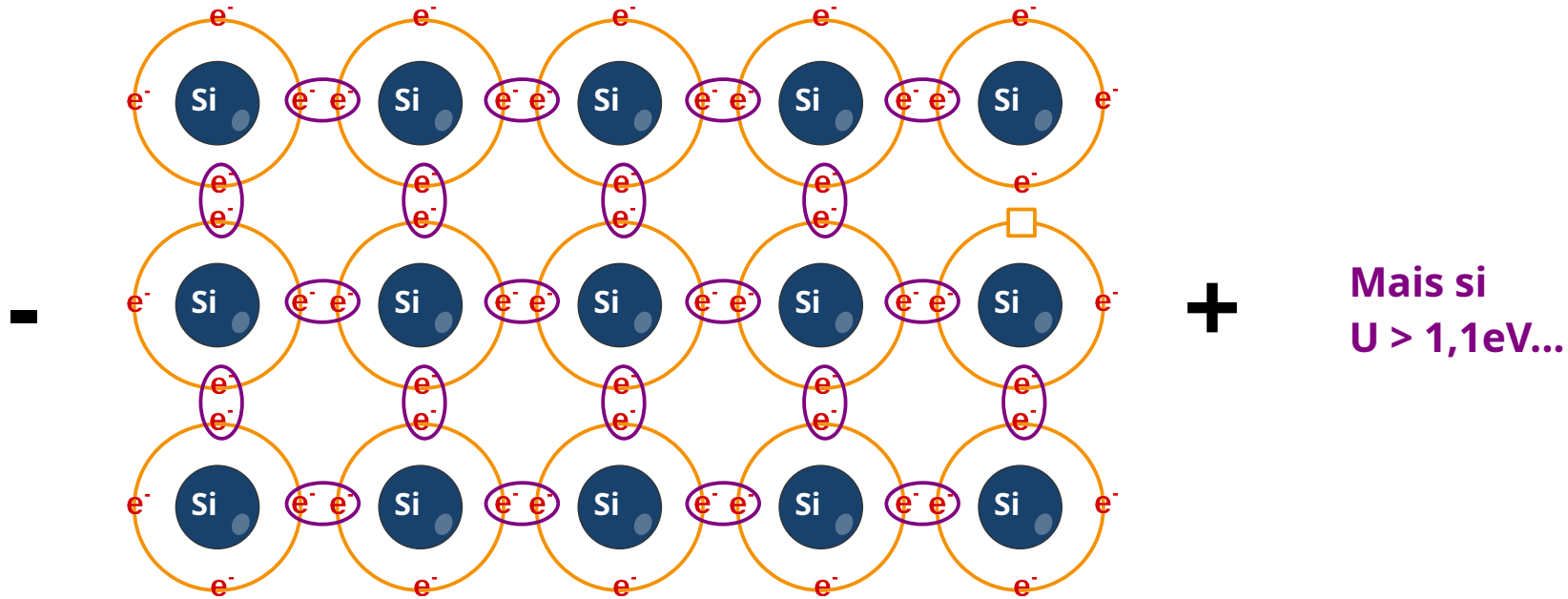


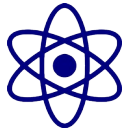


Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

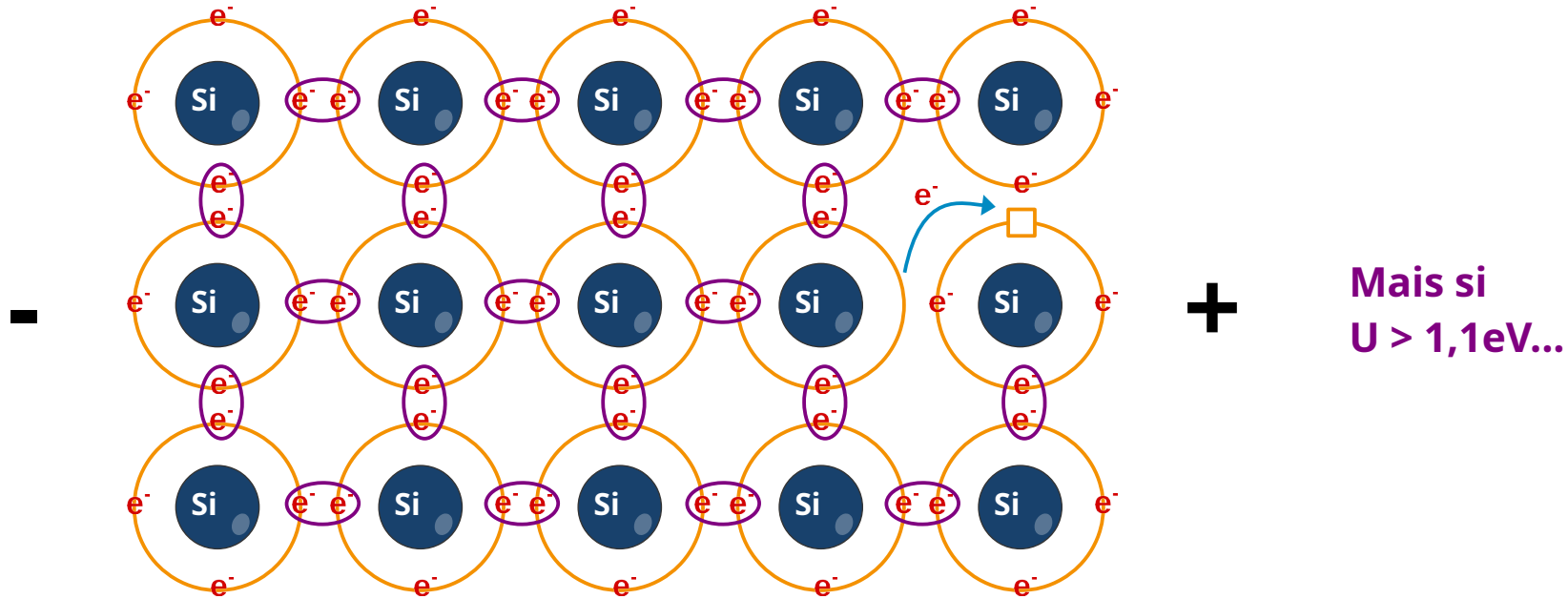


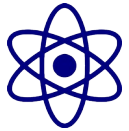


Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

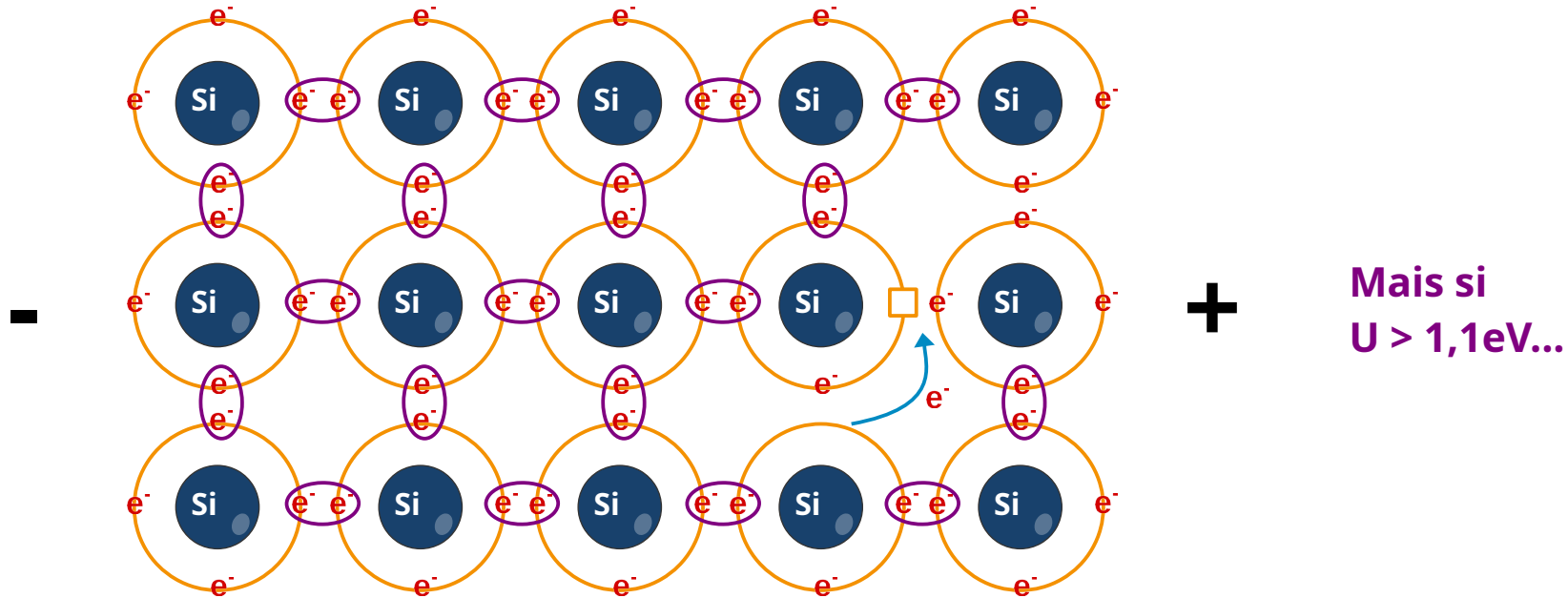


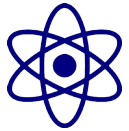


Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

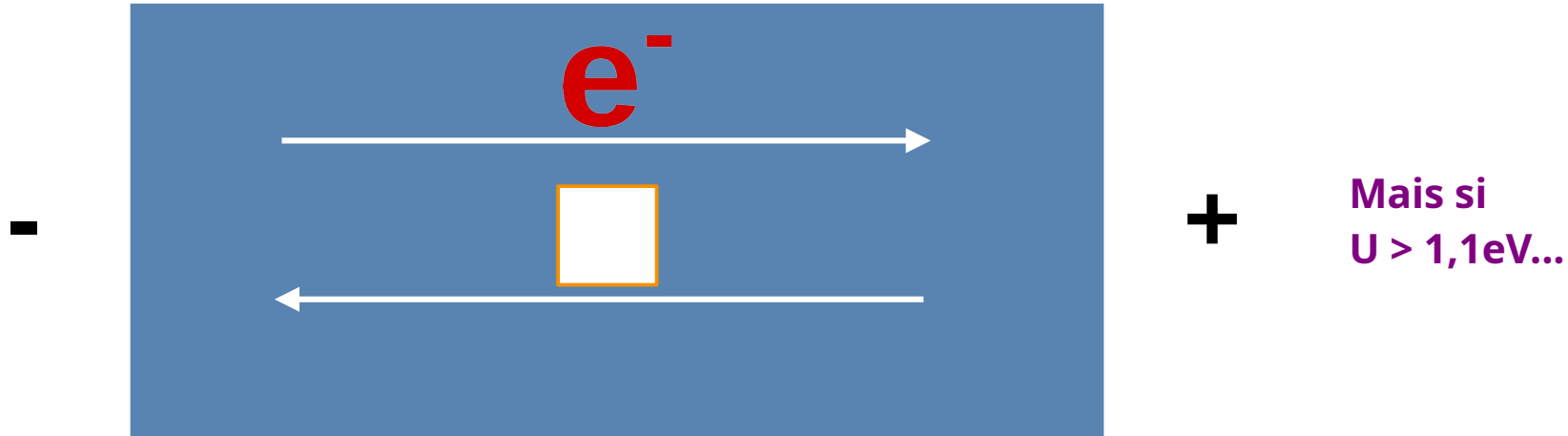


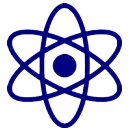


Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Notion de bandes d'énergie : explication avec le silicium

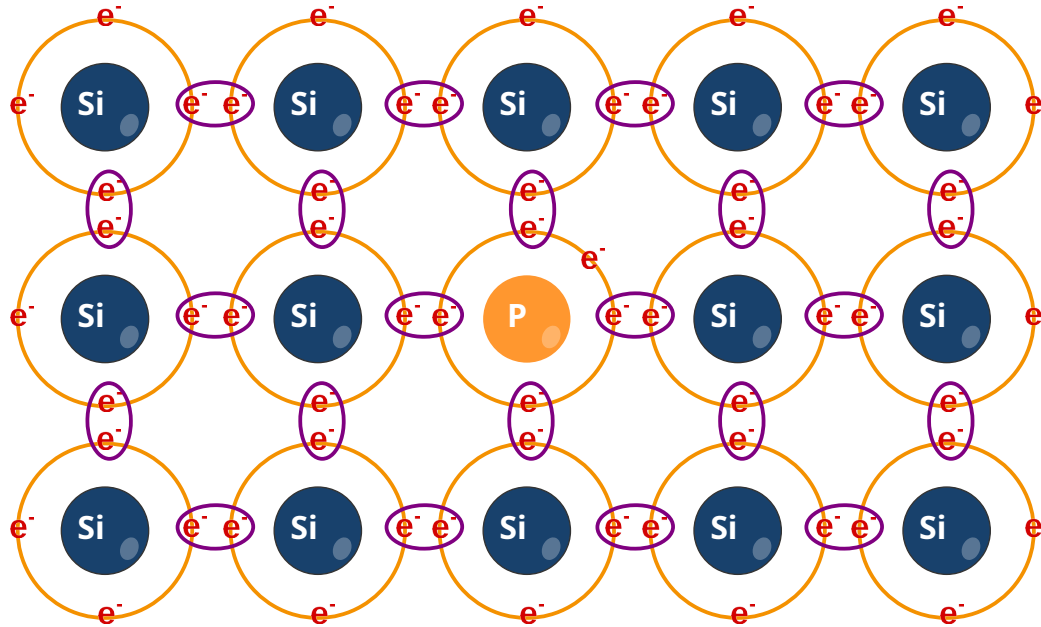




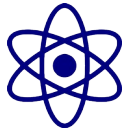
Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Et si on dopait notre silicium ?



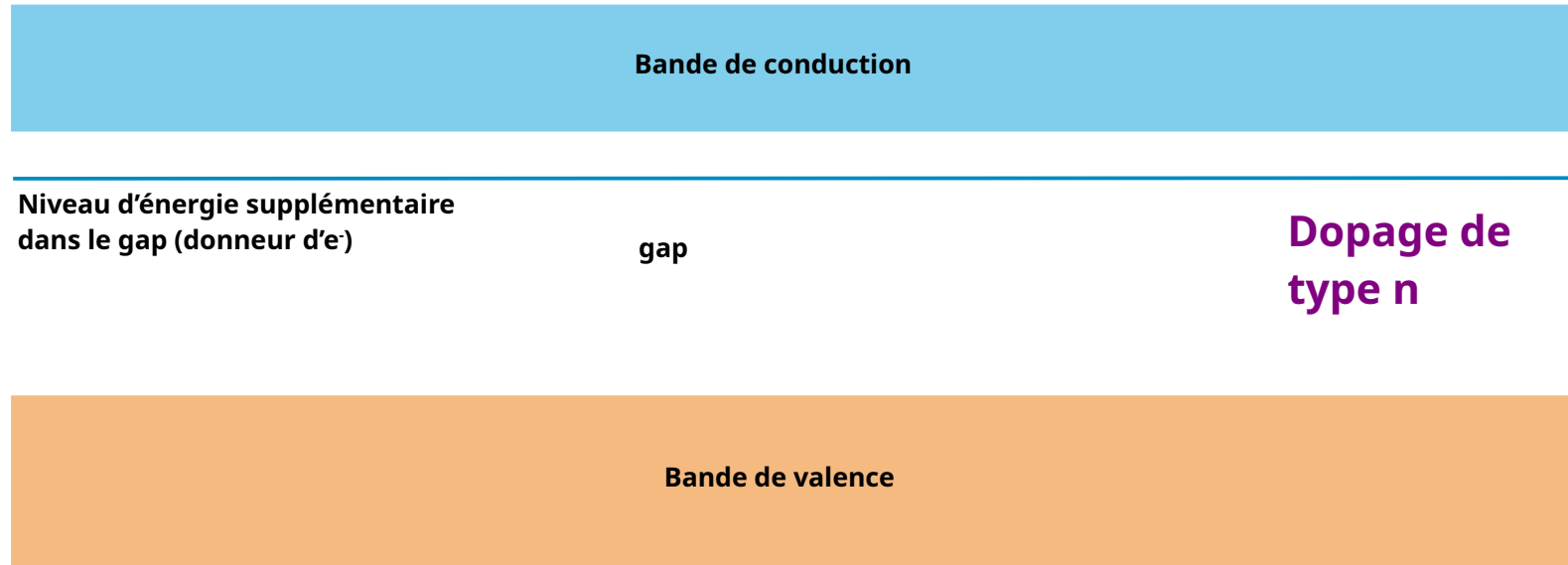
Dopage de
type n

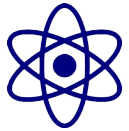


Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Et si on dopait notre silicium ?

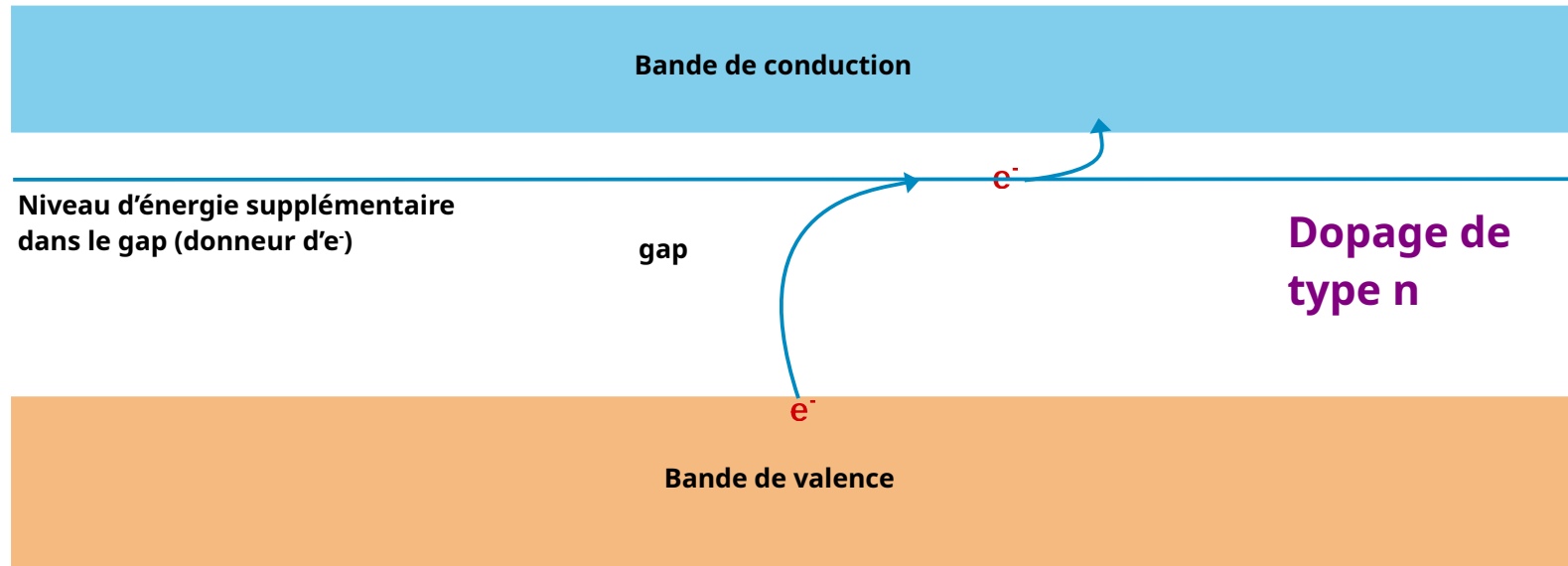


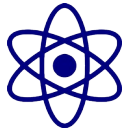


Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Et si on dopait notre silicium ?

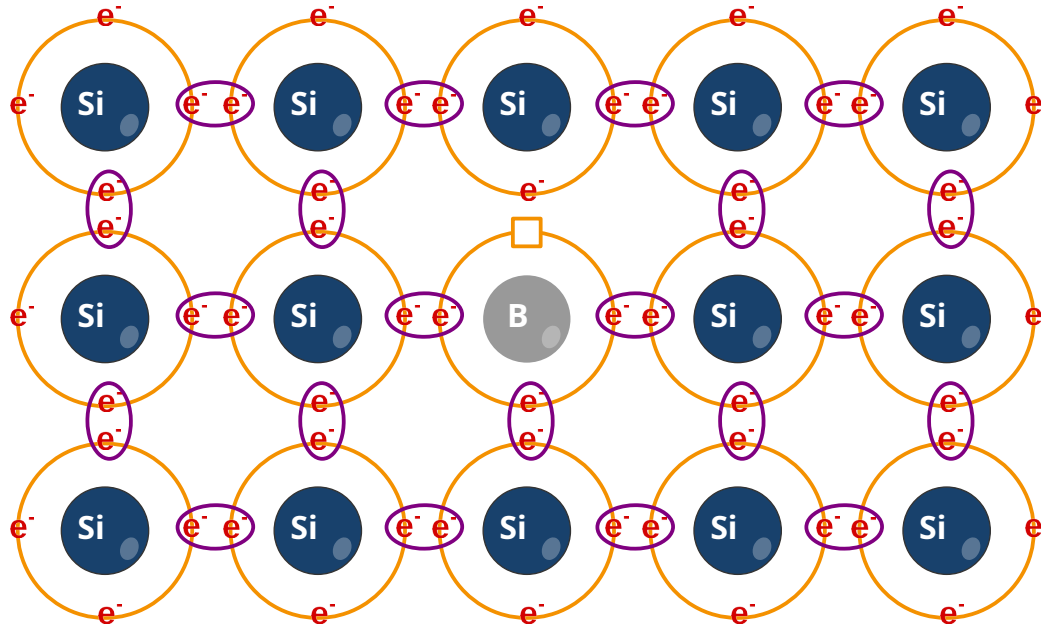




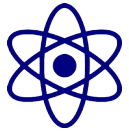
Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Et si on dopait notre silicium ?



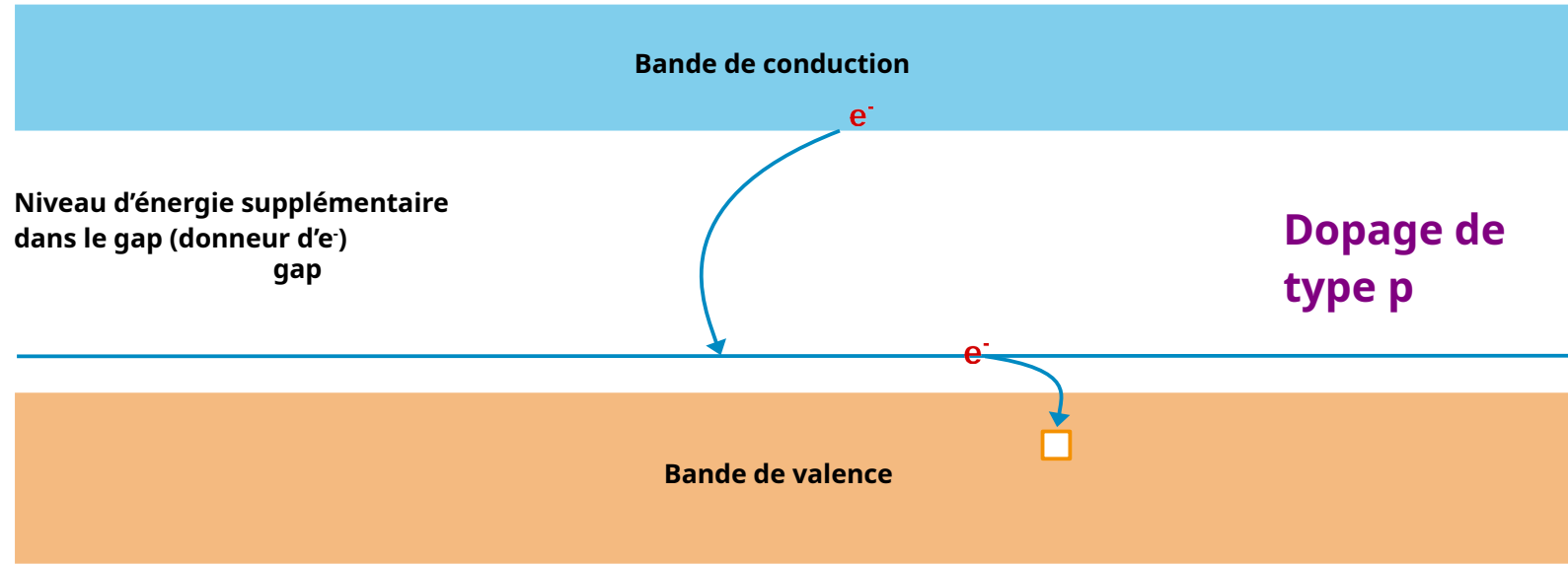
Dopage de
type p

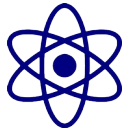


Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Et si on dopait notre silicium ?

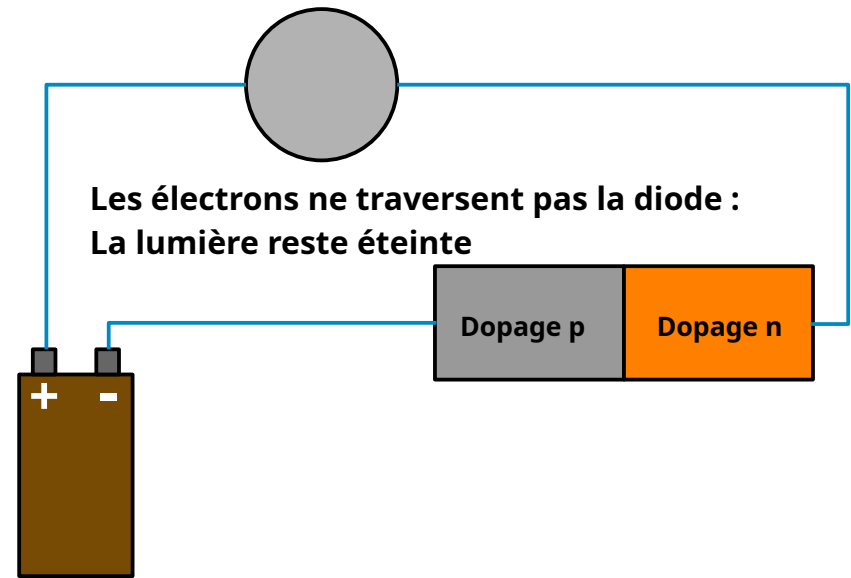
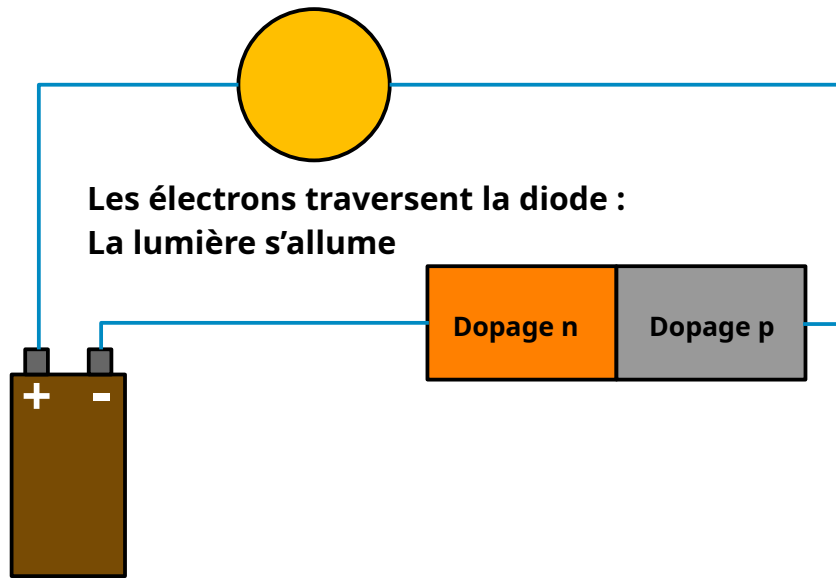


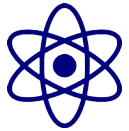


Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Et maintenant on peut créer une diode !

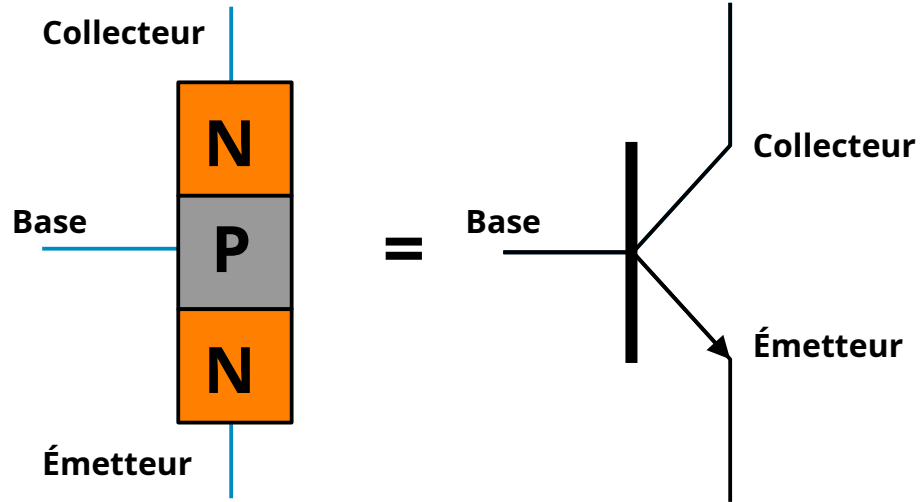




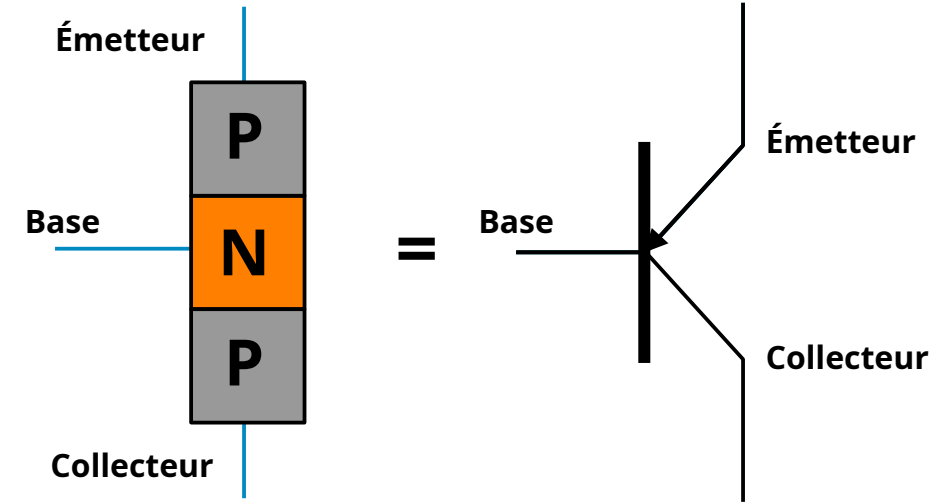
Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

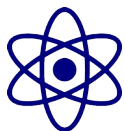
Et des transistors !



Type NPN



Type PNP



Pollution : le prix du progrès !

Semi-conducteurs : la révolution électronique

Matériau	Type	Gap en eV	Applications
Germanium (Ge)	Semi-conducteur	0.67	Détecteurs infrarouges, premières transistors
Silicium (Si)	Semi-conducteur	1.11	Puces électroniques, panneaux solaires
Arséniure de Gallium (GaAs)	Semi-conducteur	1.43	Cellules solaires haute performance, LED
Carbure de Silicium (SiC)	Semi-conducteur	2.3–3.3	Électronique de puissance (voitures électriques)
Oxyde de Zinc (ZnO)	Semi-conducteur	3.3	Cellules solaires, capteurs UV
Nitrure de Gallium (GaN)	Semi-conducteur	3.4	LED bleues, chargeurs rapides
Diamant	Isolant	5.5	Outils de coupe, électronique haute puissance
Oxyde de Magnésium (MgO)	Isolant	7.8	Isolant électrique, revêtements
Quartz (SiO₂)	Isolant	9.0	Verre, isolant électrique
Alumine (Al₂O₃)	Isolant	8.8	Substrats électroniques, céramiques

TODAY

Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Semi-conducteurs : applications

- électronique : puces (CPU, mémoire), smartphones
- énergies renouvelables : panneaux solaires (silicium cristallin)
- santé : capteurs, pace-makers



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Semi-conducteurs : coût environnemental

- extraction du silicium : 1 tonne Si = 1,5 tonnes CO₂ (chauffage 1700°C)
- déforestation pour le charbon, qui reste la source historique
- déchets électroniques : 50 millions de tonnes en 2024, dont seulement 20 % sont recyclés
- présence de métaux lourds (Pb, Cd) dans les anciens composants



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Semi-conducteurs : les difficultés du recyclage électronique

2000

Complexité des composants

→ multi-matériaux : un smartphone contient plus de 60 éléments différents (métaux, plastiques, verre, céramiques)

ex. un iPhone inclut de l'or (Au), de l'argent (Ag), du cuivre (Cu), du lithium (Li), des terres rares (Nd, Dy), et des polymères.

→ séparer ces matériaux nécessite des procédés chimiques et mécaniques complexes.



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Semi-conducteurs : les difficultés du recyclage électronique

2000

Problème des métaux lourds

→ métaux lourds :

Plomb (Pb), mercure (Hg), cadmium (Cd) et arsenic (As) sont présents dans les anciens écrans et batteries

→ risque : intoxications pour les travailleurs

(ex. : saturnisme en Afrique/Ghana, où les DEEE* sont brûlés à ciel ouvert)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Semi-conducteurs : les difficultés du recyclage électronique

2000

Toxicité et risques sanitaires

→ plastiques bromés :

Les retardateurs de flamme bromés (ex : Les polybromodiphényléthers - PBDE) sont cancérigènes et perturbent le système endocrinien

ex. interdits dans l'UE depuis 2006, ils sont encore présents dans les DEEE importés illégalement.



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Semi-conducteurs : les difficultés du recyclage électronique

2000

Toxicité et risques sanitaires

→ PFAS : utilisés dans les circuits imprimés pour leur résistance à la chaleur

→ Problème : persistants et accumulés dans les sols/eaux



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Semi-conducteurs : les difficultés du recyclage électronique

2000

Coûts et rentabilité économique

- faible valeur marchande : récupérer 1 g d'or dans un smartphone nécessite de traiter 1 tonne de DEEE !
- coût : le recyclage coûte 10-20 fois plus cher que l'extraction minière (ex : or)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Semi-conducteurs : les difficultés du recyclage électronique

2000

Manque de technologie adaptée

→ **pyrolyse** : permet de récupérer des métaux, mais libère des gaz toxiques (dioxines)

→ **hydrométallurgie** : Utilise des acides (H_2SO_4 , HCl) pour dissoudre les métaux

→ **déchets liquides polluants**

→ **méthode mécanique** : broyage + séparation magnétique/électrostatique

→ **perte de 30-50% des métaux**



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Semi-conducteurs : les difficultés du recyclage électronique

2000

Manque de technologie adaptée

Innovations émergentes :

- **bio-lixiviation** : Utilisation de bactéries (ex : *Thiobacillus ferrooxidans*) pour extraire les métaux.
- **plasma** : technologie coûteuse mais efficace pour séparer les alliages



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Semi-conducteurs : les difficultés du recyclage électronique

2000

Toxicité et risques sanitaires

→ plastiques bromés :

Les retardateurs de flamme bromés (ex : Les polybromodiphényléthers - PBDE) sont cancérigènes et perturbent le système endocrinien

ex. interdits dans l'UE depuis 2006, ils sont encore présents dans les DEEE importés illégalement.



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Semi-conducteurs : les difficultés du recyclage électronique

2000

Coûts et rentabilité économique

→ logistique complexe :

→ collecte : Seulement 40% des DEEE sont correctement collectés en Europe (Eurostat, 2023)

→ Tri : nécessite des centres spécialisés

"En 2023, seulement 17,4% des DEEE mondiaux ont été recyclés de manière sécurisée."
(Rapport ONU, Global E-waste Monitor)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Semi-conducteurs : les difficultés du recyclage électronique

2000

Réglementations et fraudes

→ exportations illégales :

→ 60% des DEEE européens sont exportés illégalement vers l'Afrique/Asie
(Interpol, 2022)

→ Ex. Agbogbloshie (Ghana), où les enfants brûlent les câbles pour récupérer le Cu



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Semi-conducteurs : les difficultés du recyclage électronique

2000

Réglementations et fraudes

→ directives européennes :

→ directive DEEE (2012/19/UE) : Oblige les fabricants à recycler 65% des DEEE collectés

→ problème : le manque de contrôles dans les pays en développement



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Semi-conducteurs : impacts environnementaux

Pollution des sols et des eaux

→ métaux lourds : Pb, Hg, Cd s'infiltrant dans les nappes phréatiques

→ ex. à Guiyu (Chine), les sols contiennent 37 fois plus de plomb que la normale

→ plastiques : les DEEE libèrent des microplastiques et des additifs toxiques (phtalates, PBDE)

"Un seul écran CRT (ancien moniteur) contient 2-4 kg de plomb." (Greenpeace, 2020)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Semi-conducteurs : impacts environnementaux

Émissions de Gaz à Effet de Serre

→ incinération :

→ Brûler 1 tonne de DEEE libère 2 tonnes de CO₂ + des dioxines

→ extraction minière :

→ récupérer 1 kg d'or dans les DEEE évite l'extraction de 7 tonnes de minerai (et ses émissions associées).



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Semi-conducteurs : impacts environnementaux

Épuisement des Ressources

→ terres rares :

→ 90% du néodyme (pour les aimants) et 60% du cobalt (batteries) viennent de Chine et du Congo (conditions minières critiques)

→ ex. une mine de cobalt au Congo emploie 40 000 enfants !



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Semi-conducteurs : impacts environnementaux

2000

Conflits géopolitiques

La Chine contrôle 80% de la production de terres rares

→ risques d'approvisionnement pour l'UE/USA



Un « burner boy » à Agbogbloshie (Ghana)









Physique pour tous - Thierry DAVIER

S

TODAY

Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Semi-conducteurs : impacts environnementaux

2000

Enjeux de Demain pour l'Électronique

→ Objectifs UE 2030 : 70% de recyclage des DEEE

→ incorporation de 30% de matériaux recyclés dans les nouveaux produits

TODAY

Pollution : le prix du progrès !

TODAY

Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Semi-conducteurs : impacts environnementaux

Enjeux de Demain pour l'Électronique

→ éco-conception :

→ modularité : appareils faciles à démonter (ex : Fairphone).

→ matériaux biosourcés : remplacer les plastiques par des polymères à base d'algues ou de chanvre.

Ex. : Apple utilise désormais 100% d'aluminium recyclé pour ses boîtiers MacBook



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Semi-conducteurs : impacts environnementaux

Réglementations et Sensibilisation

- Directive européenne sur les batteries (2023) :
 - recyclage obligatoire de 70% du lithium d'ici 2030
- passeport numérique pour tracer les matériaux
- actions de sensibilisation :
 - "The Restart Project" (UK) : réparer plutôt que jeter
- éducation : intégrer le recyclage des DEEE dans les programmes scolaires



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Semi-conducteurs : impacts environnementaux

Défis Géopolitiques et Éthiques

→ Dépendance aux terres rares :

UE : Projet "European Raw Materials Alliance" pour réduire la dépendance à la Chine

USA : Relance des mines de terres rares (ex : Mountain Pass, Californie)

Travail des enfants :

Initiatives comme "Fair Cobalt Alliance" pour améliorer les conditions dans les mines du Congo



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Semi-conducteurs : impacts environnementaux

Limites Planétaires et Matériaux

→ Dépassement des capacités de la Terre :

→ l'extraction des terres rares et des métaux dépasse 4 des 9 limites planétaires (Rockström, 2023) :

- Changement climatique (émissions CO₂).
- Perturbation des cycles biogéochimiques (métaux lourds).
- Utilisation des sols (mines).
- Pollution chimique (PFAS, plastiques)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Semi-conducteurs : impacts environnementaux

2000

Solutions :

- réduire la demande : Allonger la durée de vie des appareils
(ex : droit à la réparation en UE)
- substituer les matériaux : remplacer le cobalt par du fer dans les batteries
(ex : batteries LFP de Tesla)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Semi-conducteurs : impacts environnementaux

2000

Vers une Électronique Durable ?

Les DEEE sont le symbole des défis du XXI^e siècle : une technologie qui a révolutionné nos vies, mais dont le recyclage reste un casse-tête écologique et social. Les solutions existent – économie circulaire, éco-conception, biochar – mais elles nécessitent une volonté politique et citoyenne. Et si demain, nos smartphones étaient 100% recyclables et biodégradables ?



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Composites : l'ère de l'aérospatial

2000



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Composites : l'ère de l'aérospatial

Matériau clé : Fibre de carbone + résines (années 1960)

→ Innovations :

→ Avions (Airbus A350 : 50% du poids = composites).

→ Éoliennes (pales en fibre de verre)



Pollution : le prix du progrès !

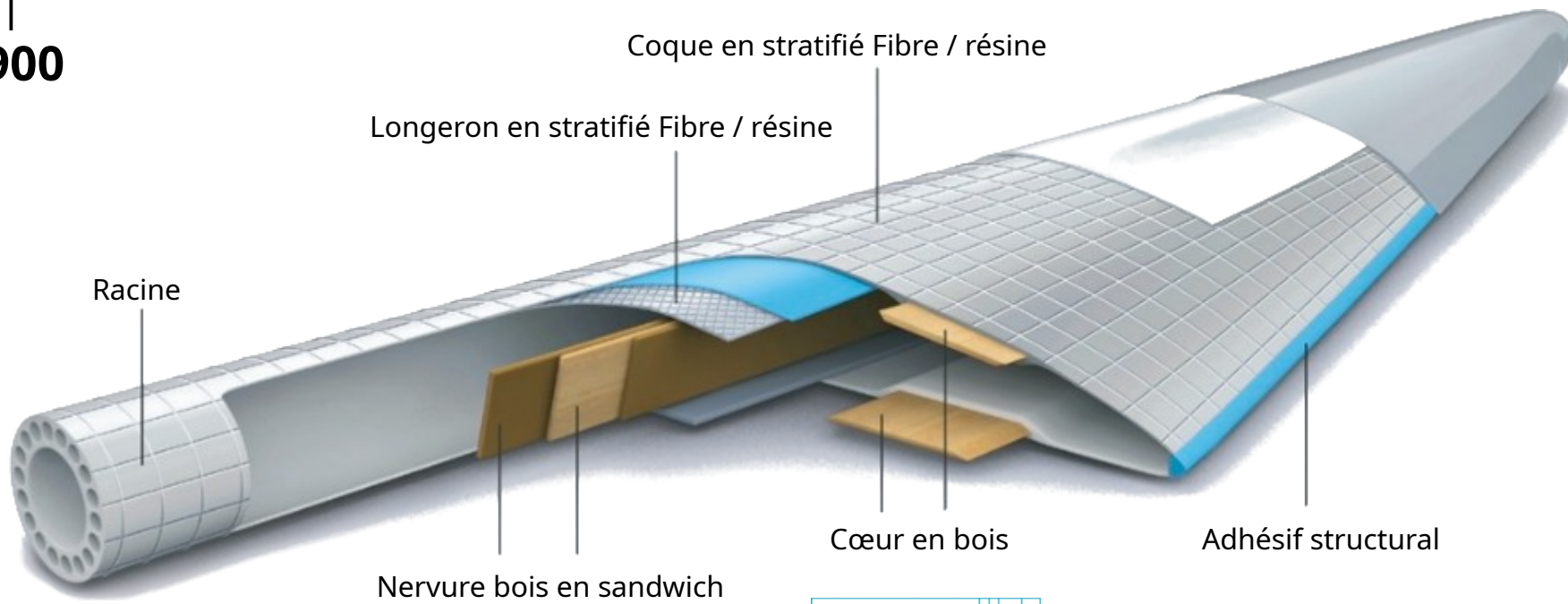


Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000





Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Composites : l'ère de l'aérospatial

2000

Matériau clé : Fibre de carbone + résines (années 1960)

→ Impact environnemental :

→ Non-recyclable : 95% des composites finissent en décharge !

→ Émissions : 1 kg de fibre de carbone = 20 kg de CO₂



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Composites : à la maison

ex. lames de terrasse en composite

→ obtenues par extrusion ou parfois par moulage par injection

→ recyclage de bois (poussière, copeaux)

→ avec un polymère liant : PP, PE ou PVC



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Composites : à la maison

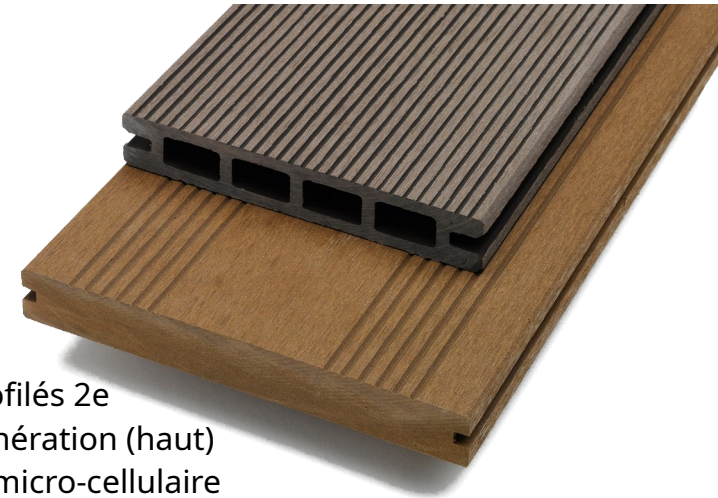
2000



OSB



BLC



Profilés 2e
génération (haut)
et micro-cellulaire
de 3e génération
(bas) (Geolam)



Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

Composites : n'oublions pas les composites amianté !

2000





Pollution : le prix du progrès !



Le 20ème siècle

L'Ère du Pétrole et des Polymères

1900

2000

Avant de passer le cap de l'an 2000...

La crise Environnementale nous fait prendre conscience !

→ des pollutions majeures

→ marées noires : Erika, 1999, entre 7 000 et 10 000 tonnes de pétrole sur la plage !

→ les pluies acides : le SO_2 des usines retombe sur les forêts !

→ trou dans la couche d'ozone : découvert dans les années 80, du fait des CFC

→ des catastrophes climatiques : tempête Lothar du 26/12/1999



Pollution : le prix du progrès !



Le 21ème siècle

L'Ère des Limites Planétaires

2000

Les matériaux modernes et leurs défis

2035



Pollution : le prix du progrès !



Le 21ème siècle

L'Ère des Limites Planétaires

2000

Les matériaux modernes et leurs défis

2035

Les PFAS

- 1938 : premier PFAS découvert aux USA par Roy Plunkett, de Du Pont de Nemours
- alors qu'il cherchait à refroidir un gaz avec de la neige carbonique, il a obtenu une poudre qui résistait à tout !
- ils sont largement utilisés depuis les années 1950 dans :



Pollution : le prix du progrès !



Le 21ème siècle

L'Ère des Limites Planétaires

- Composants pour emballages alimentaires en papier et en carton ;
- Mousse anti-incendie ;
- Produits utilisés pour la photographie, la lithographie ;
- Le fart utilisé sous les skis pour améliorer la glisse ;
- Isolant pour fils électriques, câbles électroniques ;
- Certains produits ménagers, agents ou imperméabilisants ou antitaches dans l'industrie du textile (vêtements de pluie, moquettes et tissus d'ameublement) ;
- Ustensiles de cuisine anti-adhésion, embouts buccaux de cigarette électronique, semelles de fers à repasser ;
- Lubrifiants et cires pour sols et voitures, dans la fabrication de cosmétiques ou encore agents antibuée, antistatiques ou réfléchissants pour vernis et peintures ;



Pollution : le prix du progrès !



Le 21ème siècle

L'Ère des Limites Planétaires

2000

Les matériaux modernes et leurs défis

2035

Les PFAS aujourd'hui :

- les perfluoroalkylées : des polluant extrêmement persistants !
- une large famille de plus de quatre mille composés chimiques
- ils les PFAS se retrouvent dans tous les compartiments de l'environnement
- ils représentent un véritable défi pour Demain !!



Pollution : le prix du progrès !

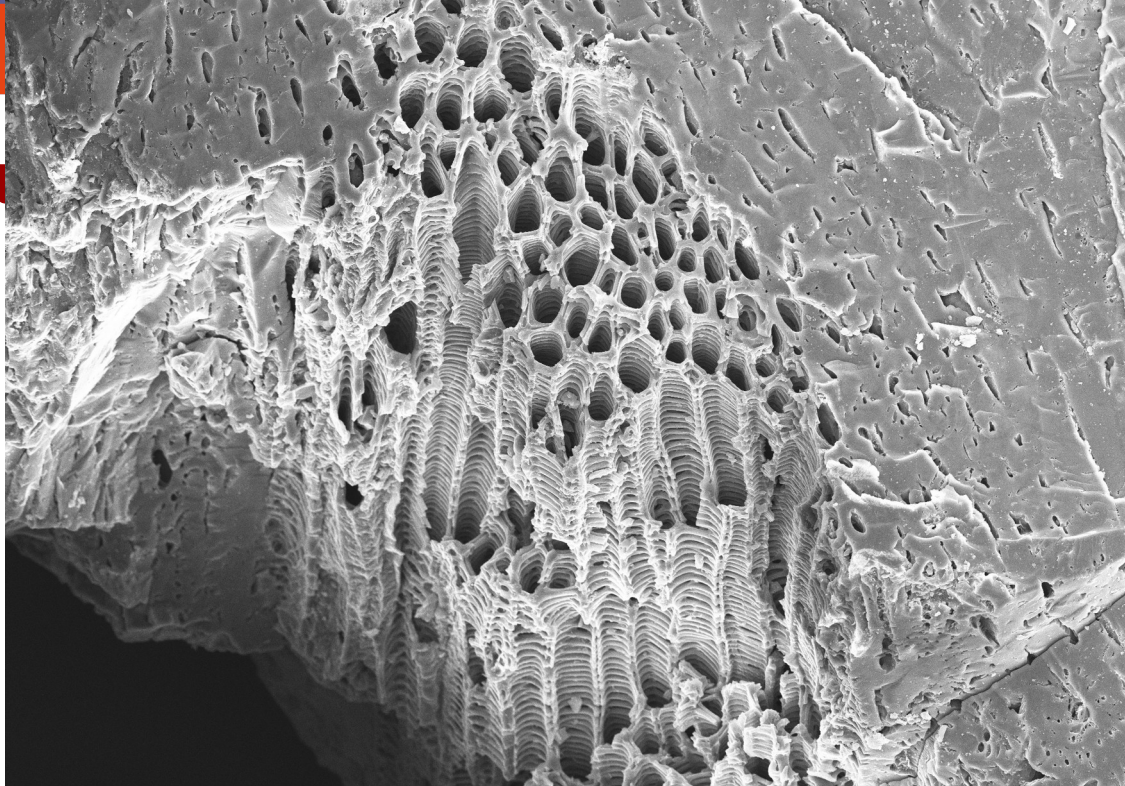


Le 21ème siècle

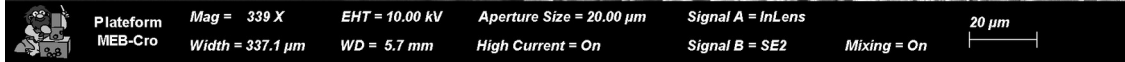
2000

Les matériaux

2035



charbon actif





Pollution : le prix du progrès !



Le 21ème siècle

L'Ère des Limites Planétaires

2000

Les matériaux modernes et leurs défis

2035

Le top 5 des matériaux les plus polluants



Matériau	Source principale	Impacts environnementaux	Impacts sanitaires	Exemple concret
Microplastiques	Dégradation des plastiques	Pollution des océans, ingestion par la faune	Perturbation endocrine, cancers	8 millions de tonnes/an dans les océans
PFAS	Revêtements antiadhésifs, mousses anti-incendie	Persistance extrême, contamination des eaux	Cancers, troubles thyroïdiens	Détection dans le sang de 99% des humains
Métaux lourds	Batteries, électronique	Pollution des sols, acidification des eaux	Saturnisme, troubles neurologiques	Recyclage informel en Afrique/Asie
Béton	Construction	Émissions de CO ₂ (8% mondiales), artificialisation	Particules fines (silice)	30 milliards de tonnes/an produites
Terres rares	Électronique, énergies vertes	Déforestation, pollution aux acides	Maladies pulmonaires (mineurs)	90% extraites en Chine



Pollution : le prix du progrès !



Le 21ème siècle

L'Ère des Limites Planétaires

2000

2035

Les matériaux modernes et leurs défis

Les 9 limites planétaires :

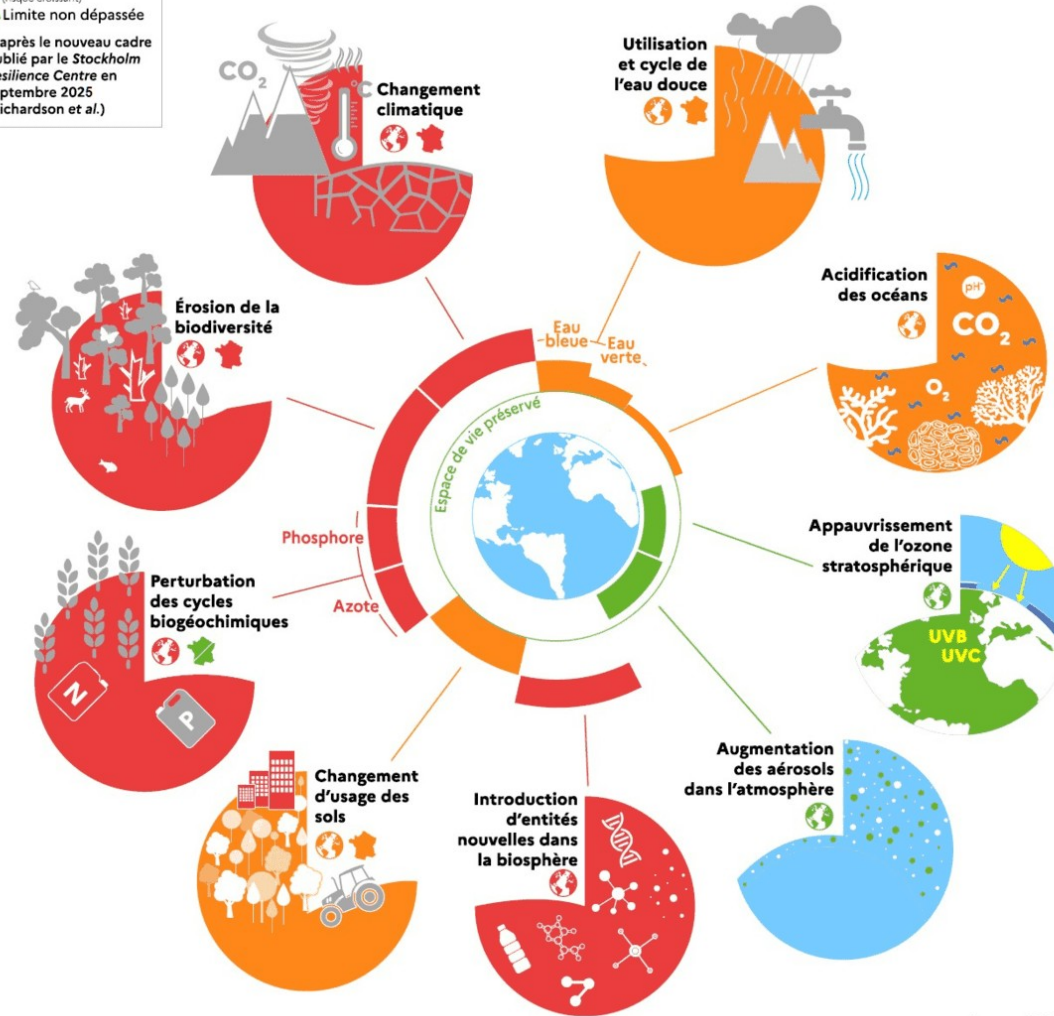
- le changement climatique ;
- la destruction de la biodiversité ;
- l'utilisation massive d'engrais (l'azote et le phosphore) ;
- le changement d'usage des sols (la déforestation) ;
- le cycle de l'eau douce ;
- le rejet de nouvelles substances dans la nature ;
- l'acidification des océans ;
- l'appauvrissement de la couche d'ozone ;
- l'augmentation du nombre de particules dans l'atmosphère.



Les 9 limites planétaires

- ▲ Limite dépassée (risque élevé)
- ▲ Limite dépassée (risque croissant)
- ▲ Limite non dépassée

D'après le nouveau cadre publié par le Stockholm Resilience Centre en septembre 2025 (Richardson et al.)





Pollution : le prix du progrès !



Le 21ème siècle

L'Ère des Limites Planétaires

2000

2035

Les matériaux modernes et leurs défis

Les 9 limites planétaires :

- le changement climatique ;
- la destruction de la biodiversité ;
- l'utilisation massive d'engrais (l'azote et le phosphore) ;
- le changement d'usage des sols (la déforestation) ;
- le cycle de l'eau douce ;
- le rejet de nouvelles substances dans la nature ;
- l'acidification des océans ;
- l'appauvrissement de la couche d'ozone ;
- l'augmentation du nombre de particules dans l'atmosphère.



Pollution : le prix du progrès !



Le 21ème siècle

L'Ère des Limites Planétaires

2000

Les matériaux modernes et leurs défis

2035

Auxquelles on peut rajouter une dixième limite planétaire :



Pollution : le prix du progrès !



Le 21ème siècle

L'Ère des Limites Planétaires

2000

Les matériaux modernes et leurs défis

2035

Auxquelles on peut rajouter une dixième limite planétaire :

La capacité de l'être humain à financer la dépollution !



Pollution : le prix du progrès !



Le 21ème siècle

L'Ère des Limites Planétaires

2000

Les matériaux modernes et leurs défis

2035

Technologie	Avantages	Défis	Exemple
Bio-lixiviation	Moins polluante, utilise des bactéries.	Lente (plusieurs jours).	Projet BioMine (UE).
Robotique de tri	Précision (IA + bras robotisés).	Coût élevé.	Usine Apple Robotics (Texas).
Blockchain	Traçabilité des métaux recyclés.	Consommation énergétique.	Projet Circular .
Impression 3D	Réutilisation des plastiques broyés.	Qualité variable.	Filaments Recycl3D .



Pollution : le prix du progrès !



Le 21ème siècle

L'Ère des Limites Planétaires

2000

Les matériaux modernes et leurs défis

2035

Matériau	Innovation récente	Problème environnemental	Solution durable
Polymère	Bioplastique (PLA, à base de maïs)	9 % recyclés, microplastiques	Champignons dégradeurs (ex. Aspergillus)
Semi-conducteurs	Puce 3D (2010)	Terres rares, e-déchets	Recyclage des métaux (95 % récupérables)
Composites	Fibres naturelles (linigne + résine bio)	Non-biodégradable	Thermoplastiques recyclables



Pollution : le prix du progrès !



Le 21ème siècle

L'Ère des Limites Planétaires

2000

Les matériaux modernes et leurs défis

2035

Et d'autres solutions durables :

→ Pyrolyse des plastiques → carburant

→ Hydrométallurgie pour les métaux (ex : récupération de l'or dans les téléphones)



Pollution : le prix du progrès !



Le 21ème siècle

L'Ère des Limites Planétaires

2000

Les matériaux modernes et leurs défis

2035

Et d'autres solutions durables :

→ packaging en mycellium :

→ transformé en matériau d'emballage, il offre une alternative remarquable aux plastiques traditionnels



Pollution : le prix du progrès !



Le 21ème siècle

2000

Les matér

Et d'autres solu

→ packaging en
→ transform
aux plastiques t



2035

ve remarquable



Pollution : le prix du progrès !



Le 21ème siècle

L'Ère des Limites Planétaires

2000

De la Renaissance à l'Anthropocène : leçons pour demain

2035

Renaissance → Verre/papier → libération de la connaissance

Révolution industrielle → Charbon/acier → pollution massive

XX^e siècle → Plastique/semi-conducteurs → crise écologique

XXI^e siècle → Écomatériaux/recyclage → espoir de durabilité



Pollution : le prix du progrès !



Le 21ème siècle

L'Ère des Limites Planétaires

2000

De la Renaissance à l'Anthropocène : leçons pour demain

2035

"Chaque époque a ses matériaux emblématiques, mais aussi ses limites. Aujourd'hui, notre défi est de créer des matériaux qui respectent les limites planétaires, sans sacrifier le progrès. Votre génération a les clés pour y parvenir."