Construction des Savoirs :
Le tableau périodique des éléments

Formation continue – OSUG et Rectorat de Grenoble
Jeudi 9 octobre 2025

Eric Quirico – Professeur UGA IPAG

UGA Université Grenoble Alpes

OSUG Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble

Région académique Auvergne-Rhône-Alpes

Tableau périodique des Eléments Wikipedia

Tableau périodique des éléments

CAS	IA	IIA		IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIIIB	VIIIB	VIIIB	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
IUPAC	IA	IIA		IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIII	VIII	VIII	IB	IIB	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	O
	Bloc s		f	Bloc d										Bloc p					(He dans bloc s)
↓→	1	2		3[b]	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg												13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca		21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr		39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			↓																
Lanthanides	*			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
Actinides	**			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

Légende

94 Pu
← Numéro atomique
← Symbole chimique

L'abondance naturelle est indiquée par le bord des cases :

Trait continu	Élément primordial
Tirets épais	Produit de désintégration d'autres éléments
Pointillés clairs	Élément synthétique (artificiel)

L'état standard à 0 °C et 1 atm est indiqué par la couleur du numéro atomique :

Noir	Bleu	Rouge	Gris
Solide	Liquide	Gazeux	Inconnu

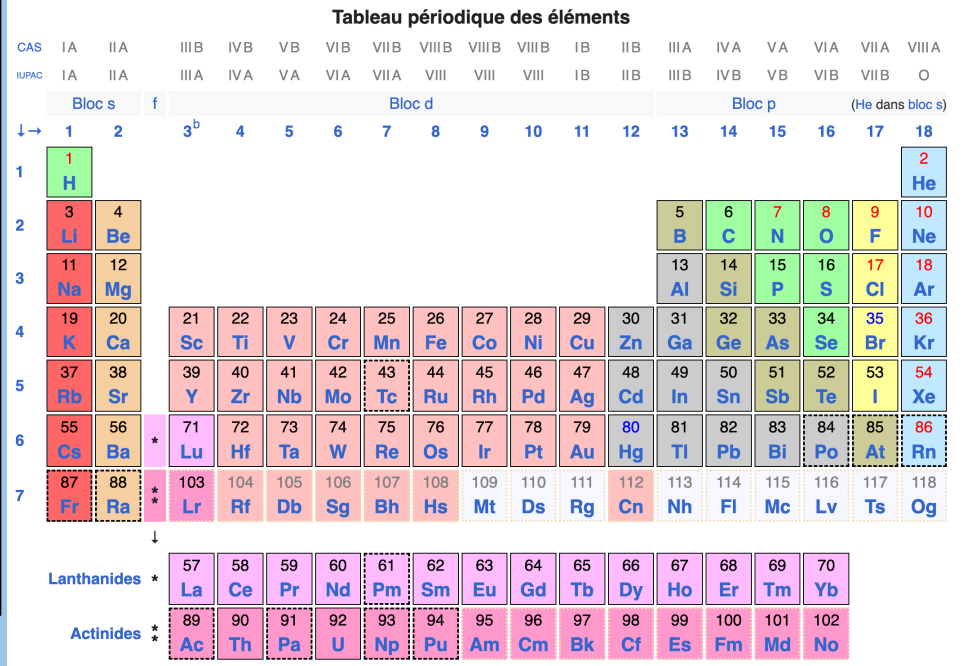
Métaux						Non-métaux			
Alcalins	Alcalino-terreux	Lanthanides / Actinides	Métaux de transition	Métaux pauvres	Métalloïdes	Autres non-métaux	Halogènes	Gaz nobles	Éléments non classés

Chimie

Métaux ~ 77%						Non-métaux			
Alcalins	Alcalino-terreux	Lanthanides / Actinides	Métaux de transition	Métaux pauvres	Métalloïdes	Autres non-métaux	Halogènes	Gaz nobles	Éléments non classés

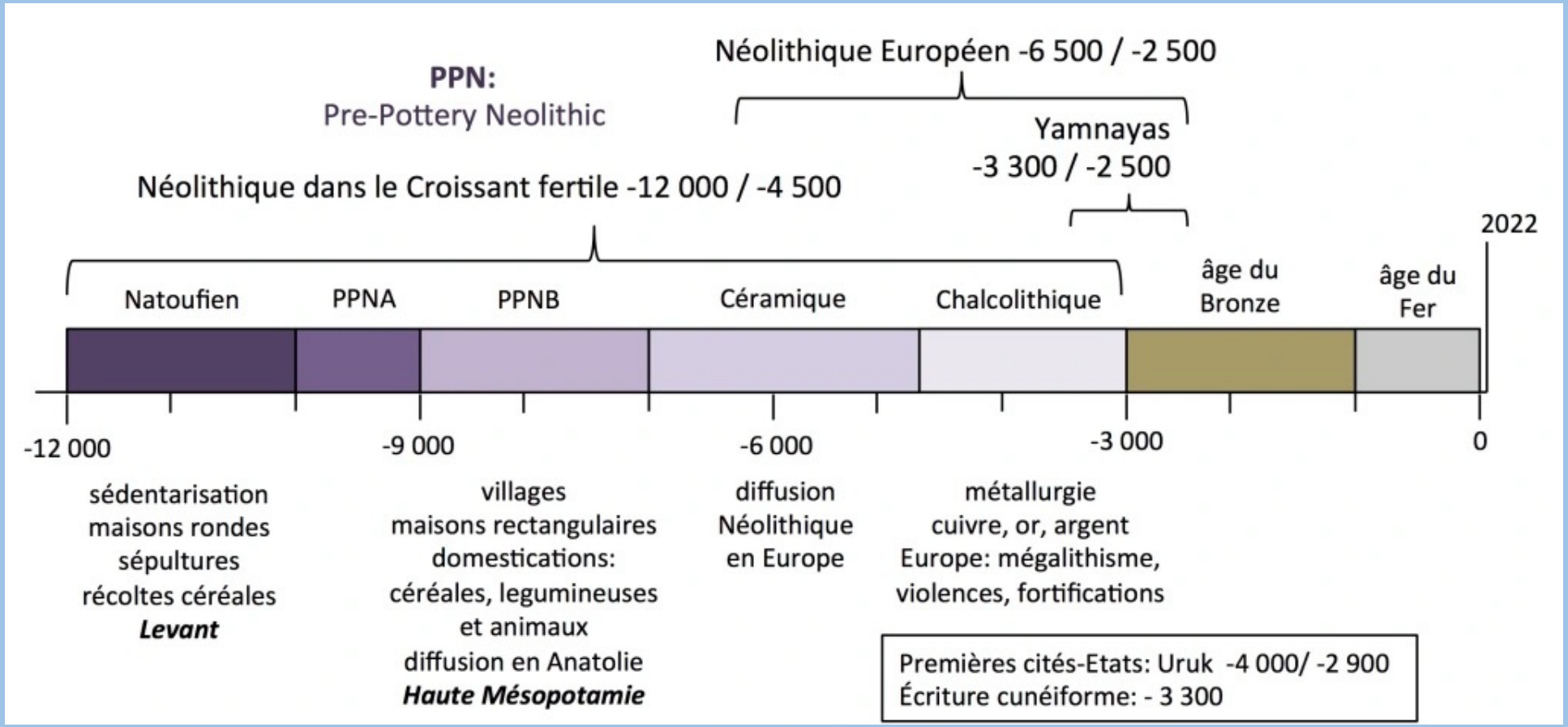
- Gaz rares : orbitales remplies. Inertes.
- Halogènes : forte électronégativité, très réactifs.
- Autres non-métaux : H, C, N, O, P, S molécules biologiques
- Métalloïdes : propriétés intermédiaires entre métaux et non-métaux. Conductivité électrique faible.
- Métaux de transition : bon conducteurs électrique, point de fusion élevé, couche d incomplète (ou cation couche d incomplète), niveaux oxydation divers.
- Métaux pauvres : moins bons conducteurs, point de fusion plus bas, tendance à former des liaisons covalentes et des anions.
- Lanthanides : « terres rares » avec Y et Sc. Peu conducteur. Fragiles. Electropositifs. Rayon ionique diminue lorsque Z augmente (contraction des lanthanides).
- Actinides : Radioactives. Diversité des caractéristiques chimiques. Propriétés des métaux.
- Alcalino-terreux : famille homogène. Métaux brillants. Mou. Réactifs à l'air. Forment ions chargés 2+.
- Alcalins : famille homogène. Métaux brillants. Liaison métallique faible. Mou. Réactifs à l'air. Forment ions chargés 1+.

Métaux natifs (libres) : ~1% (or, platine, argent, cuivre, fer météoritique) **Oxydes : ~60%** (fer, aluminium, titane…) **Sulfures : ~15%** (cuivre, plomb, zinc, nickel…) **Carbonates : ~5%** (cuivre, fer…) **Silicates et phosphates : ~15%** (lithium, terres rares…)



Les Eléments chimiques de la préhistoire au moyen-âge

Plusieurs **éléments chimiques étaient « connus »** et largement utilisés pendant l'antiquité, certains même depuis la préhistoire. Toutefois, il ne s'agissait **pas d'une connaissance au sens de la science moderne**. D'une manière générale, la découverte d'un élément chimique résulte d'apports multiples dans des contextes socio-culturels très différents.



Les Eléments chimiques de la préhistoire au moyen-âge

Soufre

Premières traces dès 6000 ans av JC en Anatolie, Italie, Chine
Produit à partir de la Galène (PbS) par chauffage + condensation

Dépôts volcaniques
Gisements souterrains

Antiseptique : utilisé pour purifier l'habitat et le linge
Pesticide
Maladie de peau
Fabrication de la poudre noire (Chine)
Blanchiment des tissus et des peaux
Extraction or et argent par cémentation
Rituels religieux, Alchimie



Les Eléments chimiques de la préhistoire au moyen-âge

Carbone (charbon)

Premières traces dès 40000 ans av JC
Charbon de bois, tourbe, graphite, diamant

Feu, cuisson des aliments
Pigments (peintures pariétales)
Réduction des métaux
Cémentation du fer
Cuisson des céramiques
Cosmétiques
Mines dessin (graphite)
Joaillerie
Médecine (bitumes)



Bitume utilisé pour la momification (Egypte)

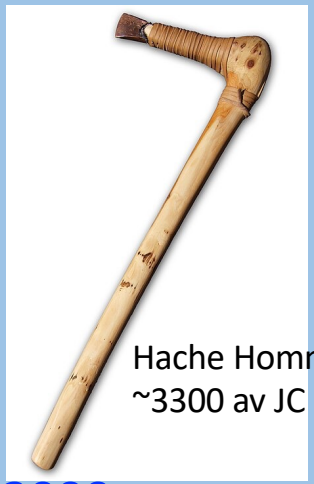


Grotte de Lascaux, Salle des Taureaux

Les Eléments chimiques de la préhistoire au moyen-âge



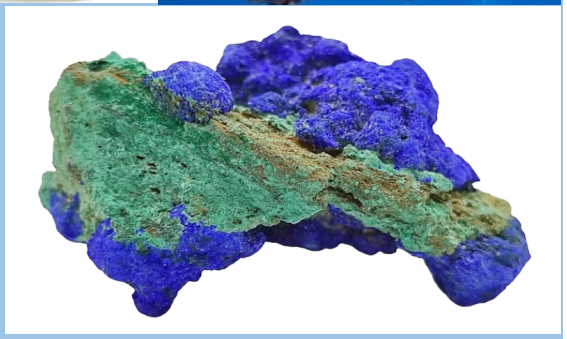
Bracelet en cuivre martellé



Hache Homme de Ozti
~3300 av JC







Age du cuivre – vers 5000-3000 ans avant JC

Moyen-Orient, Egypte, Inde, Chine, Europe
Utilisation de cuivre natif (rare), puis début de la métallurgie.
Outils, armes, bijoux.

<u>Principaux minerais</u> :
Malachite $Cu_2(CO_3)(OH)_2$
Azurite $Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$
Cuprite (Cu_2O)
Chrysocolle ($CuSiO_3 \cdot 2H_2O$)

Réduction du cuivre par chauffage, développement de four montant à > 1080 °C
Coulage ou martellage



Reconstitution d’un atelier de chauffage, Ayn Soukhna (Egypte)
https://www.youtube.com/watch?v=MnCyv16zP0A





Etape 1 : soufflerie avec 2 pipes permettant d’atteindre le point de fusion
Etape 2 : les billes de minerais se transforment en une pâte
Etape 3 : bain de fusion au centre du creuset, concentration dès 1150°C
Etape 4 : dégazage du bain avec tige en bois vert, dégagement du charbon
Etape 5 : Manipulation avec un bâton de bois sec, Coulées



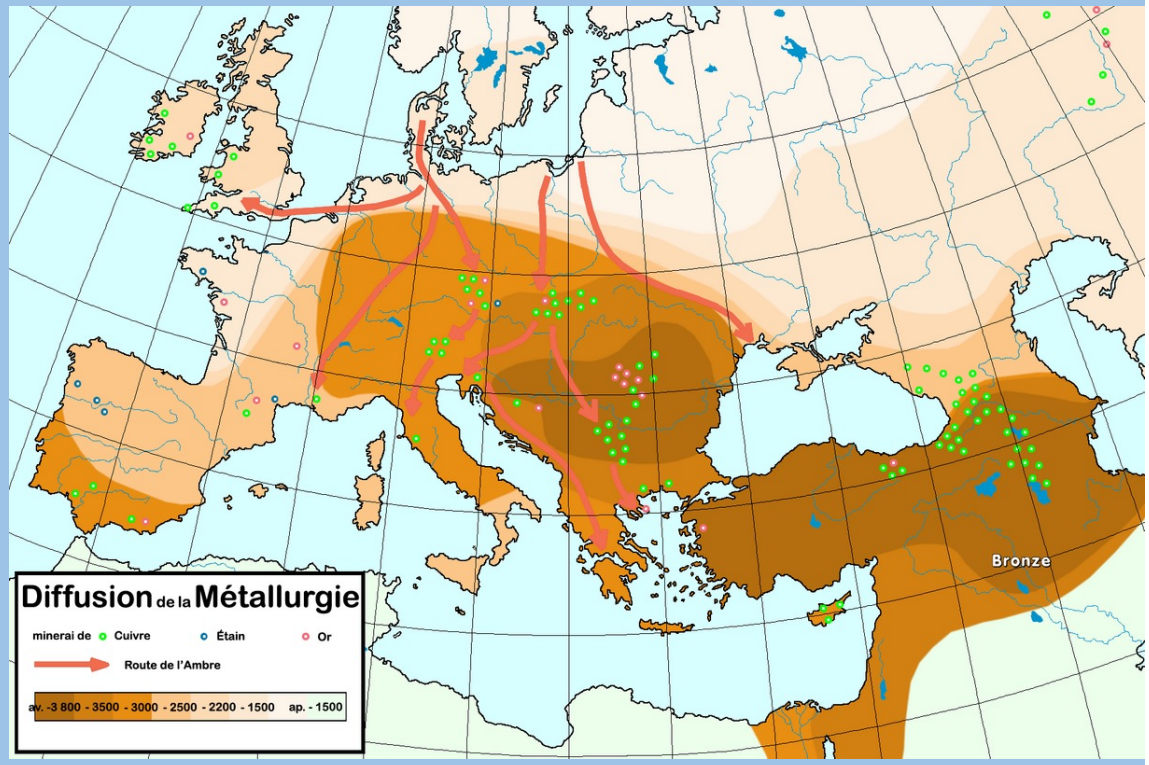
Les Eléments chimiques de la préhistoire au moyen-âge

Age du bronze – vers 3000-1200 ans avant JC

Moyen-Orient, Egypte, Inde, Chine, Europe, Amérique
Alliage du Cu avec Sn (étain)
Rend le cuivre plus dur
Armes, Outils

<u>Principaux minerais</u> :
Cassitérite (SnO_2)
Stannite (Cu_2FeSnS_4) (plus rare)

Mines en Cornouaille, Péninsule ibérique, Bohême, Asie centrale, Anatolie





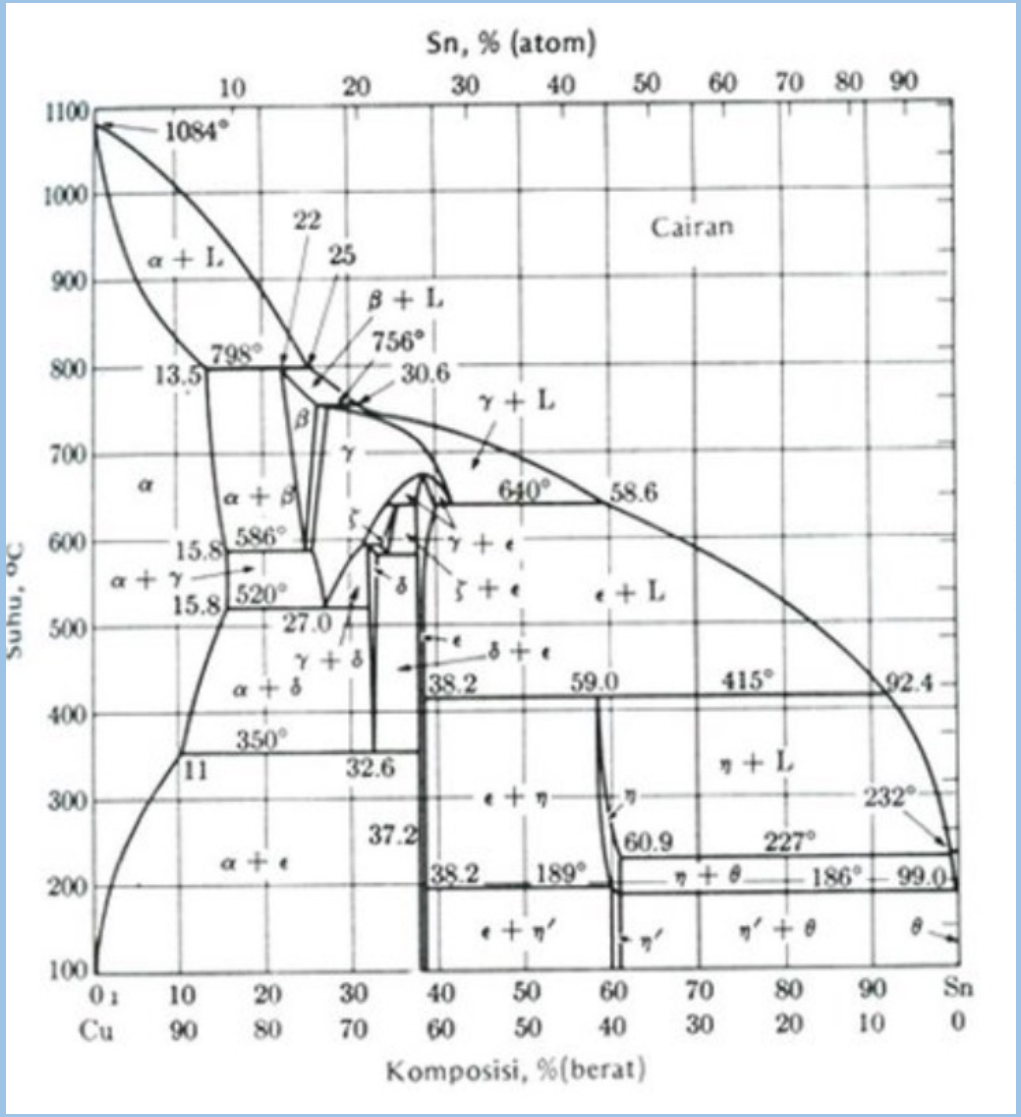
Les Eléments chimiques de la préhistoire au moyen-âge

Bronze = alliage Cu-SN

En général : 3-20 % Sn
Cloches : 20-25%
Bronze à miroir : 30-35%

Deux familles :
Uniquement phase α (cfc)
Phases α et δ ($Cu_{31}Sn_8$ ~cfc)

Ne s'oxyde pas



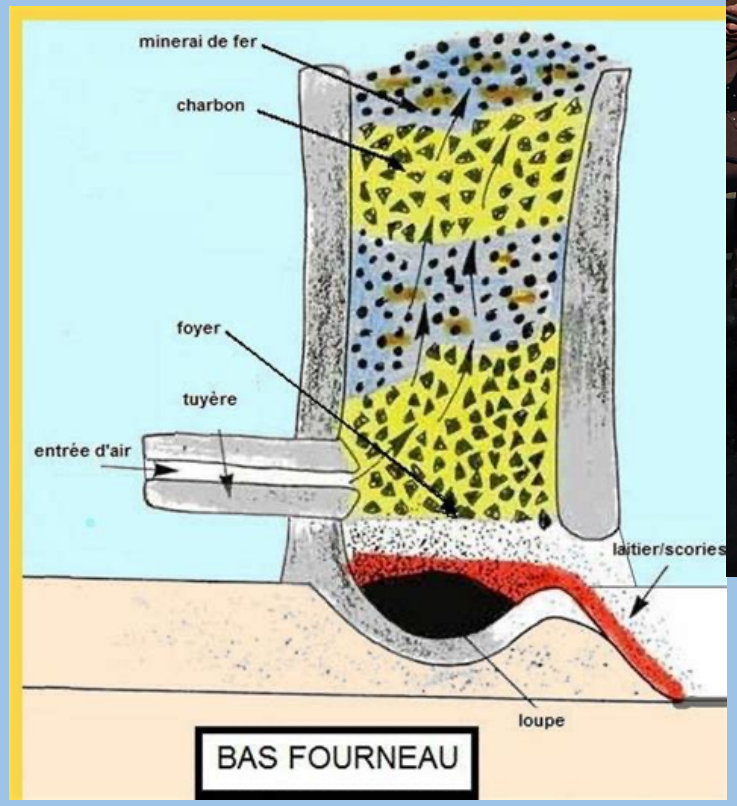
Les Eléments chimiques de la préhistoire au moyen-âge

Age du fer – (~1200 av. J.-C. - Antiquité)

Moyen-Orient, Europe, Afrique, Asie
Initialement fer météoritique
Puis métallurgie : développement des techniques de forge.
Bas fourneaux en Europe, Hauts fourneaux en Chine (en Europe apparaissent au moyen-âge)
Minerais abondants

<u>Principaux minerais</u> :
Hématite (Fe_2O_3)
Magnétite (Fe_3O_4)
Limonite ($FeO(OH)\cdot nH_2O$)
Sidérite ($FeCO_3$)

Mines en Iles Britanniques, France, Scandinavie, Bohême, Allemagne, Péninsule ibérique, Egypte, Mésopotamie, Anatolie



Réduction directe (via CO) sans fusion



Laitier = scories pauvres Fe

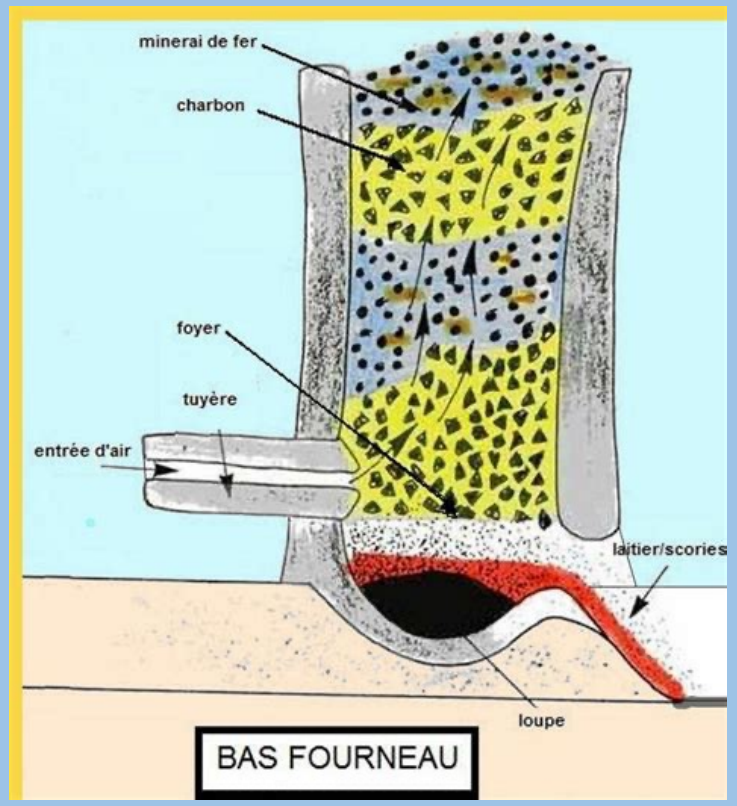
Les Eléments chimiques de la préhistoire au moyen-âge

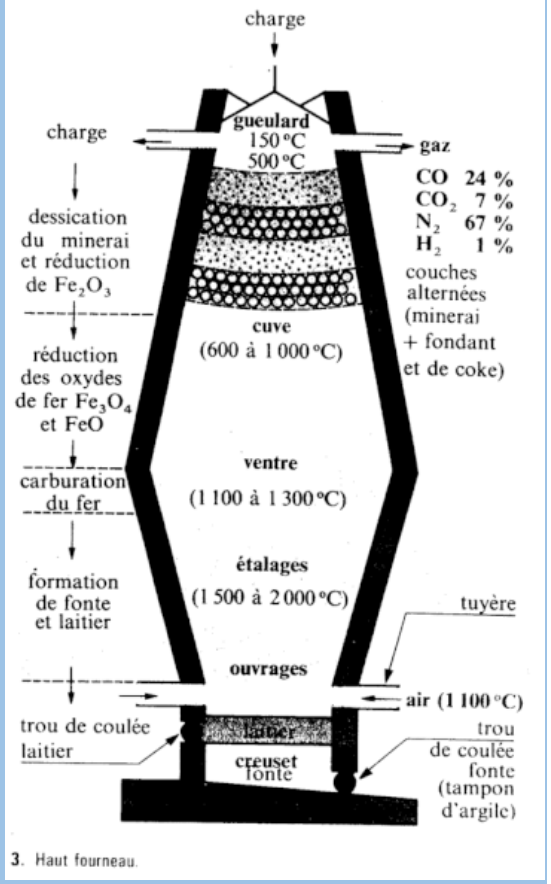
Age du fer – (~1200 av. J.-C. - Antiquité)

Moyen-Orient, Europe, Afrique, Asie
Initialement fer météoritique
Puis métallurgie : développement des techniques de forge.
Bas fourneaux en Europe, Hauts fourneaux en Chine (en Europe apparaissent au moyen-âge)
Minerais abondants

<u>Principaux minerais</u> :
Hématite (Fe_2O_3)
Magnétite (Fe_3O_4)
Limonite ($FeO(OH)\cdot nH_2O$)
Sidérite ($FeCO_3$)

Mines en Iles Britanniques, France, Scandinavie, Bohême, Allemagne, Péninsule ibérique, Egypte, Mésopotamie, Anatolie





Laitier = scories pauvres Fe

Réduction directe (via CO) sans fusion

Les Eléments chimiques de la préhistoire au moyen-âge

Or et Argent

Egypte et Nubie, Mésopotamie, Péninsule Ibérique, Grèce et Macédoine, Amérique, Anatolie

Métaux natifs, faciles à travailler



Trésor d'Eberswalde (Âge du Bronze)



Masque de Toutankhamon
XIV^{e} siècle av. J.-C



1500-1550 av JC. Mycènes



Trésor de Hoxne (Antiquité) IVème siècle

Les Eléments chimiques de la préhistoire au moyen-âge

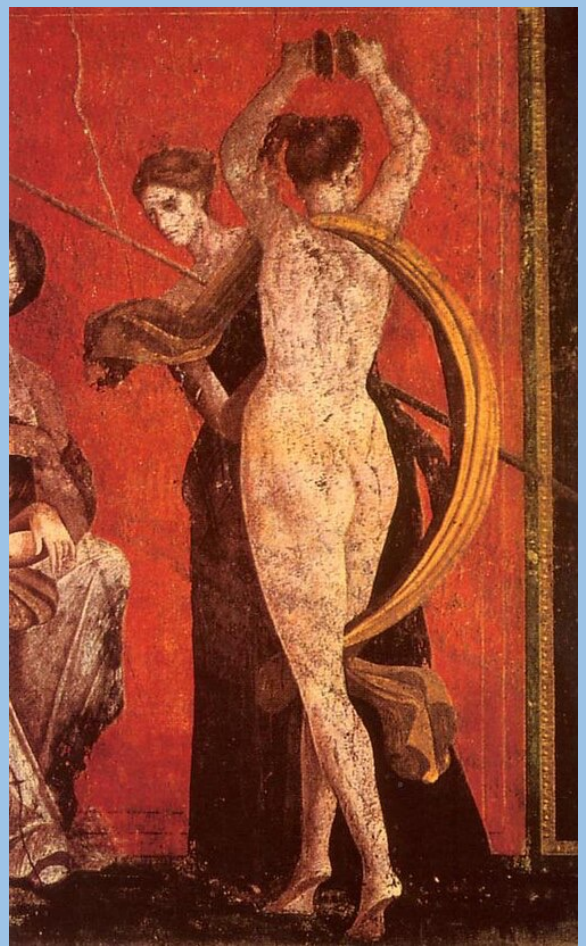
Mercure

Egypte, Mésopotamie, Chine et Inde. Dès 1500 av JC
Produit à partir du Cinabre (HgS) par chauffage + condensation

Extraction de Au et Ag (solubles dans Hg)
Pharmacopée
Pigment



Scène de chasse à l'auroch, Anatolie, VII^{e} millénaire av. J.-C



Pompei, Villa des mystères



Cinabre HgS

Les Eléments chimiques de la préhistoire au moyen-âge

Plomb

Premières traces dès 7000 ans av JC en Anatolie et Moyen-Orient
Produit à partir de la Galène (PbS) par chauffage + condensation
Métal malléable et point de fusion bas (327°C)



Ornementation, cosmétiques, pigments, objets rituels, monnaie, armes
Bronze plombé mélangé à l'étain
Tuyauterie (époque Romaine)





Tesseres Romaines en plomb.

Alchimie et chimie moderne

L'alchimie est une protoscience qui a été substituée par la chimie moderne à la fin du XVIIIème siècle. Elle est un agrégat de croyances ésotériques (hermétisme), de théories issues de la philosophie naturelle de l'antiquité et de pratiques expérimentales, ingénieuses et parfois très sophistiquées, qui constitueront une assise fondamentale pour la chimie moderne.

Son objectif ésotérique est celui de la transmutation des métaux en or or en argent. Le Grand œuvre est la réalisation de la Pierre Philosophale, une substance hypothétique permettant la transmutation des métaux, mais également de guérir les maladies et d'allonger la durée de la vie.

Pratiques alchimiques en Inde (VIème siècle avant JC) et en Chine (IVème siècle avant JC), en occident de -323 à la fin du XVIIIème siècle. Pratique dans le monde hellénistique, puis Romain, qui est répandue et pratiquée dans le monde arabo-musulman après la chute de Rome, puis revient en Occident après la fin des grandes invasions.

Aristote : théorie des 4 éléments, qui constituent toutes les formes de matières. En alchimie = Materia Prima.

Paracelse (XVIème siècle) : 3 principes universels = Soufre, Mercure, Sels (issus de Materia Prima)

Les Eléments chimiques de la préhistoire au moyen-âge

Zinc

Reconnu comme métal qu'à l'époque moderne, mais utilisé depuis l'antiquité
Minerais de blende ZnS ou ZnCO3
1000 av JC – première production de Zn métallique, puis échelle industrielle après XVIIIème siècle
Chine, Perse, Mésopotamie : présence de Zn dans alliages (laiton)
Essentiellement utilisé dans les alliages (cassant et facilement oxydable)

Identifié comme élément par Andreas Marggraf en 1746 (réduction de la calamine).

Platine

Rare, point de fusion élevé (1768°C)
Souvent à l'état natif, associé à l'or ou à l'argent

Reconnu comme métal à l'époque moderne, mais utilisé depuis l'antiquité.
Utilisation en Amérique précolombienne, par martelage et frittage (Platina = petit argent, terme des conquistadors)
Décrit en 1748 par Brownrigg (minéralogiste Anglais)
Identifié comme élément chimique par Willima Hyde Wollaston, Martin Heinrich Klaproth (~1803). Utilisation au XX-XXIème siècles.

Méthode de production de lingots de platine (Wollaston)
Grains d'alluvions Rio Pinto : alliage groupe du Pt

$$\mathrm{Pt} + 4\mathrm{HCl} + \mathrm{HNO_3} \rightarrow \mathrm{H_2PtCl_6} + 2\mathrm{NO} + 2\mathrm{H_2O}$$

$$\mathrm{H_2}[PtCl_6] + 2\mathrm{NH_4}Cl \rightarrow (NH_4)_2[PtCl_6]\downarrow + 2\mathrm{HCl}$$

$$(NH_4)_2[PtCl_6] \xrightarrow{chaleur} \mathrm{Pt} + 2\mathrm{NH_4}Cl + 2\mathrm{Cl_2}$$

Les Eléments chimiques de la préhistoire au moyen-âge

Antimoine

Minerai de Stibine Sb_2S_3
Cosmétiques (khôl égyptien mélange de stibine et PbS)
Poudres médicinales
Utilisation dans des alliages.
Elément transmutateur pour les Alchimistes

Isolement du métal par Basile Valentin (~1450-1500) $Sb_2S_3 + 3Fe \rightarrow 2Sb + 3FeS$

Bismuth

Connu depuis l'antiquité, mais souvent confondu avec l'antimoine
Minerai de bismuthinite (Bi_2S_3) souvent mélangé à la stibine (Sb_2S_3)
Utilisé par les Romain pour faire des alliages et des pigments
Reconnu comme élément chimique vers 1753, par Claude Geoffroy le Jeune.

Les Eléments chimiques de la préhistoire au moyen-âge

Arsenic

3000 av JC Egypte ancienne : orpiment (As_2S_3) et réalgar (As_4S_4) pigments jaune et rouges. Teintures, cosmétiques.

2500 av JC. Mésopotamie, utilisation alchimie, médecine
Empire Romain, Chine, Inde : médecine, poison (dératisation)

Premier isolement d'As métallique : ~ 1250 Albert Le Grand

$$2As_2S_3 + 9C \rightarrow 4As + 6CS_2$$

Supposé être un élément de transmutation des métaux (Geber, XVIIIème siècle)

1649 – Johann Schröder : obtention à partir d'oxydes et de sulfures

Reconnu comme corps simple par Lavoisier





Mines et métaux de la Renaissance à la Révolution industrielle

1. Mines d'argent et de plomb

- Mines de Joachimsthal (actuelle République tchèque)
- Mines des Monts Métallifères (Allemagne - République tchèque) Plomb, d'argent et cuivre.
- Mines de Potosí (Bolivie, mais contrôlées par l'Espagne)

2. Mines de cuivre

- Falun (Suède) Pb, Zn. 2/3 du cuivre mondial au XVII^{e} siècle et restait une ressource clé au XVIII^{e} siècle.
- Mines de Cornwall (Angleterre) Cu, Sn.
- Mines de Mansfeld (Allemagne, Saxe-Anhalt)

3. Mines de fer

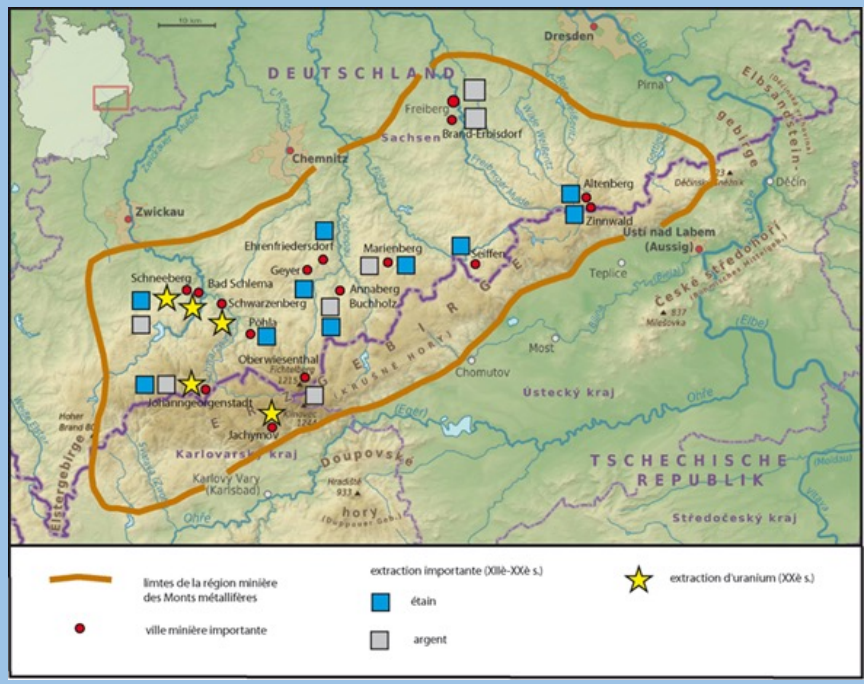
- Mines de Suède (Bergslagen, Dannemora, etc.) Plus grand producteur de fer en Europe.
- Mines de Norvège
- Mines de Lorraine (France) et Luxembourg (avant le développement de la sidérurgie moderne au XIX^{e} siècle).
- Mines d'Angleterre (Lake District, Sussex, Midlands)

4. Mines d'étain et de zinc

- Mines de Cornouailles et du Devon (Angleterre) Centre majeur de production d'étain en Europe.
- Mines de Silesie (Pologne - Allemagne) Zn, Pb

5. Autres régions minières importantes

- Mines des Asturies et d'Andalousie (Espagne) : Plomb, cuivre et argent.
- Mines de Styria et de Carinthie (Autriche-Hongrie) : Plomb, zinc et fer.
- Mines de Transylvanie (Roumanie, Empire des Habsbourg) : Riches en or et argent.



Méthodes d'analyse des minerais

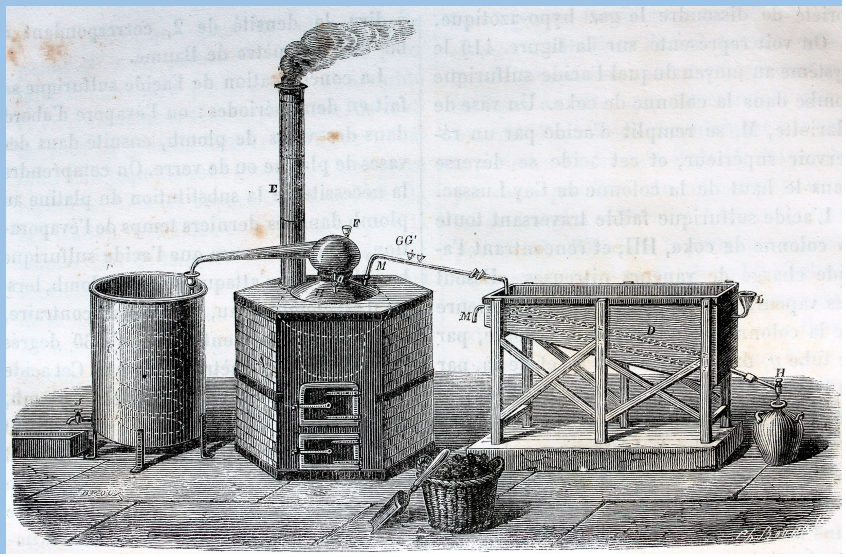
0 – Développement des acides

H_2SO_4 = Vitriol (huile vitreuse). Nicolas Lémery Traité de Chimie (1675)
Calcination de sulfures de fer, solubilisation et évaporation => sels de vitriol (sulfates de fer hydratés)

Vitriol vert (sulfate de fer, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$). Vitriol bleu (sulfate de cuivre, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$).
Vitriol blanc (sulfate de zinc, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$).

~ 500°C $$FeSO_4 \rightarrow Fe_2O_3 + SO_3 + SO_2$$

SO_3 se dissout dans H_2O ajoutée dans le récepteur pour former H_2SO_4



HCl (**esprit de sel** ou **acide muriatique**) a été découvert au Moyen Âge.
Réaction de l'acide sulfurique sur NaCl. Gaz HCl dissout dans H_2O.

HNO_3 (**"esprit de nitre"**) connu depuis le Moyen Âge.
Produit par réaction de l'acide sulfurique sur le salpêtre.

$$2KNO_3 + H_2SO_4 \rightarrow K_2SO_4 + 2HNO_3$$

L'acide fluorhydrique au XVIII^e siècle par Carl Wilhelm Scheele, 1771. Action de H_2SO_4 sur la fluorite (CaF_2, fluorure de calcium).

L'acide phosphorique au XVII^e siècle par Johann Rudolf Glauber (1604-1670). Calcination d'os puis réaction avec H_2SO_4

$$Ca_3(PO_4)_2 + 3H_2SO_4 \rightarrow 2H_3PO_4 + 3CaSO_4$$

Soude NaOH Produite à partir d'algues et plantes marines. Calcination et purification pour produire Na_2CO_3 puis réaction avec de la chaux éteinte (caustification) :

$$Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow 2NaOH + CaCO_3$$

Potasse caustique KOH Produite à partir de cendres de bois (K_2CO_3)

NH_3 Distillation de produits animaux (sabots, cornes, …)

Méthodes d'analyse des minerais

1 - Méthodes de dissolution et précipitation

Dissolution dans un acide et précipitations sélectives

- Ajout de réactifs chimiques

  - **Nitrate d'argent ($AgNO_3$) :**

    $$AgNO_3(s) \rightarrow Ag^+(aq) + NO_3^-(aq)$$

  - **Chlorure de sodium ($NaCl$) :**

    $$NaCl(s) \rightarrow Na^+(aq) + Cl^-(aq)$$

  $$Ag^+(aq) + Cl^-(aq) \rightarrow AgCl(s)$$

- Contrôle par le pH

  $$Fe^{3+}(aq) + 3OH^-(aq) \rightarrow Fe(OH)_3(s)$$

  - **Si le pH augmente (>4-5), le précipité brun-rouge de $Fe(OH)_3$ apparaît.**
  - **Si le pH est bas (<3), le précipité se dissout et Fe^{3+} reste en solution.**

- Précipitation de sels insolubles par ajout de contre-ions

  $$BaCl_2(aq) \rightarrow Ba^{2+}(aq) + 2Cl^-(aq)$$

  $$Na_2SO_4(aq) \rightarrow 2Na^+(aq) + SO_4^{2-}(aq)$$

  $$Ba^{2+}(aq) + SO_4^{2-}(aq) \rightarrow BaSO_4(s)$$

- Complexation (solubilisation sélective)

  $$4Au(s) + 8CN^-(aq) + O_2(g) + 2H_2O \rightarrow 4[Au(CN)_2]^-(aq) + 4OH^-(aq)$$

  $$2[Au(CN)_2]^- + Zn(s) \rightarrow 2Au(s) + [Zn(CN)_4]^{2-}$$

Méthodes d'analyse des minerais

2 - Méthodes de calcination et réduction

- Réduction d'oxydes (avec charbon)
- Production de sels intermédiaires

$$PbS + 2O_2 \rightarrow PbSO_4$$

$$PbSO_4 + 2C \rightarrow Pb + 2CO_2$$

3 - Réduction chimique

- Isolement des métaux à partir de sels avec des métaux réactifs

$$\mathrm{Fe\ (s) + CuSO_4}(aq) \rightarrow \mathrm{FeSO_4}(aq) + \mathrm{Cu\ (s)}$$

4 - Distillation

- Fractionnement par volatilisation

$$HgS + O_2 \rightarrow Hg(g) + SO_2$$

+ condensation du Hg

5 - Emission spectrale

- Couleur de flamme
- Spectroscopie (milieu $XIX_{ème}$)

- Potassium : violet
- Lithium : rose fuchsia
- Strontium : Rouge
- Calcium : orangé / rouge brique
- Sodium : jaune vif



Entre alchimie et exploitation minière

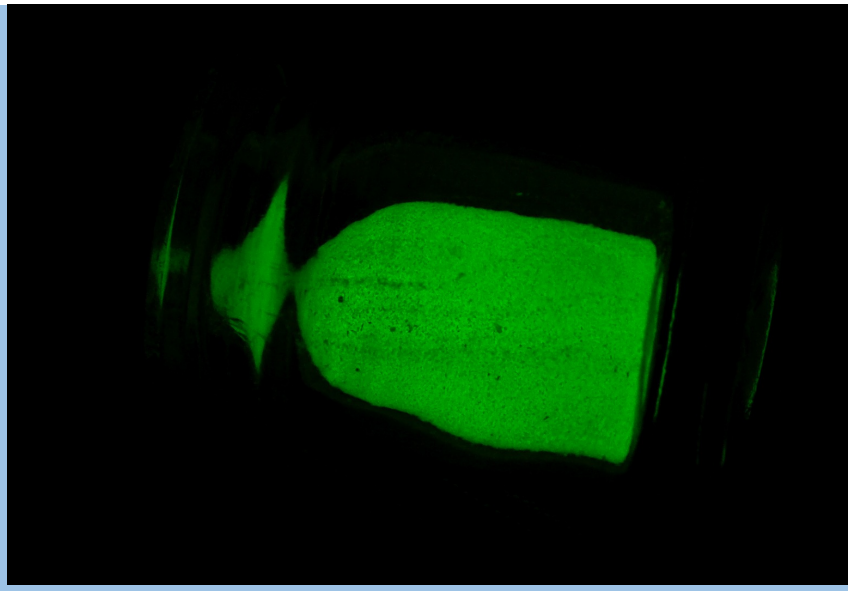
Phosphore, découvert par *Henning Brand (1669)*

Travaux sur l'urine.

- Chauffage et distillation produit un matériau phosphorescent
- Il s'agissait de phosphore blanc (P4), très réactif avec l'air

XVIIIème siècle :

- identification de phosphates dans les os (production engrais).
- XIX^{ème} siècle: découverte des gisements sulfates.



Chimie luminescente de l'oxydation du phosphore blanc

Entre alchimie et exploitation minière

niccolite (NiAs)



Découverte du Cobalt (1735) et du Nickel (1751)

Nickel, découvert par *Axel Fredrik Cronstdet (1722-1765, Suède)*

Minerai inconnu de *kupfernickel (Cu du Diable ou Cu Trompeur) issu des* Monts Métallifères (Erzgebirge), en Saxe(Allemagne), ressemblant au minerai de Cu.

- Tentative infructueuse d'extraire le Cu par fusion (Chalcopyrite $CuFeS_2$ et Bornite Cu_5FeS_4)
- Réduction avec charbon de bois => métal brillant plus dur que l'Ag.
- Dissolution dans HNO_3 => sels verts ≠ sels de Cu bleus, ≠ sels de Co rose-bleu
- Précipitation de sels par ajout de KOH => sels verts également
- Co métallique gris foncé/bleuâtre,≠ Ni qui est argenté

1850-1860 : spectroscopie d'émission (Bunsen et Kirchhoff). Empreinte spectrale univoque : raies vertes 547.7 nm et 559.6 nm ; raies jaunes autour de 472.7 nm et 485.5 nm ; raies rouges dans la zone de 600-700 nm.

$$Ni + 4HNO_3 \rightarrow Ni(NO_3)_2 + 2NO_2 + 2H_2O$$

Sels verts soluble (Ni^{2+})

$$Ni(NO_3)_2 + 2KOH \rightarrow Ni(OH)_2 \downarrow + 2KNO_3$$

Sels verts insoluble (Ni^{2+})



Nickel Hydroxide

Entre alchimie et exploitation minière



Découverte du Manganèse et du Chlore (1774)

Manganèse, découvert par *Johan Gottlieb Gahn*

Réduction de la pyrolusite (dioxyde de manganèse, MnO_2)

$$MnO_2 + C \rightarrow Mn + CO_2$$

Chlore, découvert par *Carl Wilhelm Scheele*

Scheele a étudié la **pyrolusite (MnO_2)**, un minerai de manganèse déjà connu pour être utilisé dans la fabrication du verre (transparence). Il a montré que ce minerai pouvait réagir avec de **l'acide chlorhydrique (HCl)** pour libérer un gaz jaune-vert : **le chlore (Cl_2)**.

$$MnO_2 + 4HCl \rightarrow MnCl_2 + Cl_2 + 2H_2O$$

Cette identification a été concrétisée par Humphry Davy en 1810, grâce au procédé d'électrolyse.

Entre alchimie et exploitation minière

Découverte du Molybdène (1778-1782)

Principal minerai : **molybdénite (MoS_2)** (a été souvent confondu avec le **graphite** ou le **minerai de plomb PbS**). Utilisé dès l'antiquité. Son nom vient du grec **"molybdos"** (**μόλυβδος**), qui signifie **plomb**, en raison de cette confusion avec la galène.

Identification du molybdène par Carl Wilhelm Scheele (1778-1781)
En **1778**, **Scheele** a analysé la **molybdénite (MoS_2)** et a montré qu'elle n'était ni du **graphite** ni un minerai de plomb.
Traitement à l'**acide nitrique (HNO_3)** => oxyde blanc, appelé **"terre de molybdène"** (**MoO_3**)

$$MoS_2 + 6HNO_3 \rightarrow MoO_3 + 3H_2O + 2NO_2 + 2SO_2$$

Isolement du molybdène métallique par Peter Jacob Hjelm (1782)

- Réduction avec par le carbone :

$$MoO_3 + 3C \rightarrow Mo + 3CO$$



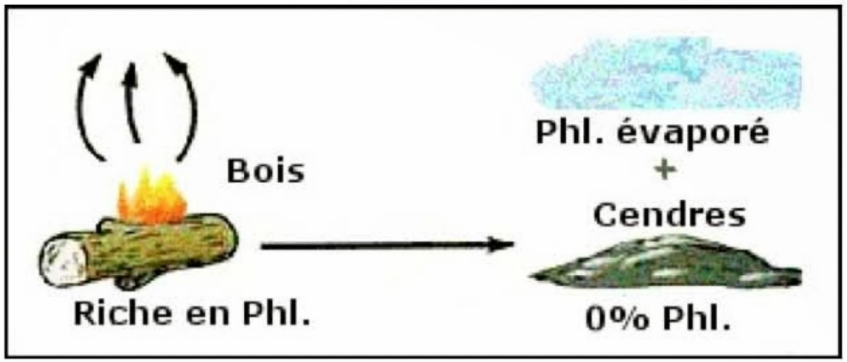
MoS_2

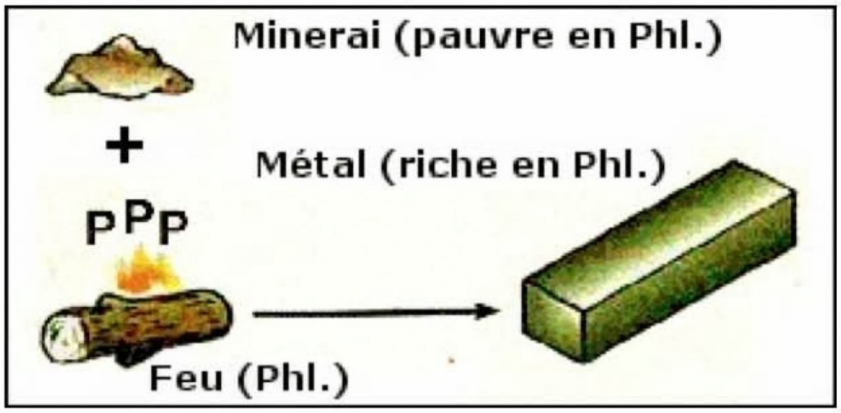
L'émergence de la chimie moderne

Théorie du Phlogistique **(fin XVII^{e} – XVIII^{e} siècle), Johann Joachim Becher (1635-1682), Georg Ernst Stahl (1660-1734).**

- Principe appelé **phlogistique** contenu dans les substances combustibles = « élément-feu » (filiation avec la théorie antique d'Empédocle des 4 éléments).
- Une substance en combustion libère ce phlogistique dans l'air
- L'air est un milieu chimiquement neutre
- Un matériau calciné retourne à l'état de « chaux »

Cette théorie a été très prégnante jusqu'aux travaux de Lavoisier et la première électrolyse de l'eau par les britaniques William Nicholson (1753-1815) et Sir Anthony Carlisle (1768-1840) en 1800.





L'émergence de la chimie moderne

Dans la seconde moitié du XVIIIème siècle, la chimie se détache progressivement de l'Alchimie et a recours à des expériences planifiées de plus en plus quantitatives. Plusieurs découvertes importantes ponctuent cette période concernant les gaz.

John Mayow (1641-1679) : Médecin et physiologiste anglais.

- Ses travaux sur l'air très novateurs, et précurseurs de Lavoisier un siècle auparavant, peuvent être vus comme une première découverte de l'oxygène = *spiritus igneo-aereus*
- Une partie de l'air essentiel à la combustion et essentielle à la respiration.
- Observe l'augmentation de masse de l'antimoine lors de la combustion, et suppute qu'elle est liée à cette partie de l'air.

Robert Boyle (1627-1691) : Chimiste Irlandais.

- Loi de Boyle-Mariote.
- production d'un **gaz inflammable** par des **métaux** (fer, zinc) exposés à des **acides**.
- Il n'a cependant pas identifié ce gaz comme un élément distinct.
- Rejet de la théorie des 4 éléments.



Joseph Priestley (1733-1801) : Isolement de l'oxygène « air déphlogistiqué » (1774)

- Action du soleil sur des oxydes de mercure
- Favorise la respiration et la combustion.
- Echange avec Lavoisier lors d'un séjour à Paris en 1775.

$$2HgO \xrightarrow{\text{chaleur}} 2Hg + O_2$$

L'émergence de la chimie moderne : hydrogène et dioxyde de carbone

Henry Cavendish (1731-1810) :

- découverte des propriétés inflammables de H_2 (1766) = « air inflammable », plus léger que l'air.
- Estimation de densité 11 fois plus léger que l'air (14.4 vraie valeur)
- réagissait avec l'**oxygène** pour former de l'**eau** (H_2O) (Hydrogène = « génère de l'eau », terme dû à Lavoisier.)
- Cavendish a donc appelé ce gaz "**air inflammable**", mais ne savait pas encore qu'il s'agissait d'un élément chimique.

Joseph Black (1728-1799) : Théorie des airs. Pourfendeur de la théorie du Phlogistique.

- Découvreur du CO_2 (« air fixe ») par calcination de la craie, et précipitation de CaO à partir du gaz. Produit de la respiration animale et de la fermentation microbienne (ses parents étaient producteur de vin en Guyenne).
- Théorie du Calorique : la chaleur est un fluide, s'écoulant du chaud vers le froid.



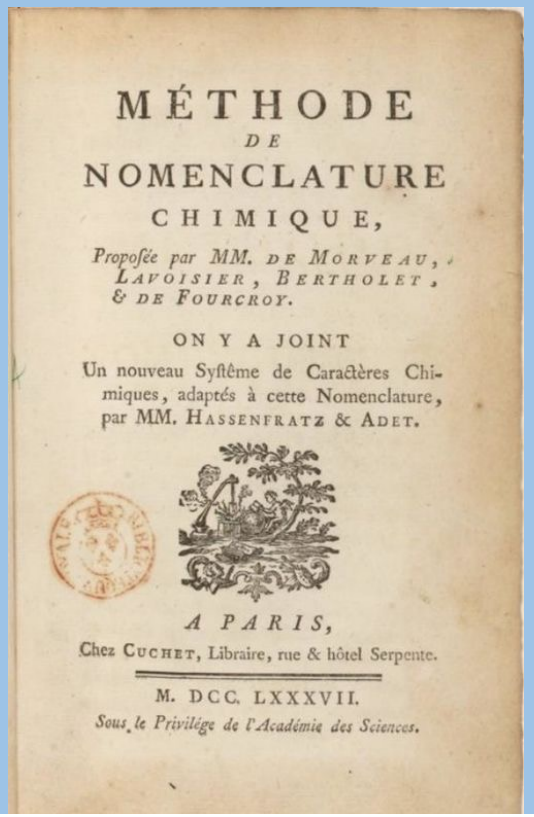


L’émergence de la chimie moderne

Antoine Lavoisier (1733-1794) :

- Travaux sur la combustion qui anéantissent la théorie du Phlogistique.
- Expérience de l’oxydation du mercure.
- Expériences quantitatives basées sur des pesées. Loi de conservation de la masse.
- Mise en place d’une nomenclature moderne qui fait disparaître les dénominations plus anciennes.



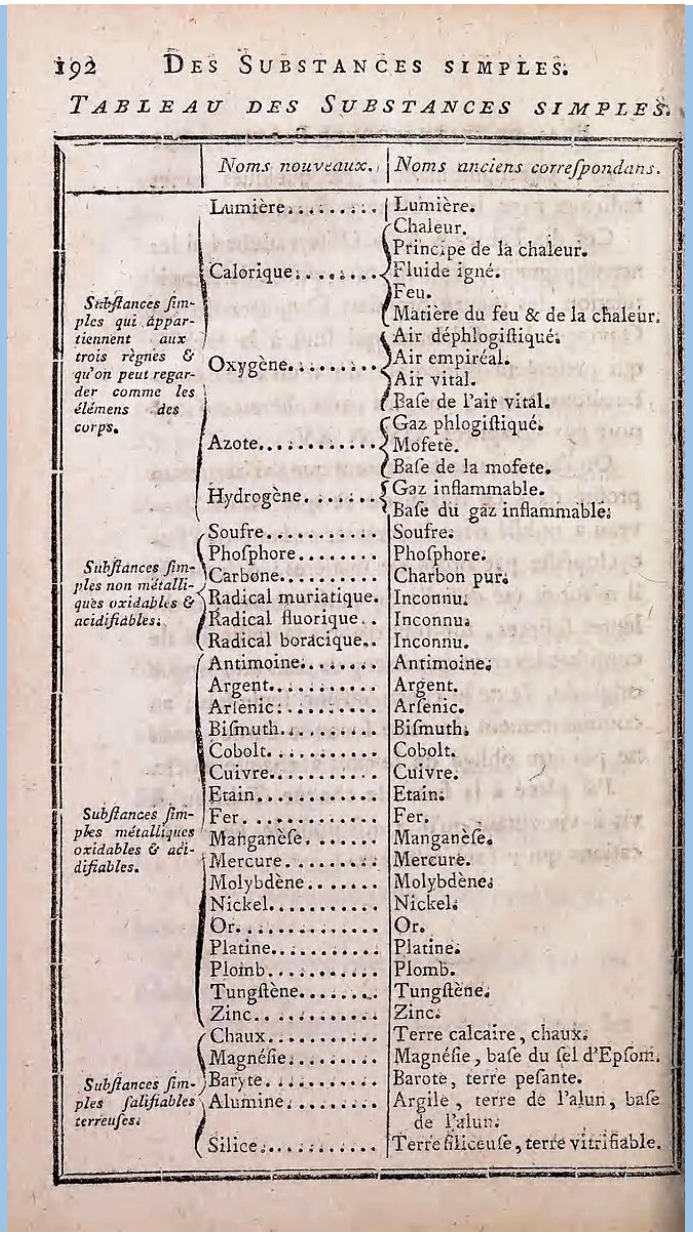


MÉTHODE
DE
NOMENCLATURE
CHIMIQUE,
Proposée par MM. DE MORVEAU, LAVOISIER, BERTHOLET, & DE FOURCROY.

ON Y A JOINT
Un nouveau Système de Caractères Chimiques, adaptés à cette Nomenclature, par MM. HASSENFRATZ & ADET.

A PARIS,
Chez CUCHET, Libraire, rue & hôtel Serpente.

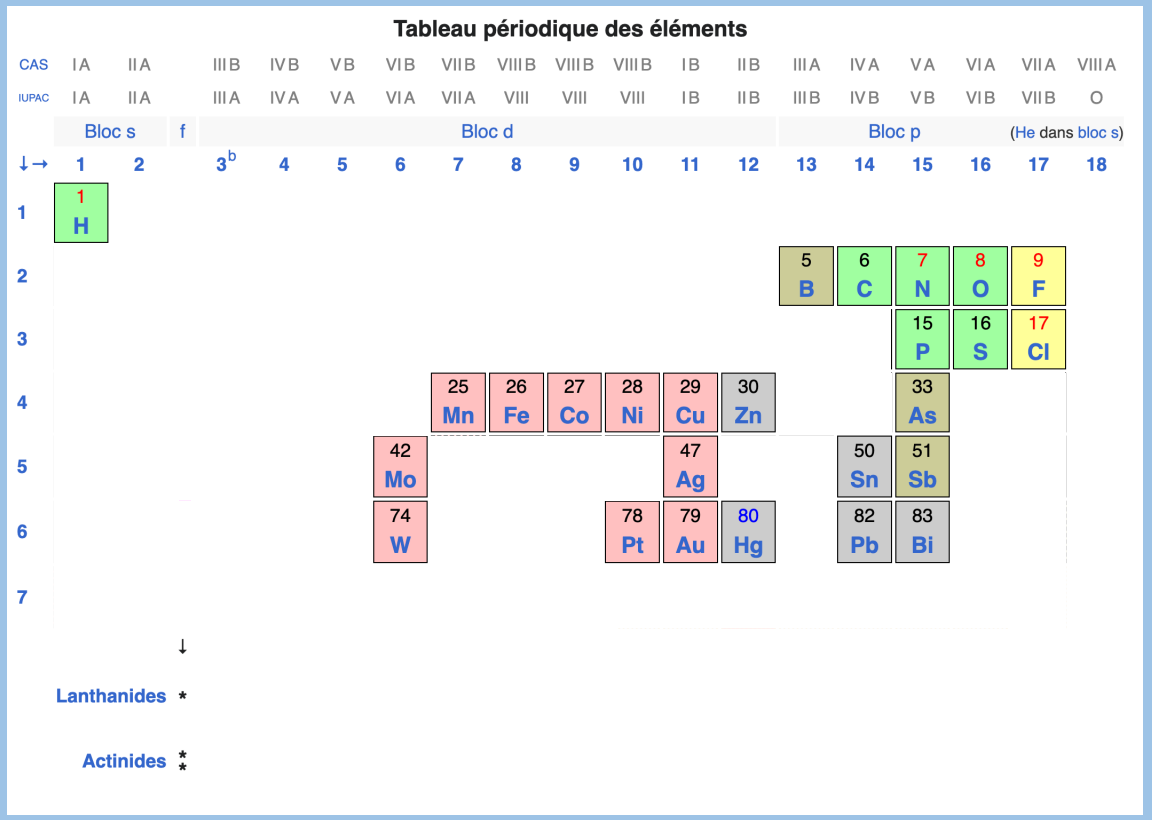
M. DCC. LXXXVII.
Sous le Privilége de l'Académie des Sciences.



192 DES SUBSTANCES SIMPLES.

TABLEAU DES SUBSTANCES SIMPLES.

	Noms nouveaux.	Noms anciens correspondans.
Substances simples qui appartiennent aux trois règnes & qu'on peut regarder comme les élémens des corps.	Lumière	Lumière.
	Calorique	Chaleur. Principe de la chaleur. Fluide igné. Feu. Matière du feu & de la chaleur.
	Oxygène	Air déphlogistiqué. Air empiréal. Air vital. Base de l'air vital.
	Azote	Gaz phlogistiqué. Mofete. Base de la mofete.
	Hydrogène	Gaz inflammable. Base du gaz inflammable.
Substances simples non métalliques oxidables & acidifiables.	Soufre	Soufre.
	Phosphore	Phosphore.
	Carbone	Charbon pur.
	Radical muriatique	Inconnu.
	Radical fluorique	Inconnu.
	Radical boracique	Inconnu.
Substances simples métalliques oxidables & acidifiables.	Antimoine	Antimoine.
	Argent	Argent.
	Arsenic	Arsenic.
	Bismuth	Bismuth.
	Cobolt	Cobolt.
	Cuivre	Cuivre.
	Etain	Etain.
	Fer	Fer.
	Manganèse	Manganèse.
	Mercure	Mercure.
	Molybdène	Molybdène.
	Nickel	Nickel.
	Or	Or.
	Platine	Platine.
	Plomb	Plomb.
	Tungstène	Tungstène.
	Zinc	Zinc.
Substances simples salifiables terreuses.	Chaux	Terre calcaire, chaux.
	Magnésie	Magnésie, base du sel d'Epsom.
	Baryte	Barote, terre pesante.
	Alumine	Argile, terre de l'alun, base de l'alun.
	Silice	Terre siliceuse, terre vitrifiable.

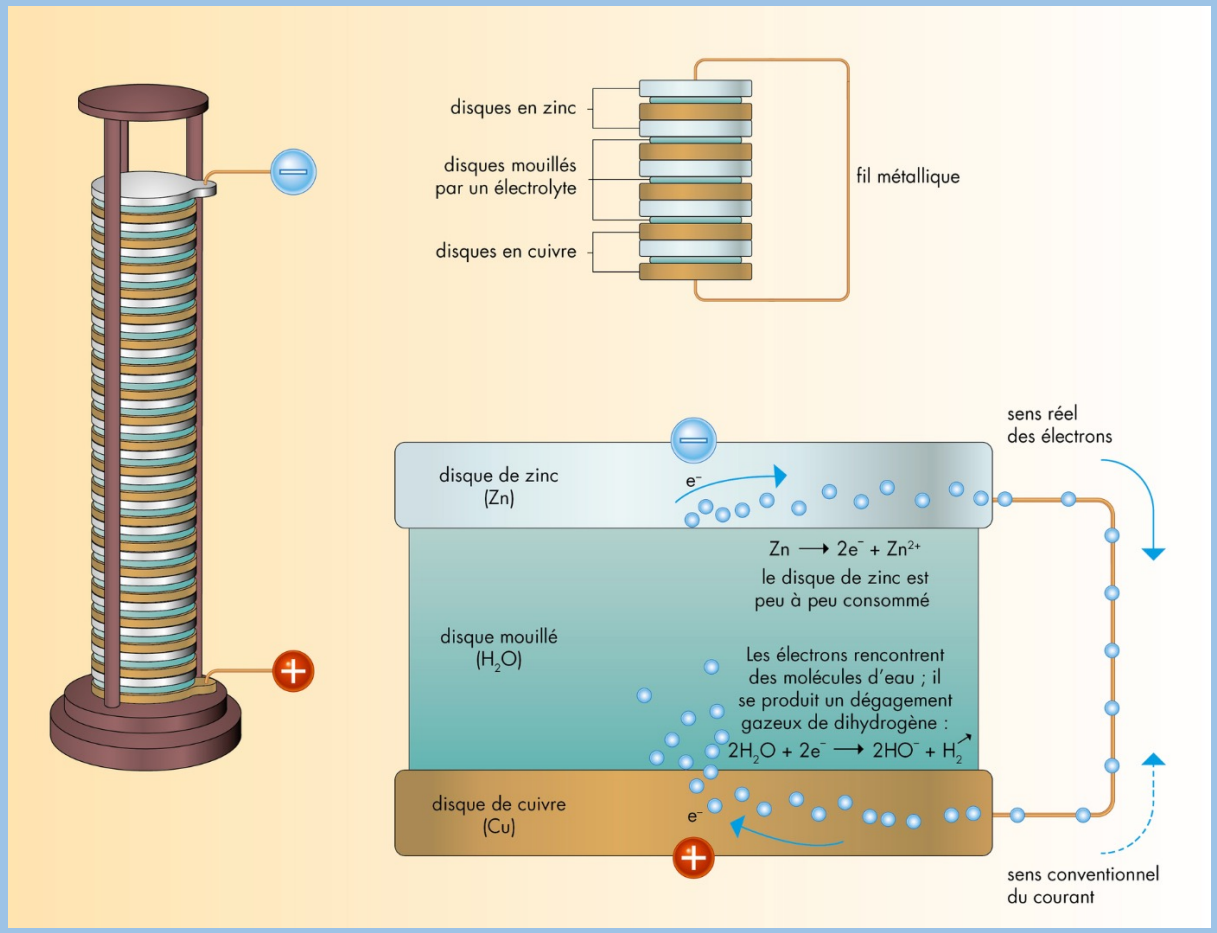


- Lumière
- Calorique
- Silice, Alumine, Baryte, Chaux, Magnésie = corps composés

L'apport de l'électricité : l'electrolyse

Pile de Alessandro Volta (1800)

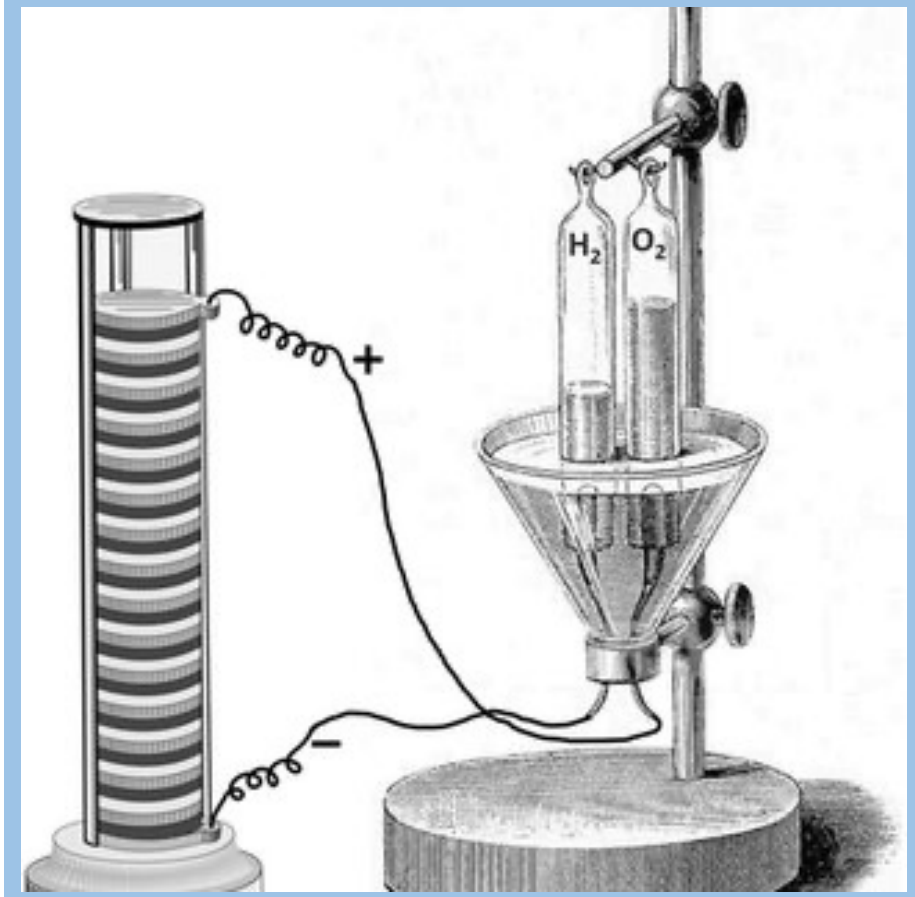




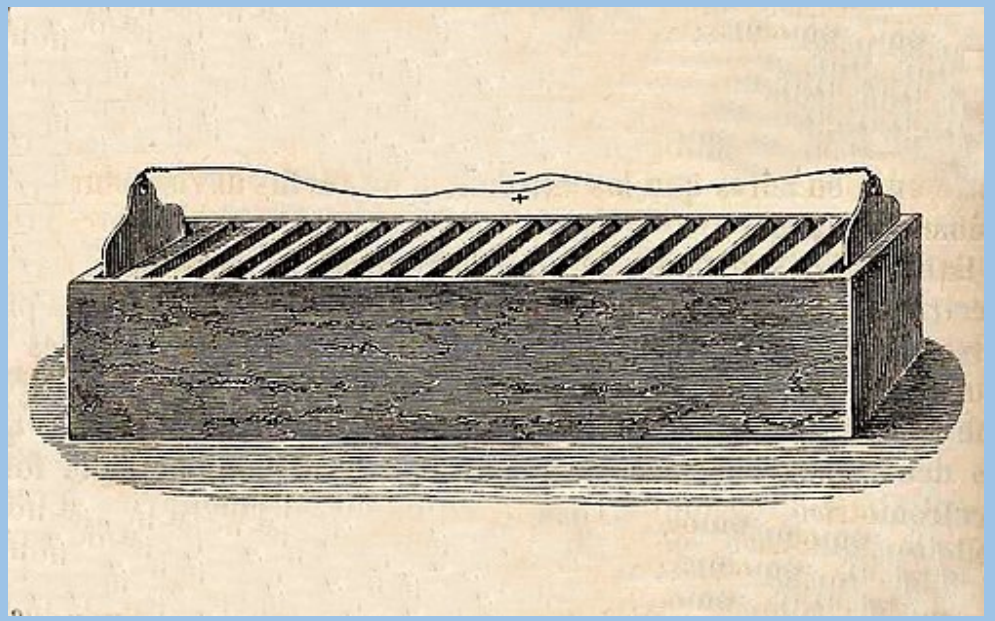
L’apport de l’électricité : l’electrolyse

Expérience de Nicholson et Carlisle (1800)

La première électrolyse de l’eau, démontrant que l’eau est composée de H et O



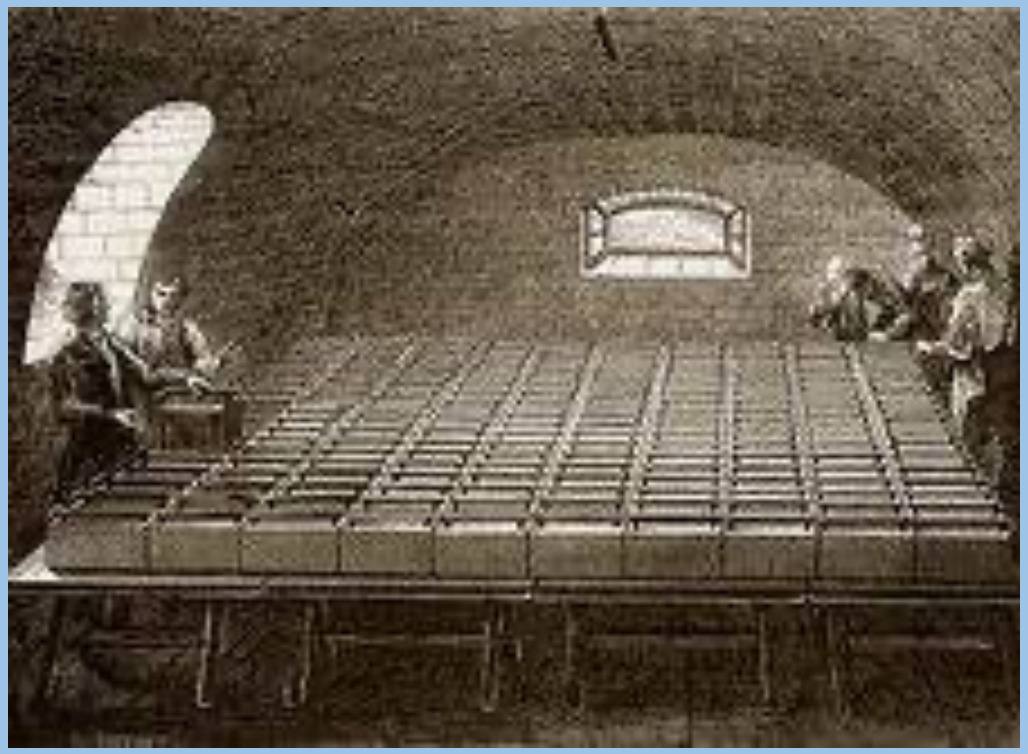
William Cruikshank (1802) : pile à Auge



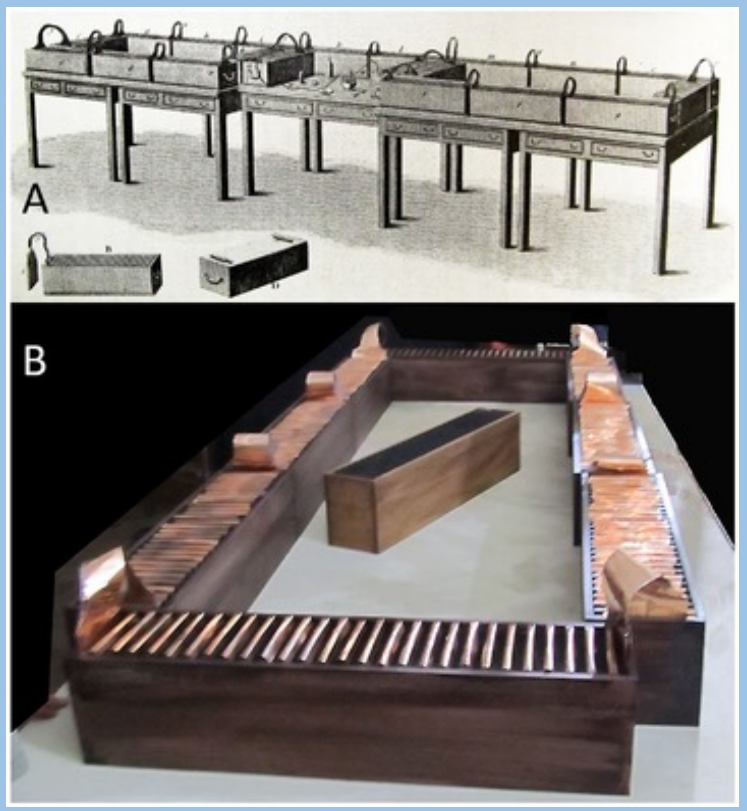
L’apport de l’électricité : l’electrolyse

Les piles de Humphry Davy (1778-1829)

Amélioration de la pile de Volta, par association en série et configuration horizontale qui élimine les effets de poids et de compaction des tissus contenant l’électrolyte. Utilisation de l’acide nitrique pour augmenter l’ampérage.
Produit des piles avec des courants atteignant plusieurs centaines d’ampère.



Royal Institution of London



L'apport de l'électricité : l'electrolyse

Découverte de nouveaux éléments chimiques

Davy fait circuler des courants dans des sels KOH et NaOH et observe la formation de nouveaux métaux :

1807 – **K, Na**
1808 – **Ca, Sr, Ba, Mg, B**

Découverte du Chlore (Cl) :
1774 Carl Wilhelm Scheele : substance jaune-verdâtre en faisant réagir (HCl) sur dioxyde de manganèse (MnO_2). Conclut que le composé contient de l'oxygène => "air déphlogistiqué du sel marin »
1810 Davy montre que le gaz ne contient pas d'hydrogène ni d'oxygène. Théorie des acides mise à mal. Il montre qu'il s'agit d'un corps simple. Capable de réagir avec d'autres éléments (e.g. Na = NaCl)

Découverte du Fluor (F) : « l'élement maudit »
1886 Henri Moissan Electrolyse de l'acide fluorhydrique anhydre avec KF.
Expérience difficile : forte réactivité de F et toxicité.

- Basse température (-50°C, HF partiellement liquéfié), mélangé à KF produit un électrolyte.
- Cellule d'électrolyse en platine et iridium.
- Formation de F_2 à l'anode (H_2 à la cathode).
- Oxydant très fort.
- Dissout presque tous les matériaux (utilisation du téflon en laboratoire)
- Expérience d'une extrême dangerosité : morts et blessés graves !

Découverte des autres halogènes

Iode (I)

1811 - Bernard Courtois, découvre l'iode en travaillant sur les **cendres d'algues marines** utilisées pour fabriquer du salpêtre.
Calcination, ajout acide sulfurique => **vapeur violette. Transmets échantillon à Gay-Lussac et Davy**

1813 - Joseph Gay-Lussac : confirme la présence d'un nouvel élément. Cycles de sublimation-condensation (formation cristaux purs). Formation de iodures avec les métaux. Réaction avec hydrogène pour former l'acide iodhydrique HI. Propriétés chimiques proches de celles du Chlore.

1813 – Davy : confirme qu'il s'agit d'un élément simple par électrolyse d'iodures métalliques.

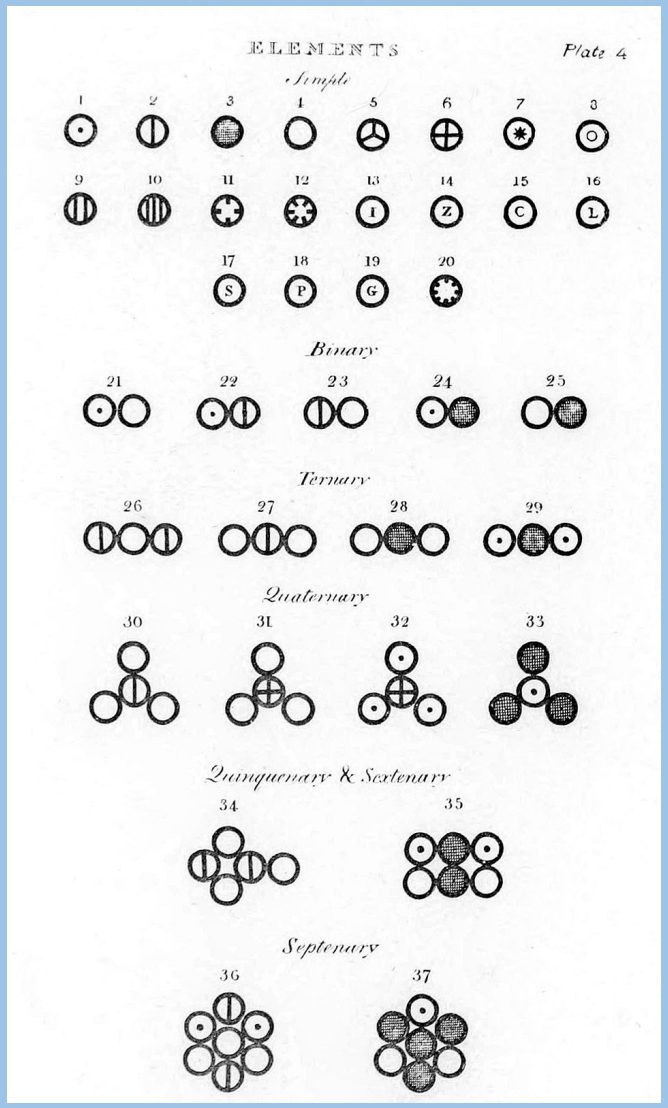
Brome (Br)

1826 - Antoine Balard, isolement à partir de l'eau de mer.
Formation d'une évaporite (sels). Traitement avec Cl_2, dégagement d'un gaz rougeâtre soluble dans CS_2. Réaction avec les métaux (bromures).
Confirmation par Gay-Lussac et Davy.

Astate (At)

1940 - Synthétisé en laboratoire par **Corson, MacKenzie et Segrè**, en bombardant du bismuth avec des **particules alpha**.

Première théorie des atomes – John Dalton (1803-1807)



Matière formée de particules indivisibles = Atomes

Atomes d'un même élément sont égaux = même masse, même volume, même propriétés chimiques.

Concept de masse atomique (relatif par rapport à atome hydrogène)

Les atomes forment des composés qui gardent des relations simples via nombres entiers

Explication des proportions stochiométriques

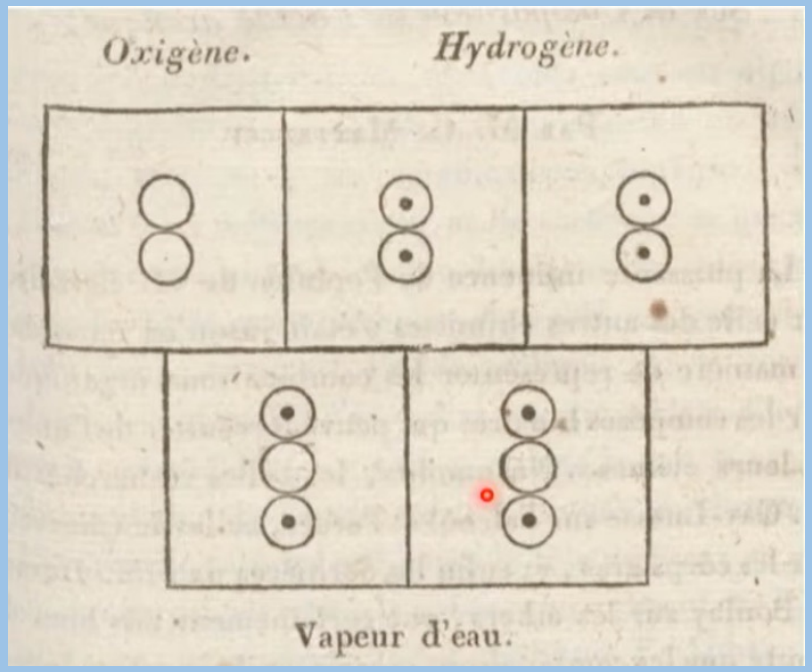
Insuffisances :

- Erreur sur certains composés (eau=HO) => erreurs sur les masses déduites (Gay-Lussac et Humboldt)
- Nie l'existence de molécules diatomiques (pas d'affinité pour atome d'un même type)

Première théorie des atomes – John Dalton (1803-1807)

1804 : JL Gay-Lusac et A. Van Humboldt :

$V_{O2} + 2V_{H2} => 2\ V_{H2O}$

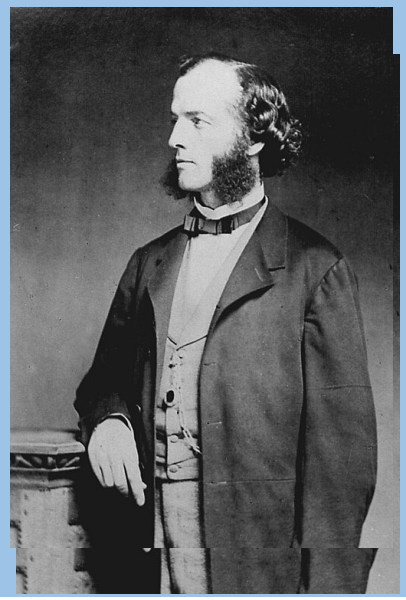


Marc Antoine Gaudin (1804-1880)

Congrès de Karlshruhe 3-5 septembre 1860

Mise en place de nomenclature sur atomes et molécules
140 participants
Nombreuses clarifications
Editions de masses atomiques, qui seront fondamentales pour les travaux de Mendeleïev

A. Kekulé



Première théorie des atomes – Détermination des masses atomiques

Élément	Berzelius (1818-1826)	Moderne
H	1,00	1,008
O	16,00	16,00
C	12,2	12,01
S	32,2	32,06
Cl	35,5	35,45

***Poids équivalents* :**

Poids équivalent d'un élément = masse de cet élément qui se combine avec **1 g d'hydrogène** ou avec **8 g d'oxygène** ou avec **35,5 g de chlore.**

- Données pratiques liées à la réactivité.
- Très utilisées.
- Souvent confondues avec la masse atomique.

Détermination des masses atomiques :

1. Méthode par pesée.
2. Hypothèse sur formule chimique des produits (souvent source d'erreur, e.g. HO au lieu de H_2O)

Mesures plus précises de Berzélius (1779-1848)

- Qualité métrologique de la pesée
- Réactants ultrapurs, stables, faciles à caractériser
- Utilise les idées de Avogadro = molécules polyatomiques
- 1818 : publication de tables très précises (45/49 éléments connus), révision 1826

Théorie d'Avogadro (1811) :

- Volumes de gaz égaux = nombre égal de molécules.
- Cannizzaro (1858) et Congrès de Karlshruhe (1860) : densité d'un gaz donne la masse moléculaire. Utilisation des densités de vapeur et la stochiométrie des composés. Abandon des poids équivalents.

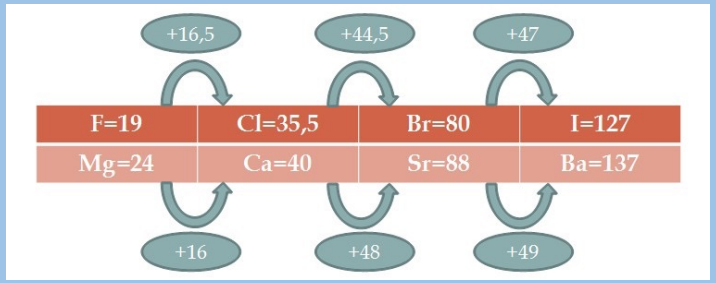
Les valeurs de Cannizzaro seront utilisées par Lothar Meyer et Mendeleïev.

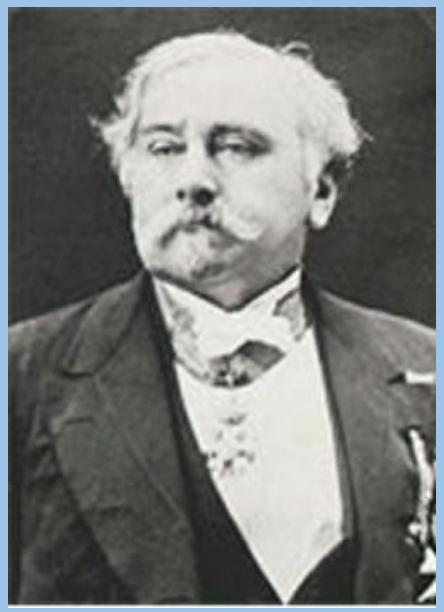
Les périodicités

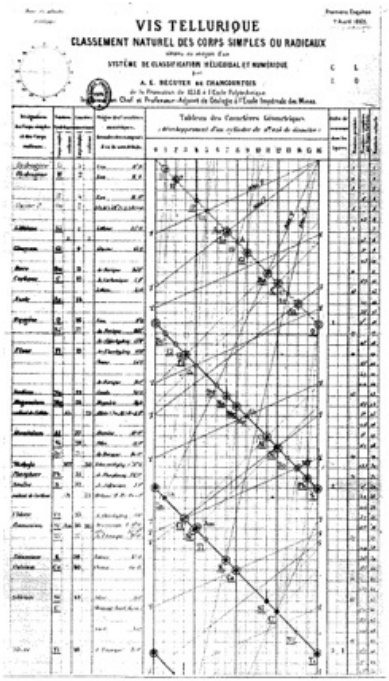
Triades et Tétrades :

1817 Triade Alcalino-terreux $M_{Sr}\sim(M_{Ca}+M_{Ba})$ (Johan Wolfgang Döbereiner)
1829 Triade des Halogènes $M_{Br}\sim(M_{Cl}+M_{I})$ - $M_{Na}\sim(M_{Li}+M_{K})$
1843 3 tétrades et pentade du groupe 15 N, P, As, Sn, Bi (Leopold Gmelin)

1859 Généralisation en tétrades par Jean-Baptiste Dumas. **Progression similaire d'une tétrade à l'autre.**
1862 Vis Tellurique de Alexandre-Emile Beguyer de Chancourtois.

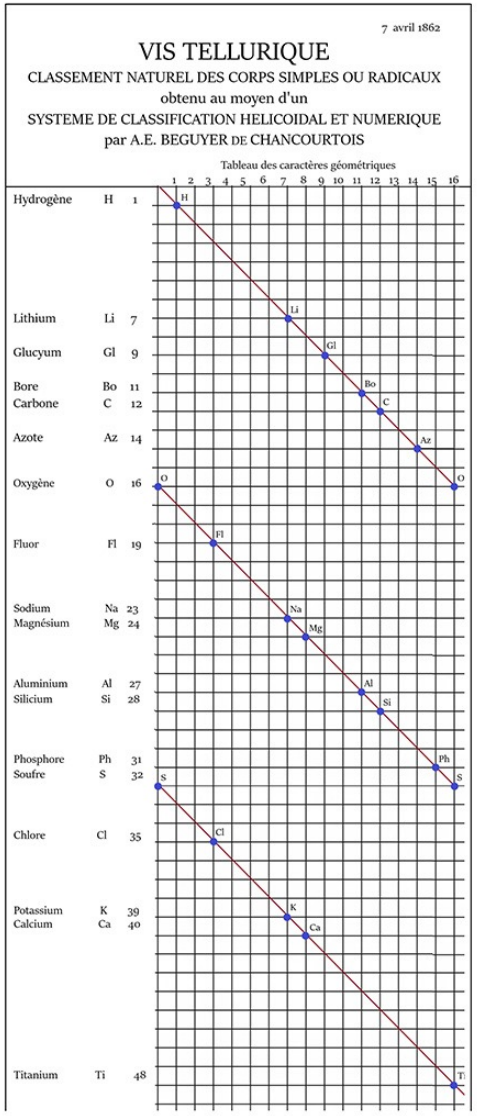


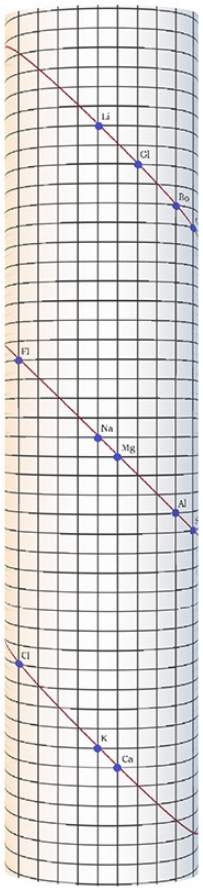






Les périodicités





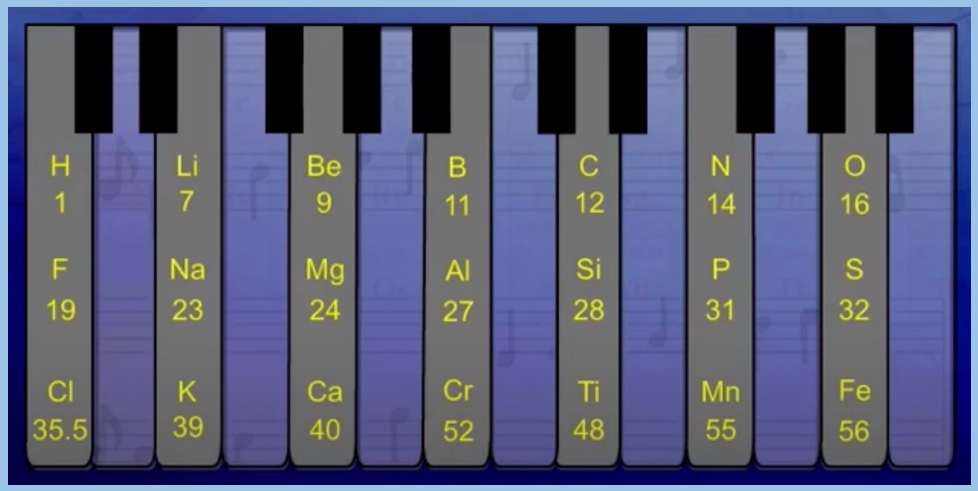
	I A	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	0
1	Hydrogène 1 H 1,007975							Hélium 2 He 4,002602
2	Lithium 3 Li 6,9395	Béryllium 4 Be 9,0121831	Bore 5 B 10,8135	Carbone 6 C 12,0106	Azote 7 N 14,006855	Oxygène 8 O 15,99940	Fluor 9 F 18,99840316	Néon 10 Ne 20,1797 (6)
3	Sodium 11 Na 22,98976928	Magnésium 12 Mg 24,3055	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)

- Plutôt bon pour les 3 premières lignes
- Pas bon pour période 4 (métaux transitions)

Ignoré par la communauté scientifique

Loi des Octaves de Newland

1863 – Travaux de John Newland. 56 éléments connus
Travaux non reconnus, publication autorisée après les travaux de Mendeleiv



Périodicité tous les 8 éléments : même propriétés chimiques

- Etabli pour 56 éléments
- 2 éléments sur certaines cases
- Pas de case vide

No.	No.	No.	No.	No.	No.	No.	No.
H 1	F 8	Cl 15	Co & Ni 22	Br 29	Pd 36	I 42	Pt & Ir 50
Li 2	Na 9	K 16	Cu 23	Rb 30	Ag 37	Cs 44	Os 51
G 3	Mg 10	Ca 17	Zn 24	Sr 31	Cd 38	Ba & V 45	Hg 52
Bo 4	Al 11	Cr 19	Y 25	Ce & La 33	U 40	Ta 46	Tl 53
C 5	Si 12	Ti 18	In 26	Zr 32	Sn 39	W 47	Pb 54
N 6	P 13	Mn 20	As 27	Di & Mo 34	Sb 41	Nb 48	Bi 55
O 7	S 14	Fe 21	Se 28	Ro & Ru 35	Te 43	Au 49	Th 56

Julius Lothar Meyer (1830-1895)

Table from *Annalen der Chemie, Supplementband* 7, 354 (1870).

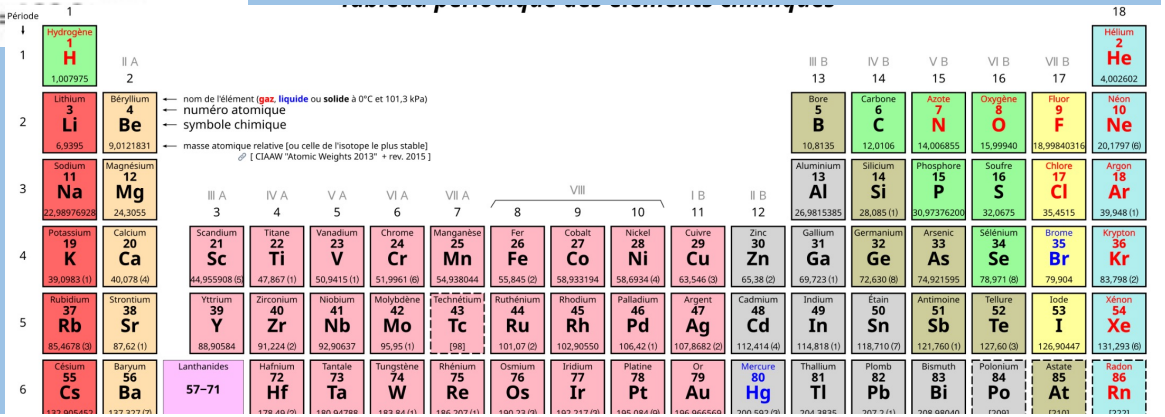
Periodic table according to Lothar Meyer, 1870

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.
	B=11,0	Al=27,3	--	--	--	?In=113,4	Tl=202,7	
	C=11,97	Si=28	--	--	Zr=89,7	Sn=117,8	--	Pb=206,4
	N=14,01	P=30,9	Ti=48	As=74,9	Nb=93,7	Sb=122,1	Ta=182,2	Bi=207,5
	O=15,96	31,98	V=51,2	Se=78	Mo=95,6	Te=128?	W=183,5	--
--	F=19,1	Cl=35,38	Cr=52,4	Br=79,75	Ru=103,5	J=126,5	Os=198,6 ?	--
			Mn=54,8		Rh=104,1		Ir=196,7	
			Fe=55,9		Pd=106,2		Pt=196,7	
Li=7,01	Na=22,99	K=39,04	Co=Ni=58,6	Rb=85,2		Cs=132,7		--
			Cu=63,3		Ag=107,66		Au=196,2	
?Be=9,3	Mg=23,9	Ca=39,9		Sr=87,0		Ba=136,8		--
			Zn=64,9		Cd=111,6		Hg=	

Classement par masse atomique croissante

Colonne = « Valence » = nombre maximal de liaisons qu'un élément peut créer

Publication 1870 (après Mendeleiv)



Le tableau de Mendeleiv : 1869

Nouveau système de classification, s'appuyant sur les masses atomiques déterminées avec précision.

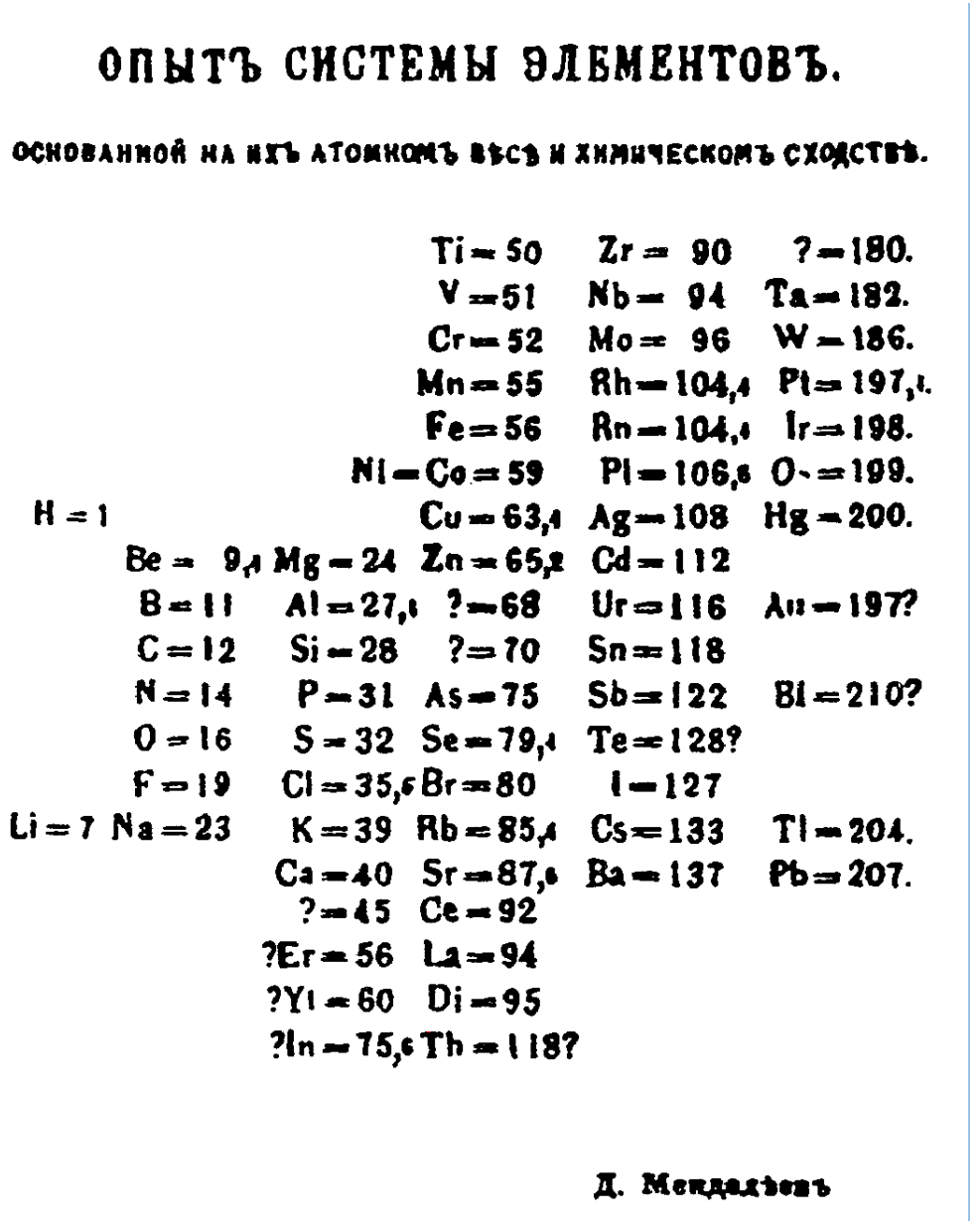
S'appuie sur les apports antérieurs et la théorie atomique.

Eléments classés par masse atomique croissante.

Montre une **périodicité des propriétés chimiques** (valence)

Correction de certaines masses atomiques

Prédiction de nouveaux éléments chimiques



ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180.	
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182.	
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186.	
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,1.	
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198.	
			Ni = Co = 59	Pl = 106,6	Os = 199.	
H = 1			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.	
	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112		
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116	Au = 197?	
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118		
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?	
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?		
	F = 19	Cl = 35,6	Br = 80	I = 127		
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204.	
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207.	
		? = 45	Ce = 92			
		?Er = 56	La = 94			
		?Yt = 60	Di = 95			
		?In = 75,6	Th = 118?			

Д. Менделѣевъ

Tableau de 1871

Reihen	Gruppe I. — R^2O	Gruppe II. — RO	Gruppe III. — R^2O^3	Gruppe IV. RH^4 RO^2	Gruppe V. RH^3 R^2O^5	Gruppe VI. RH^2 RO^3	Gruppe VII. RH R^2O^7	Gruppe VIII. — RO^4
1	H=1							
2	Li=7	Be=9.4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27.3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35.5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	— — — —

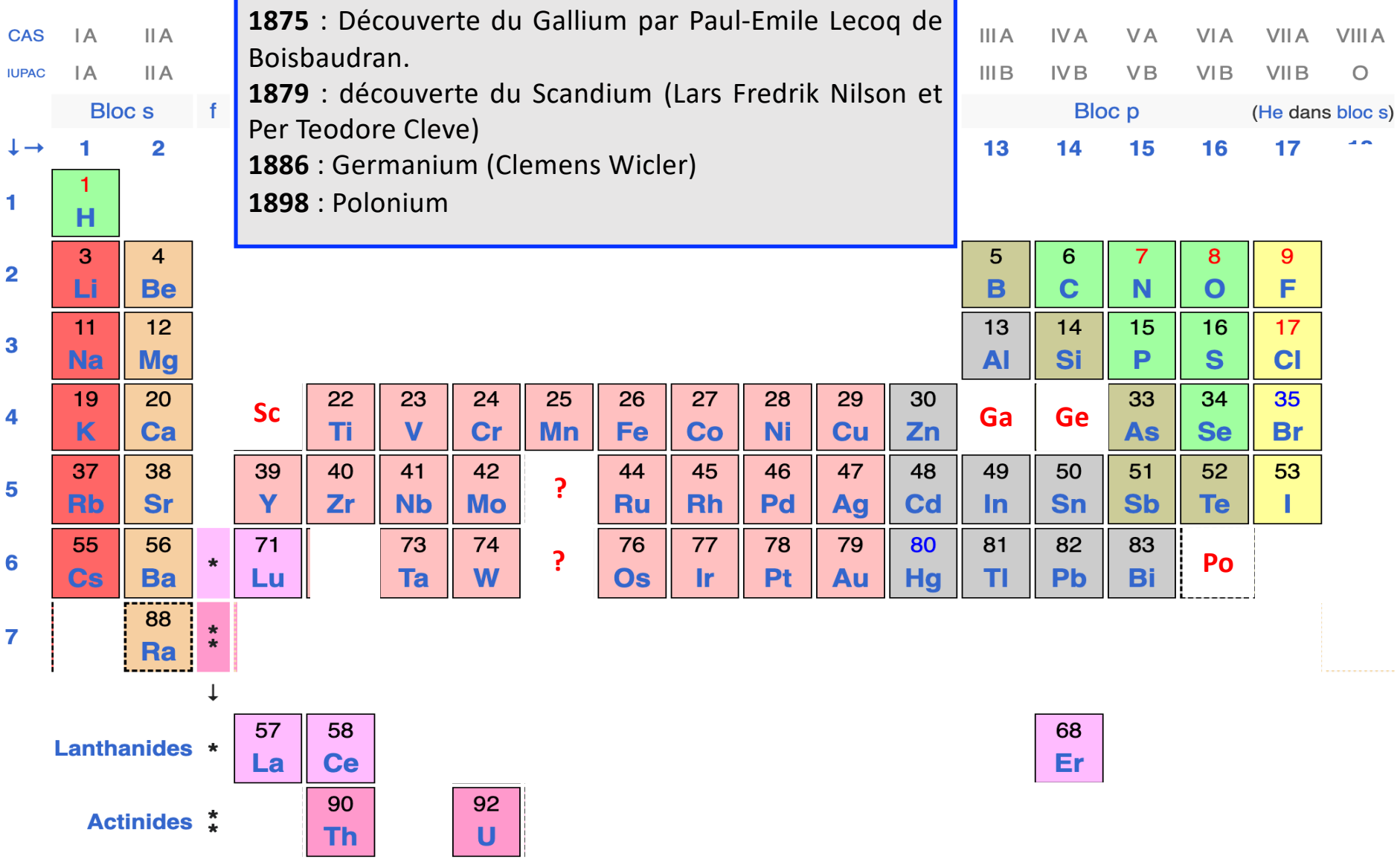
R2O = Monovalent
RO = divalent
R2O3 = trivalent
RO2 = tetravalent
R2O5=pentavalent
RO3 = hexavalent
R2O7 = heptavalent

Didyme = Praseodyme + Neodyme
La : masse surestimée (~ 138).
Difficulté de l'extraction et chimie des terres rares.

Tableau périodique des éléments

CAS	IA	IIA		IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIIIB	VIIIB	VIIIB	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
IUPAC	IA	IIA		IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIII	VIII	VIII	IB	IIB	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	O
	Bloc s		f	Bloc d										Bloc p					(He dans bloc s)
↓→	1	2		3[b]	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
1	1 H																		
2	3 Li	4 Be												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	
3	11 Na	12 Mg												13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	
4	19 K	20 Ca		?	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	?	?	33 As	34 Se	35 Br	
5	37 Rb	38 Sr		39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	?	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	
6	55 Cs	56 Ba	*	71 Lu		73 Ta	74 W	?	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi			
7		88 Ra	**																
			↓																
	Lanthanides		*	57 La	58 Ce										68 Er				
	Actinides		**		90 Th		92 U												

1875 : Découverte du Gallium par Paul-Emile Lecoq de Boisbaudran.
1879 : découverte du Scandium (Lars Fredrik Nilson et Per Teodore Cleve)
1886 : Germanium (Clemens Wicler)
1898 : Polonium



Découverte des Gaz rares

1892 Lord Rayleigh. Ecart de masse de 1/1000 entre azote atmosphérique et azote produit par réaction

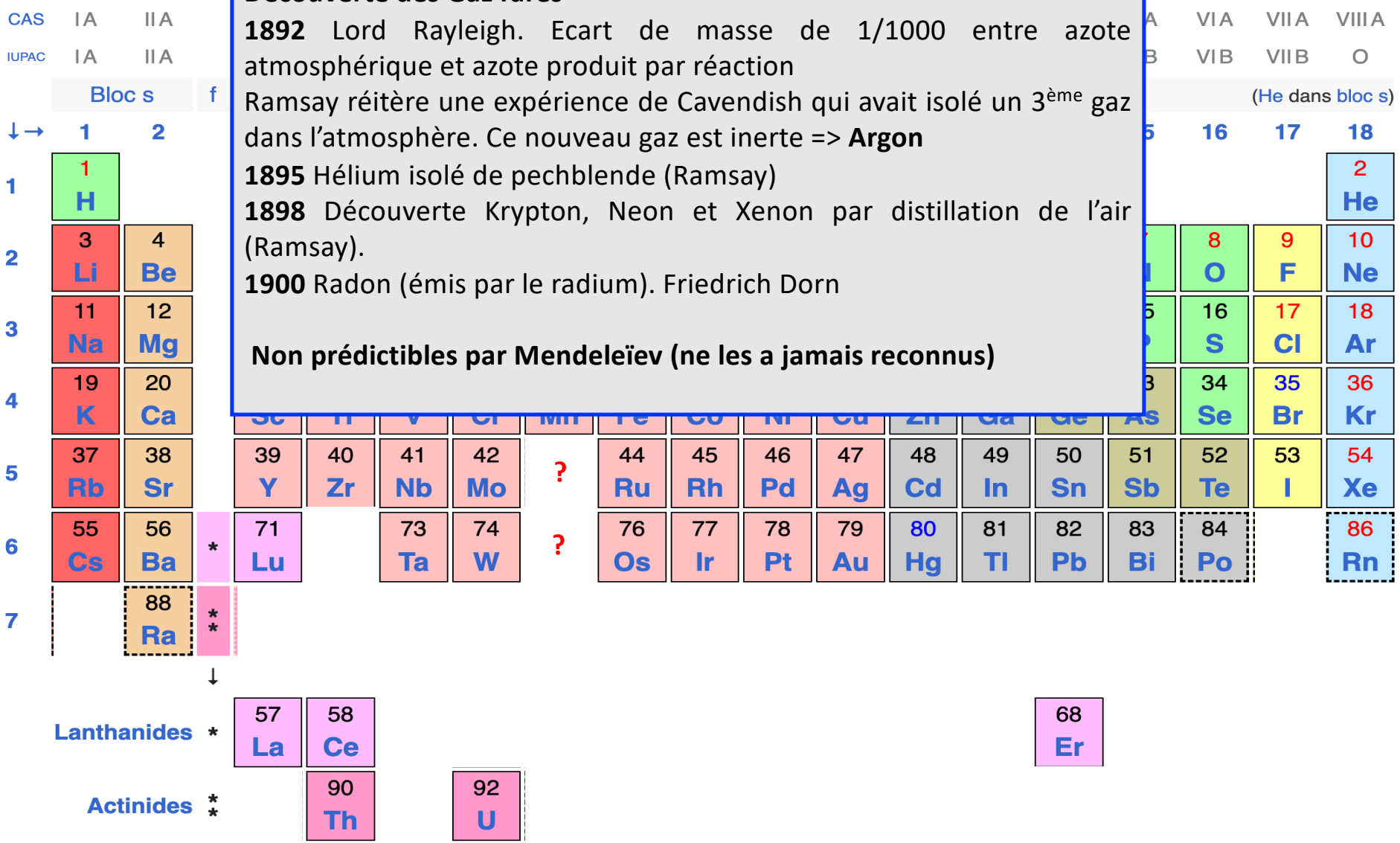
Ramsay réitère une expérience de Cavendish qui avait isolé un 3ème gaz dans l'atmosphère. Ce nouveau gaz est inerte => **Argon**

1895 Hélium isolé de pechblende (Ramsay)

1898 Découverte Krypton, Neon et Xenon par distillation de l'air (Ramsay).

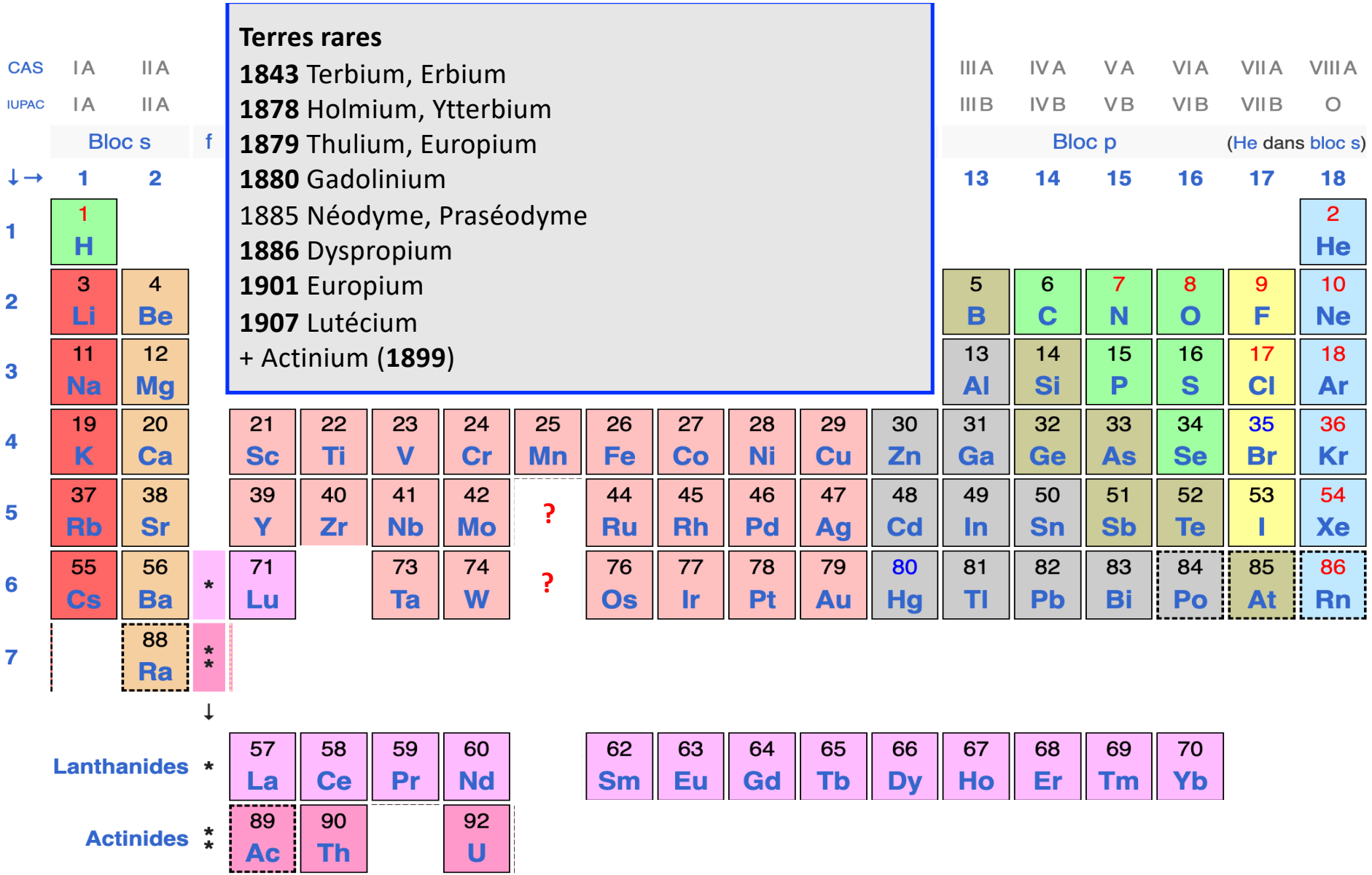
1900 Radon (émis par le radium). Friedrich Dorn

Non prédictibles par Mendeleïev (ne les a jamais reconnus)



Terres rares

1843 Terbium, Erbium
1878 Holmium, Ytterbium
1879 Thulium, Europium
1880 Gadolinium
1885 Néodyme, Praséodyme
1886 Dyspropium
1901 Europium
1907 Lutécium
+ Actinium (**1899**)



LA STRUCTURE DE L'ATOME

Expérience de Rutherford (1909)
Menée par Hans Geiger et Ernest Marsden
Feuille Au 100 nm
Source radioactive

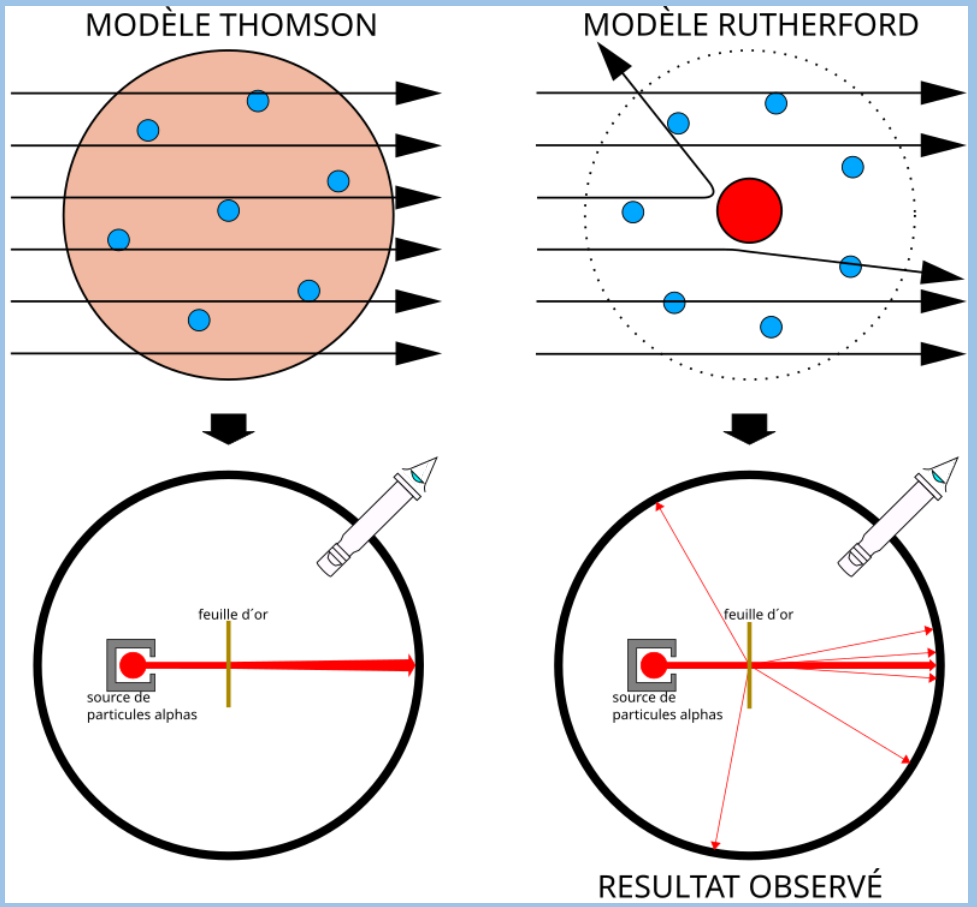
Environ 0.1% des particules sont déviées

Atome est fait essentiellement de vide
Noyaux de charges positive (100000 fois plus petits)

Estimation taille : collision élastique frontale

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Z_1 Z_2 e^2}{r_{\min}} = \frac{1}{2}mv^2$$

R ~ 3 x 10^{-15} m = 3 fm



Atomistique

Modèle atomique de Thomson

Pudding de charges + et –

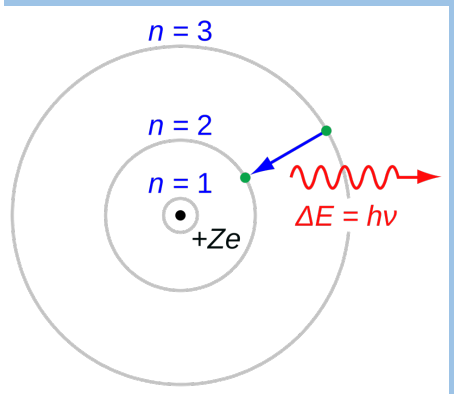
Incompatible avec expérience de Rutherford

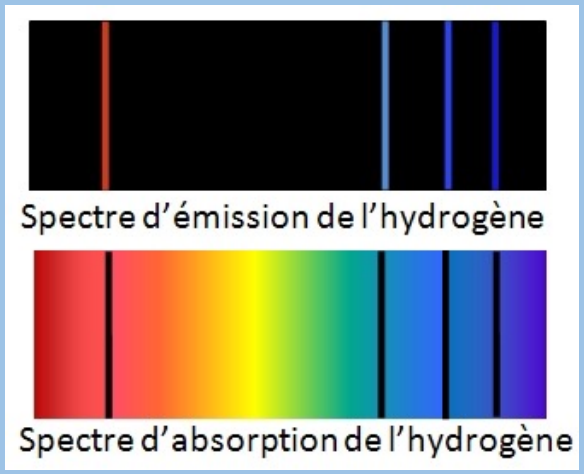
Modèle atomique de Rutherford

Mouvements circulaires (elliptiques, Sommerfeld) des électrons autour du noyau

Incompatible avec le rayonnement des électrons

Spectre de Bremsstrahlung continu => incompatibles avec raies d'émission





Modèle de Bohr

Postulats

- Orbites stables sans rayonnement de l'électron
- Quantification du moment cinétique

$$mrv = n\hbar$$

$$r = r_n = \frac{\hbar^2}{me^2} n^2 = a_0 n^2$$

$$E_n = -\frac{1}{2}\frac{e^2}{r_n} = -\frac{k^2 m q_e^4}{2n^2\hbar^2} = \frac{E_1}{n^2}$$

E1 = constante de Rydberg

-13.6 eV

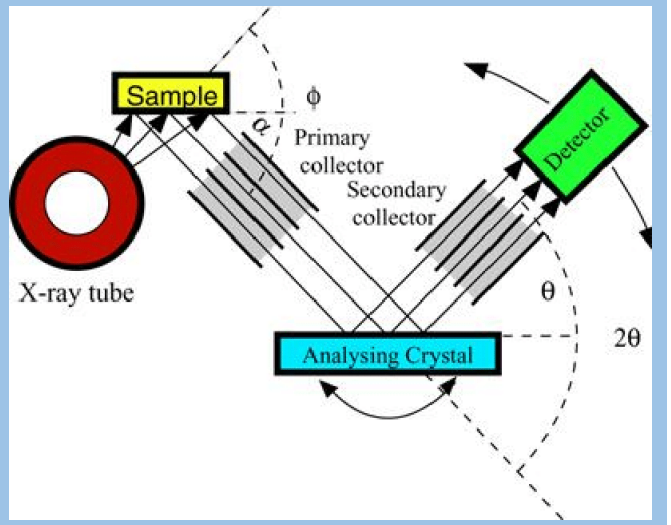
Loi de Moseley et avènement du numéro atomique

Henri Moseley (1887-1915) Physicien britannique
Assistant de Rutherford à Manchester (avec notamment Niels Bohr)
Installe source de rayons X (travaux de Von Laue)

=> Spectres de diffraction de métaux
⇒ Spectres de fluorescence

- 1 case = 1 numéro atomique (charge du noyau +Ze)
- Z est donné par la spectroscopie des rayons X
- Place Ar avant K, confirme Co Z=27 et Ni Z=28
- Prédiction Z=43, 61, 72, 75, 85 et 87
- Aucun élément manquant entre Z=1 et Z=92

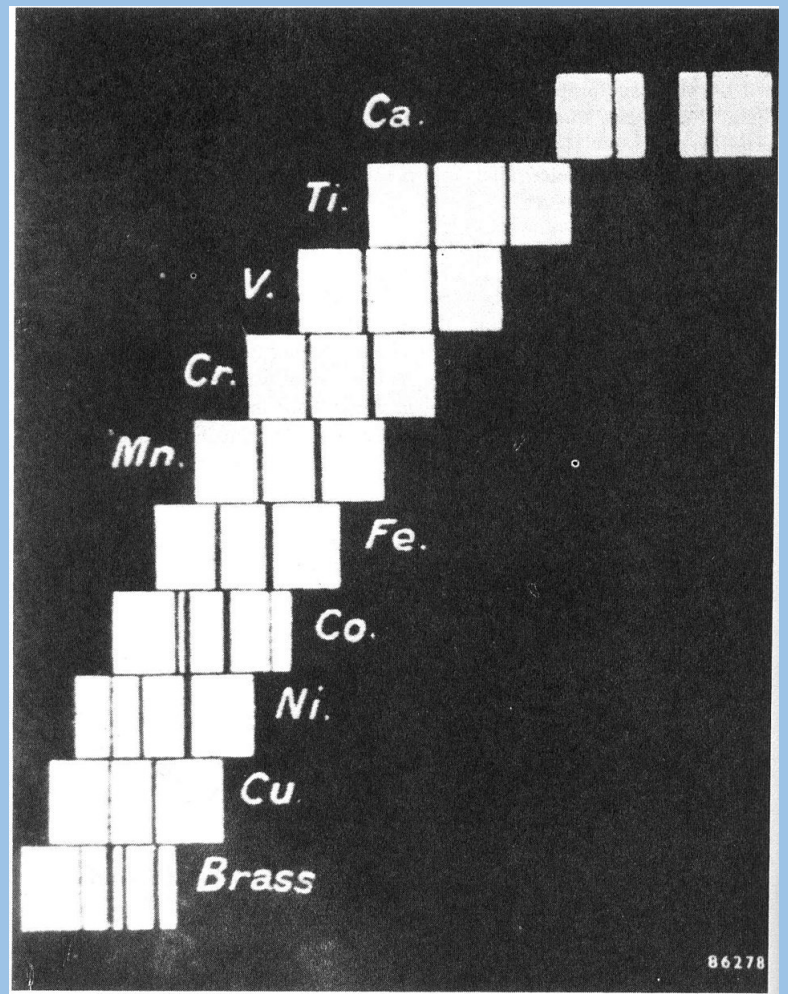


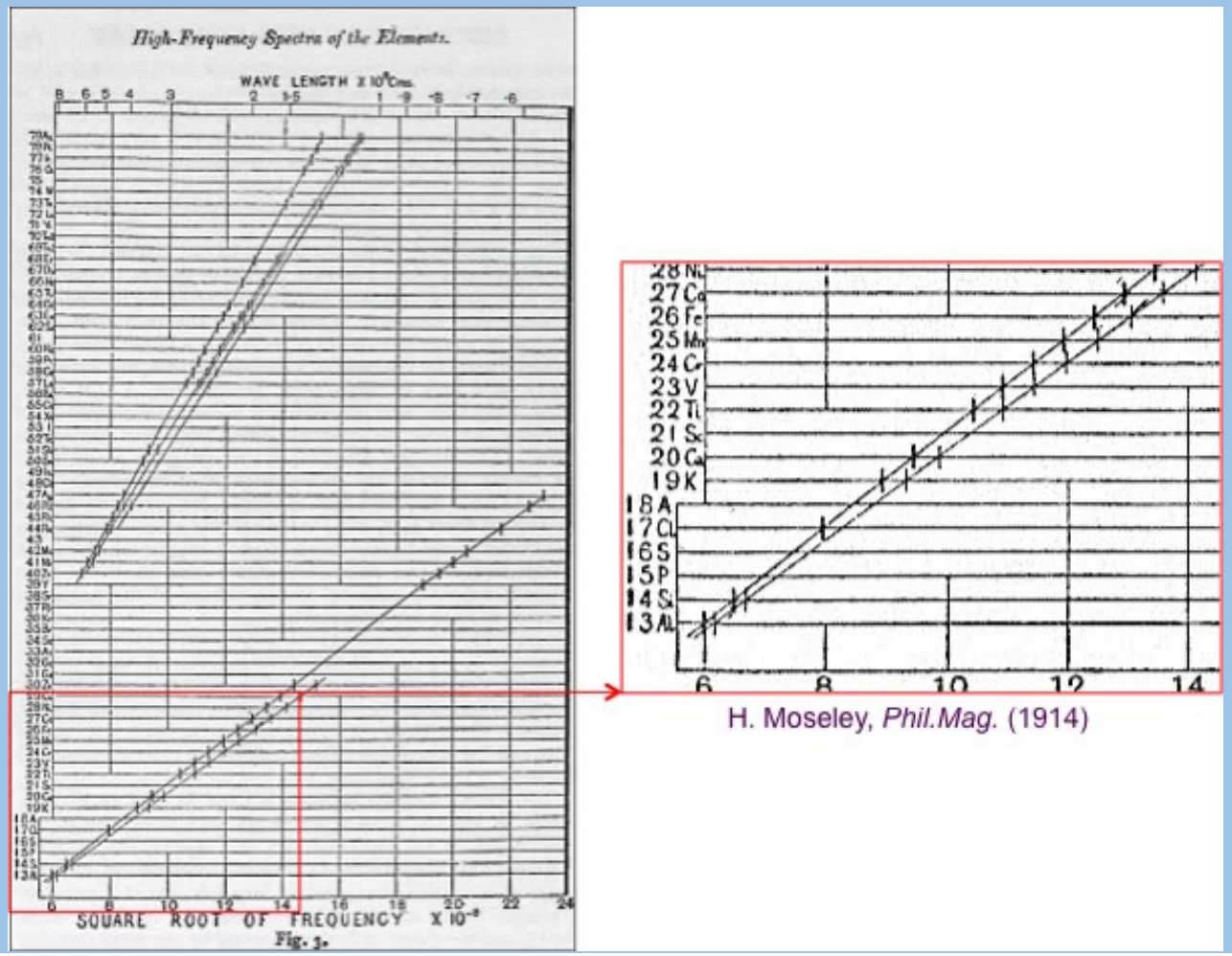


Loi de Moseley et avènement du numéro atomique

Cohérence avec modèle de Bohr

$$\nu = k_1 \left(Z - k_2\right)^2$$





H. Moseley, *Phil.Mag.* (1914)

Découvertes de nouveaux éléments :
Proctatinium (1913-1917)
Hafnium (1923)
Rhénium (1925)
Technétium (1937)

Prédiction nouveaux éléments :
Francium (1939)
Astate (1940)
Prométhium (1945)

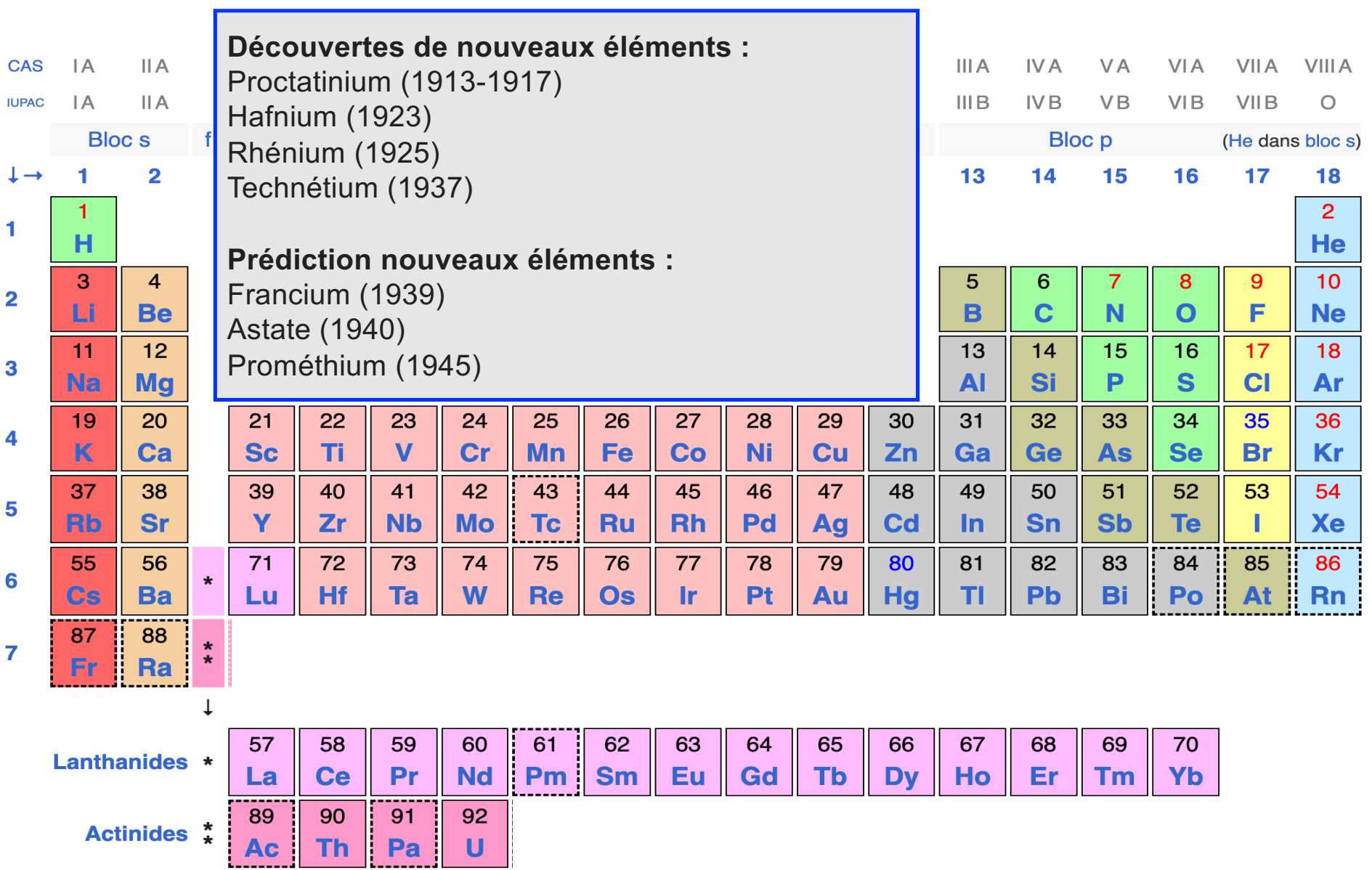
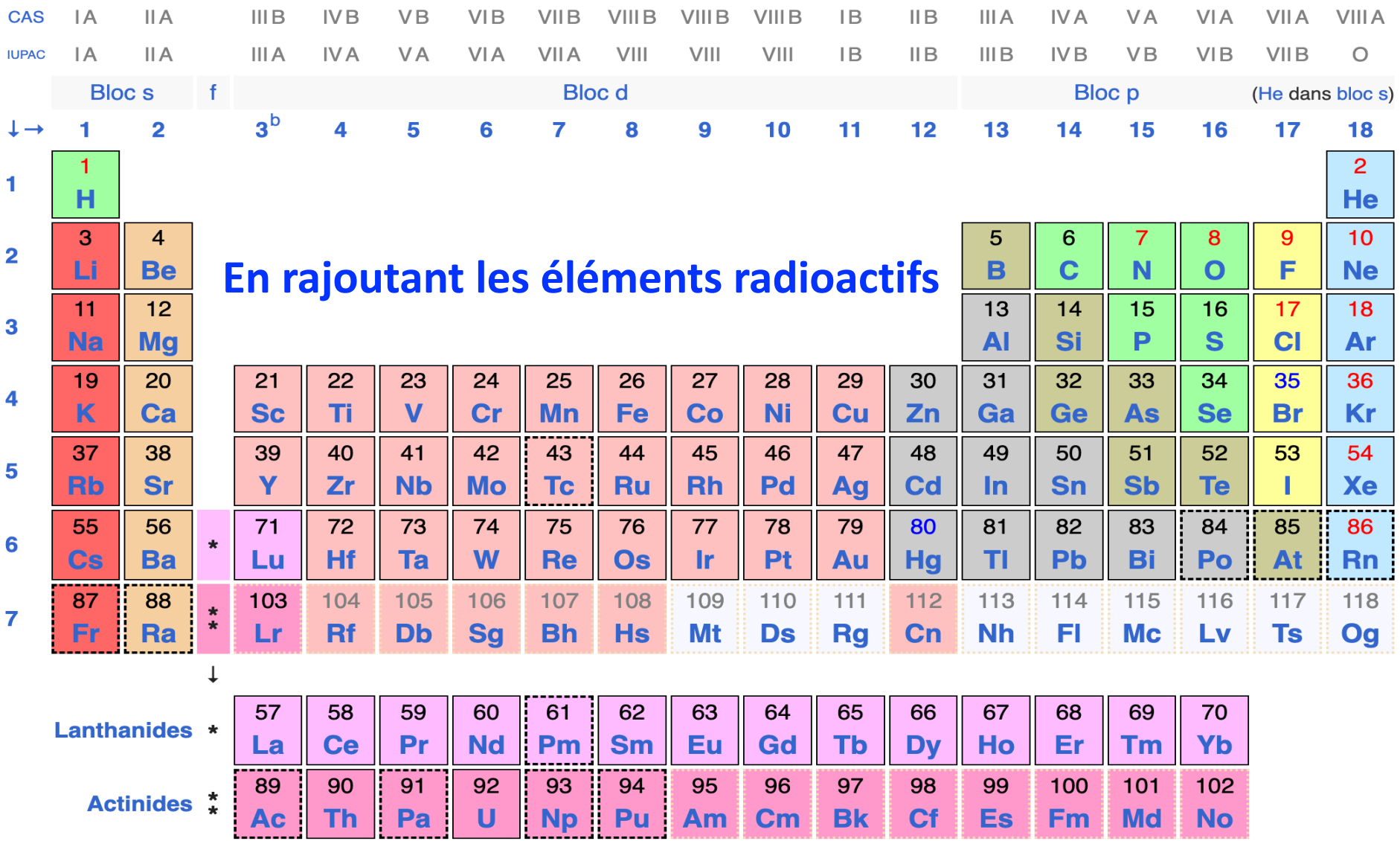


Tableau périodique des éléments



En rajoutant les éléments radioactifs

Atomistique

Equation de Schrödinger pour atome hydrogène (et hydrogénoïde)

Le formalisme de la physique quantique mis en place au début du XXème siècle permet un calcul analytique exact dans le cas de l'atome d'hydrogène.

Dans le cas stationnaire :

$$\widehat{H}_0\psi = E\psi \text{ soit } \left[\frac{\hbar^2\Delta}{2\mu} + \left(E + \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\, r}\right)\right]\psi(\vec{r}) = 0.$$

$$L^2 Y_{l,m} = \hbar^2 l(l+1) Y_{l,m}$$

$$L_z Y_{l,m} = \hbar m Y_{l,m}$$

$$\psi_{n,\ell,m}(r,\theta,\phi) = \sqrt{\left(\frac{2}{nr_0}\right)^3 \frac{(n-\ell-1)!}{2n(n+\ell)!}} L_{n-\ell-1}^{2\ell+1}\left(\tfrac{2r}{nr_0}\right)\left(\frac{2r}{nr_0}\right)^{\ell} e^{-\frac{r}{nr_0}} Y_{\ell,m}(\theta,\phi),$$

=> Transformation en fonction de phase réelle par combinaisons linéaires

$$n \geq 1$$

$$0 \leq l \leq \text{n-1}$$

$$-l \leq m \leq +l$$

$$E_n = -\frac{E_\mathrm{I}}{n^2}$$

$$E_\mathrm{I} = \frac{\mu e^4}{32\pi^2\varepsilon_0^2\hbar^2}$$

$$r_0 \equiv \frac{4\pi\varepsilon_0\hbar^2}{\mu e^2}$$

Atomistique

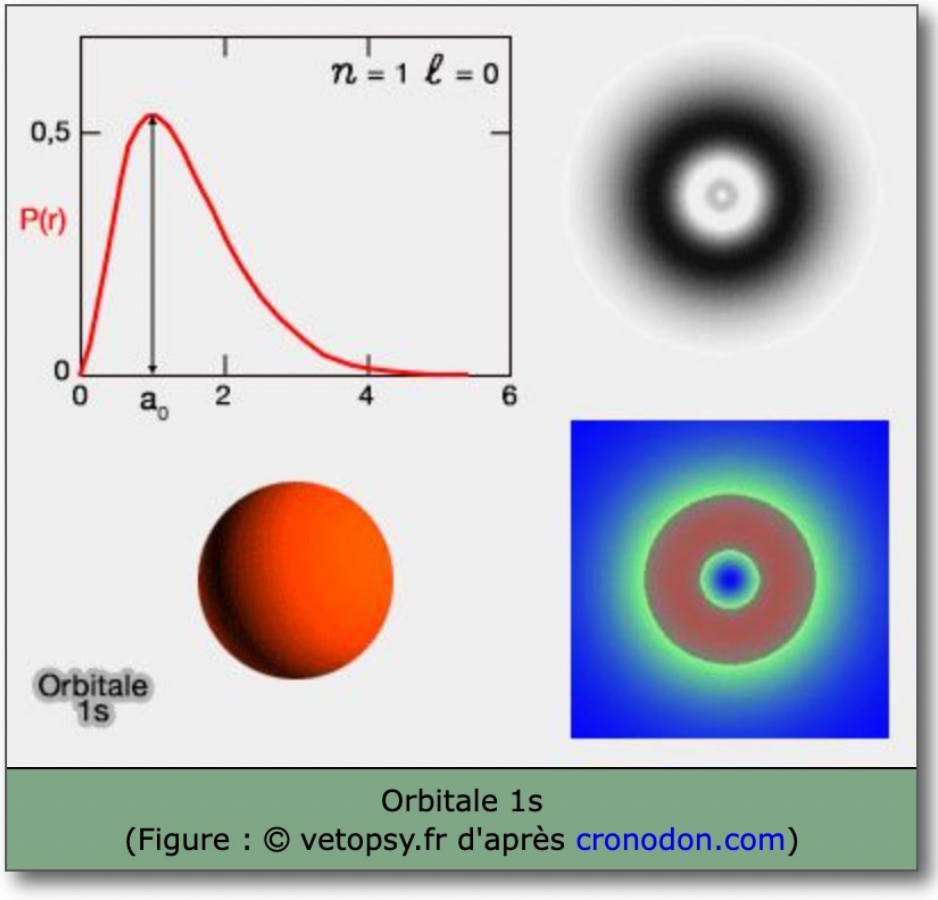
Orbitales atomiques

Orbitales réelles d'un atome hydrogénoïde par triplet de nombres quantiques (n, ℓ, m_ℓ)

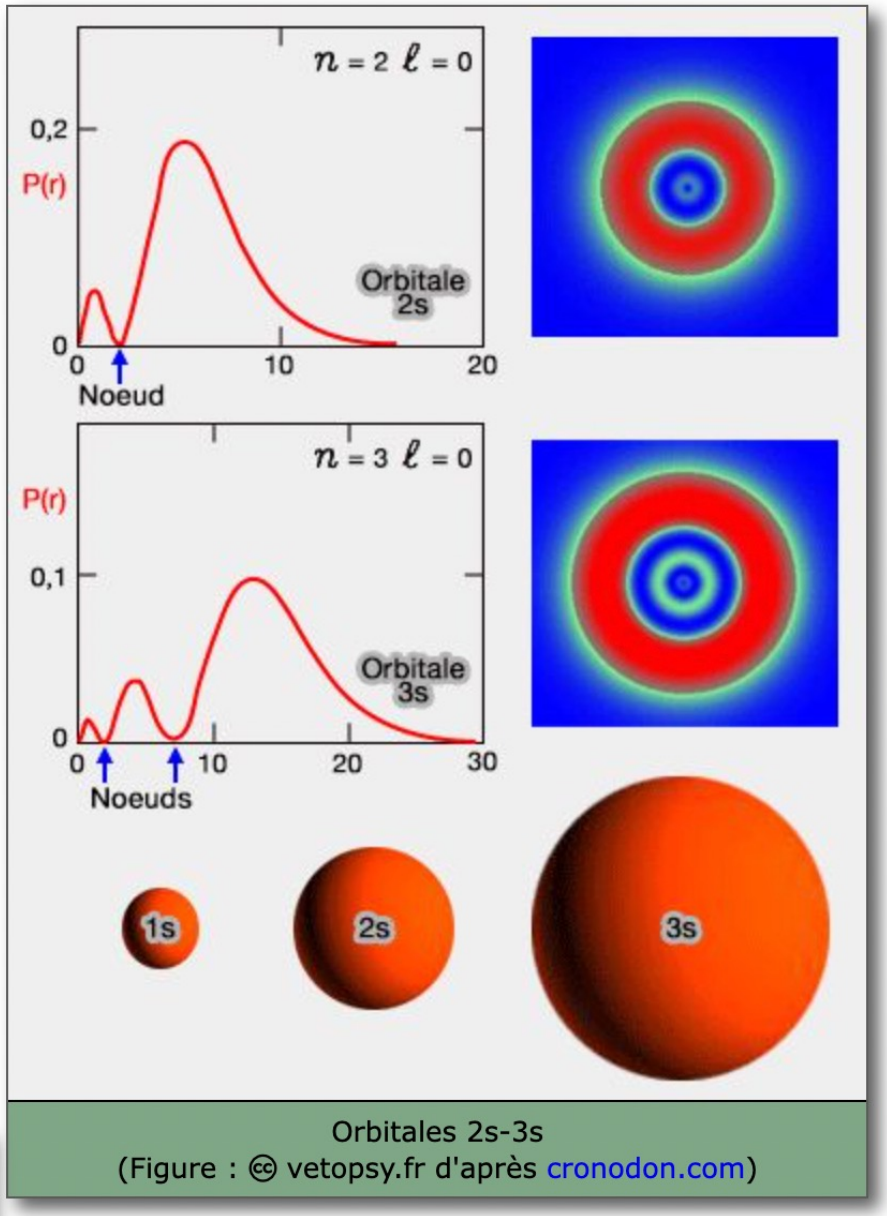
Nombres quantiques		Sous-couche	Module $\lvert m_\ell \rvert$ du nombre quantique magnétique							
Principal	Azimutal		0	1		2		3		
$n = 1$	$\ell = 0$	1*s*	1s							
$n = 2$	$\ell = 0$	2*s*	2s							
	$\ell = 1$	2*p*	 $2p_z$	 $2p_x$	 $2p_y$					
$n = 3$	$\ell = 0$	3*s*	 3s							
	$\ell = 1$	3*p*	 $3p_z$	 $3p_x$	 $3p_y$					
	$\ell = 2$	3*d*	 $3d_{z^2}$	 $3d_{xz}$	 $3d_{yz}$	 $3d_{xy}$	 $3d_{x^2-y^2}$			

Atomistique

Partie radiale de la fonction d'onde



Orbitale 1s
(Figure : © vetopsy.fr d'après cronodon.com)



Orbitales 2s-3s
(Figure : © vetopsy.fr d'après cronodon.com)

Atomistique

$$n \geq 1$$

$$0 \leq l \leq \text{n-1}$$

$$-l \leq m \leq +l$$

Equation de Schrödinger d'un atome polyélectronique (Z)
Le calcul analytique exact est impossible, il faut procéder avec des méthodes approchées.

Différentes méthodes :

- Modèle des constantes d'écran : les électrons de cœur « écrantent » les effets des charges du noyau
- Méthode de Hartree-Fock : champ moyen généré par les électrons
- Méthode variationnelle : paramétrisation des fonctions d'onde et minimisation de l'énergie

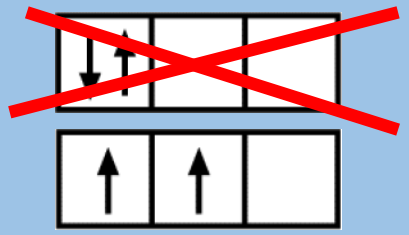
=> Energie d'un niveau dépend de n et de l

Atomistique

Règles de Hund et Principe d'exclusion de Pauli

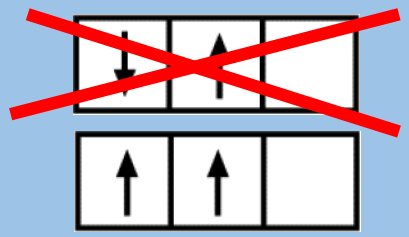
Règle n°1

Etat le plus stable correspond à 2S+1. Chaque électron d'une sous-couche remplit d'abord une case vide. Ensuite, on remplit avec un second électron de spin opposé (principe d'exclusion de Pauli). Electrons appariés.



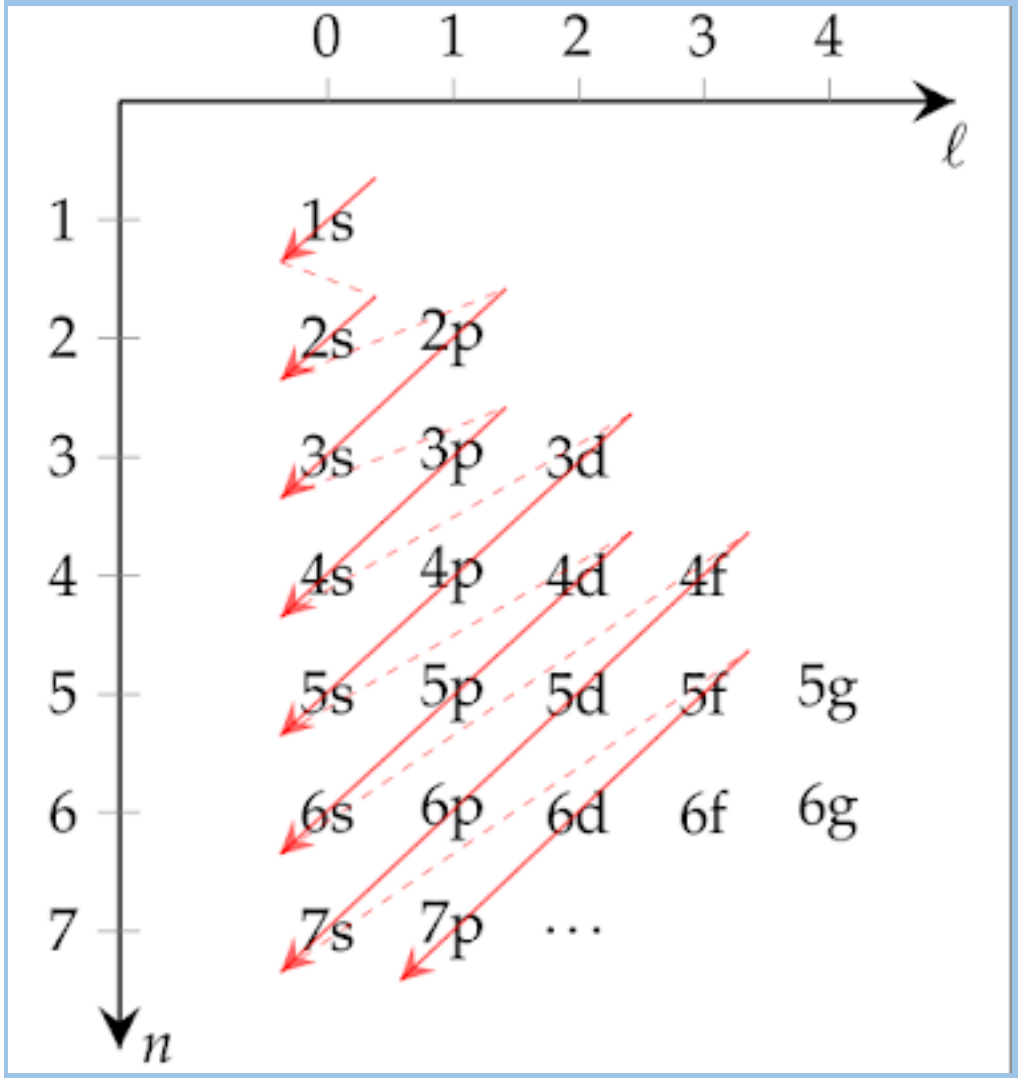
Règle n°2

Les électrons seuls dans une case présentent la même orientation de spin, ceci correspondant à la configuration la plus stable.



Atomistique

Règle de Klechkowski

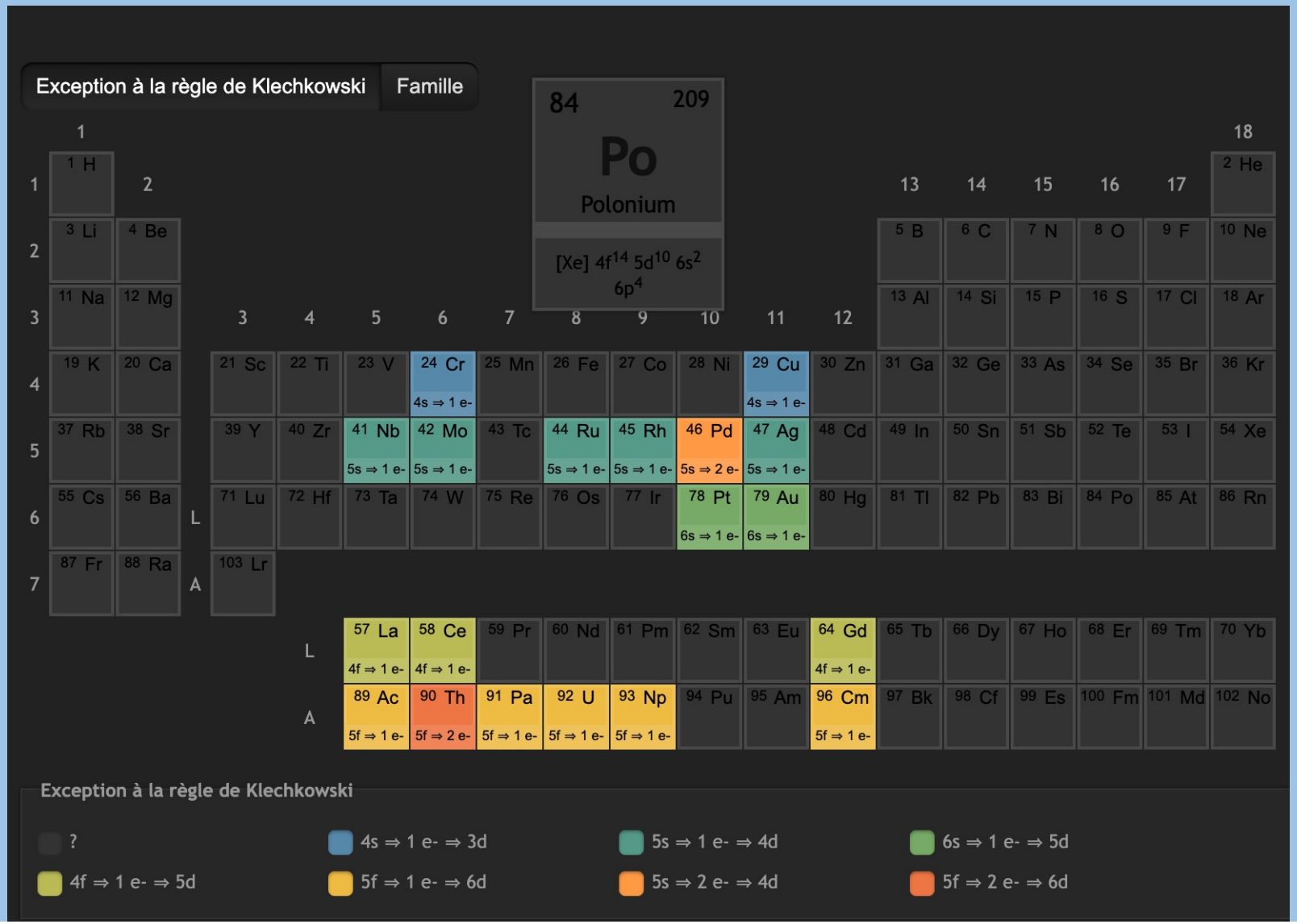


Règles de Hund et Principe d'exclusion de Pauli

ℓ=0	ℓ=3							ℓ=2					ℓ=1		
1s															
2s													2p	2p	2p
3s													3p	3p	3p
4s								3d	3d	3d	3d	3d	4p	4p	4p
5s								4d	4d	4d	4d	4d	5p	5p	5p
6s	4f	4f	4f	4f	4f	4f	4f	5d	5d	5d	5d	5d	6p	6p	6p
7s	5f	5f	5f	5f	5f	5f	5f	6d	6d	6d	6d	6d	7p	7p	7p

Exceptions à la règle de Klechkowski

Ex Cu $[Ar]3s^2 3d^9$ => Cu $[Ar]3s^1 3d^{10}$



Atomistique

7 couches électroniques à l'état fondamental n=1-7
Chaque couche = sous-couches l=0;n-1

ℓ=0	ℓ=3							ℓ=2					ℓ=1		
1s															
2s													2p	2p	2p
3s													3p	3p	3p
4s								3d	3d	3d	3d	3d	4p	4p	4p
5s								4d	4d	4d	4d	4d	5p	5p	5p
6s	4f	4f	4f	4f	4f	4f	4f	5d	5d	5d	5d	5d	6p	6p	6p
7s	5f	5f	5f	5f	5f	5f	5f	6d	6d	6d	6d	6d	7p	7p	7p

Etat énergétique d'un électron :

$$n \geq 1$$

$$0 \leq l \leq 1$$

$$-l \leq m \leq +l$$

$$m_S = -1/2\, ou\, +1/2$$

	1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																		He
2	Li	Be												B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg												Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca		Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr		Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	*	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	**	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
			↓																
*				La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb		
**				Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No		

Bloc s | Bloc f | Bloc d | Bloc p

Blocs du **tableau périodique**

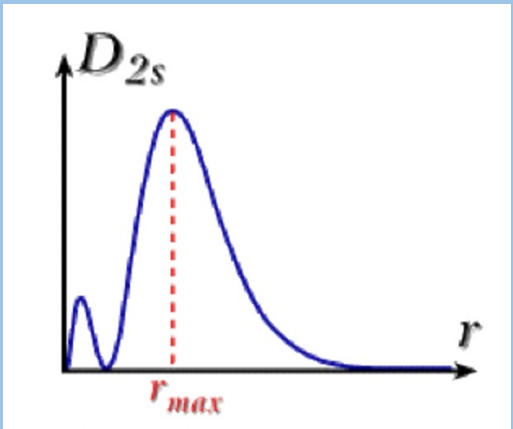
La taille des atomes

La densité électronique est reliée à la fonction d'onde :

$$\rho(\mathbf{r},\theta,\phi) = -\mathrm{e}.\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{N}}\mathbf{n}_{\mathrm{i}}.\mid \Psi_{\mathrm{i}}(\mathbf{r},\theta,\phi)|^2$$

La densité de probabilité est quasi-nulle au delà d'une certaine distance r

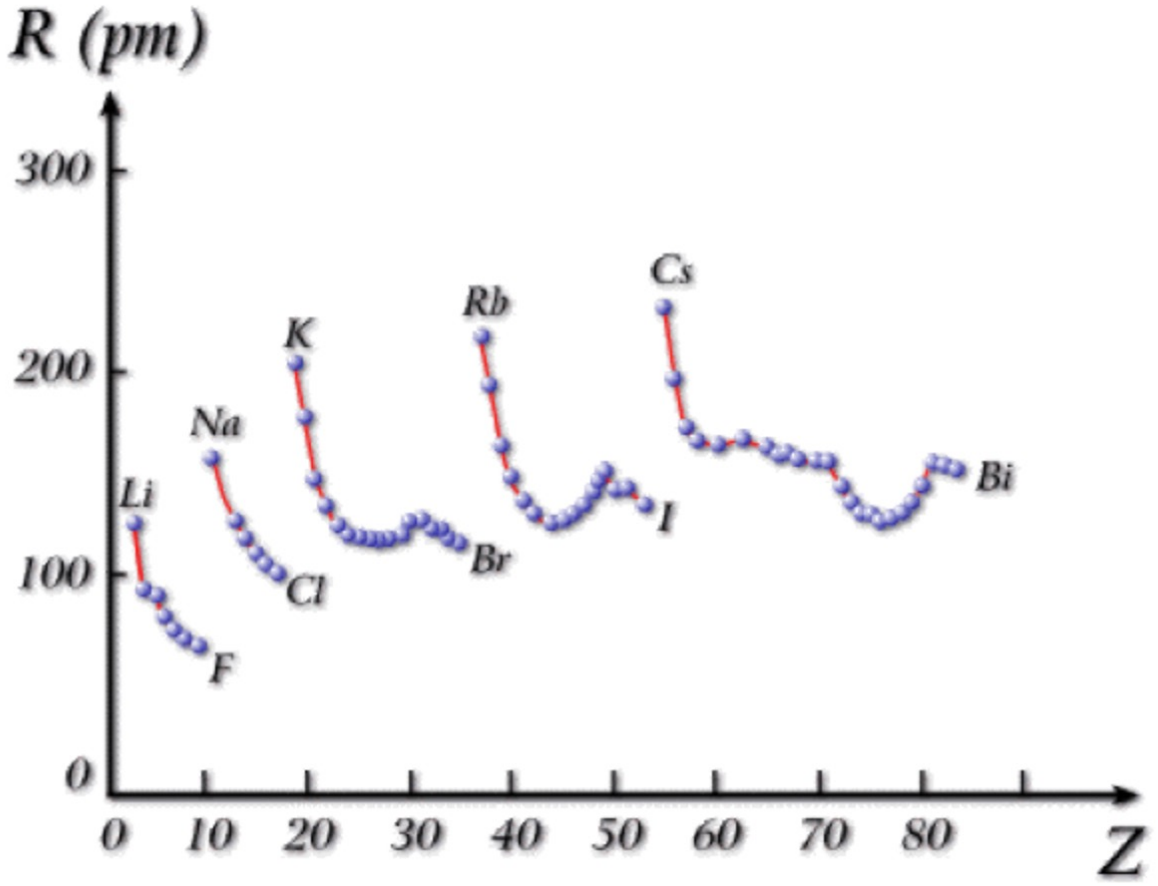
=> Rmax ou rmoyen peuvent être utilisés (mais attention à l'anisotropie des orbitales p, d et f)



La taille des atomes

Détermination expérimentale :

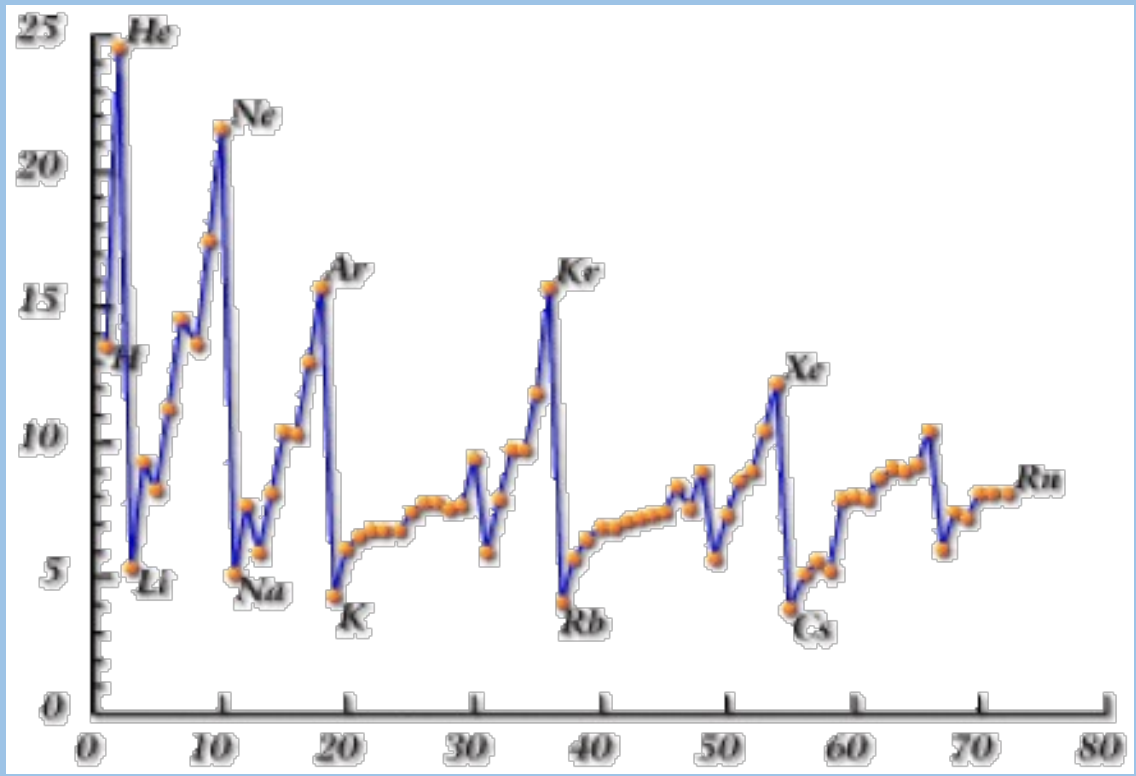
- Taille molécule diatomique
- Modèle des sphères rigides et détermination cristallographique



- Pour une période : R décroit avec Z. Lié à l'attraction croissante quand Z augmente.
- Augmentation sur la période suivante, du fait de l'ajout d'une couche supplémentaire.
- Irrégularités pour le passage du bloc d au bloc p. Stabilisation des couches s.

Energie d'ionisation

- E_I diminue lorsque le rayon atomique augmente (plus on s'éloigne du noyau, plus l'attraction est faible).
- Dans une période, augmente E_I diminue avec Z
- Quand on passe à la période suivante, on observe un saut du fait de l'ajout d'une nouvelle couche



Electronégativité et électropositivité

- Atome électronégatif : aptitude à capter des électrons provenant d'autres atomes. Forte énergie d'ionisation. Affinité électronique élevée.
- Atome électropositif : faibles énergie d'ionisation et affinité électronique.

Echelle de Pauling (1932)

X(F)=4 ; X(Fr)=0.7 ; X(H)=2.2

X croît lorsque EI croît et R croît

$$(\chi_A - \chi_B)^2 = D_{AB} - \sqrt{D_{AA} \cdot D_{BB}}$$

Liaison polarisée plus stable (énergie de liaison)

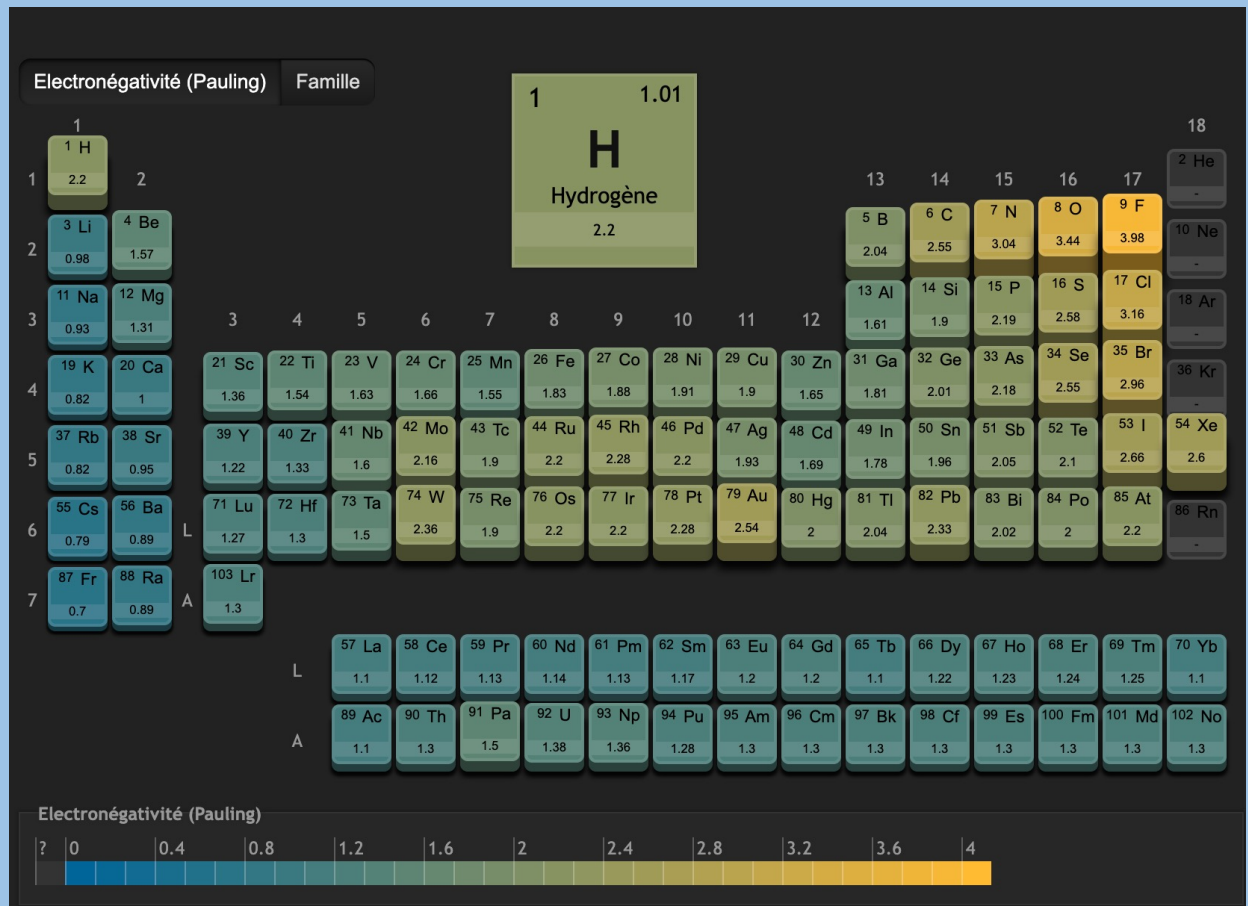
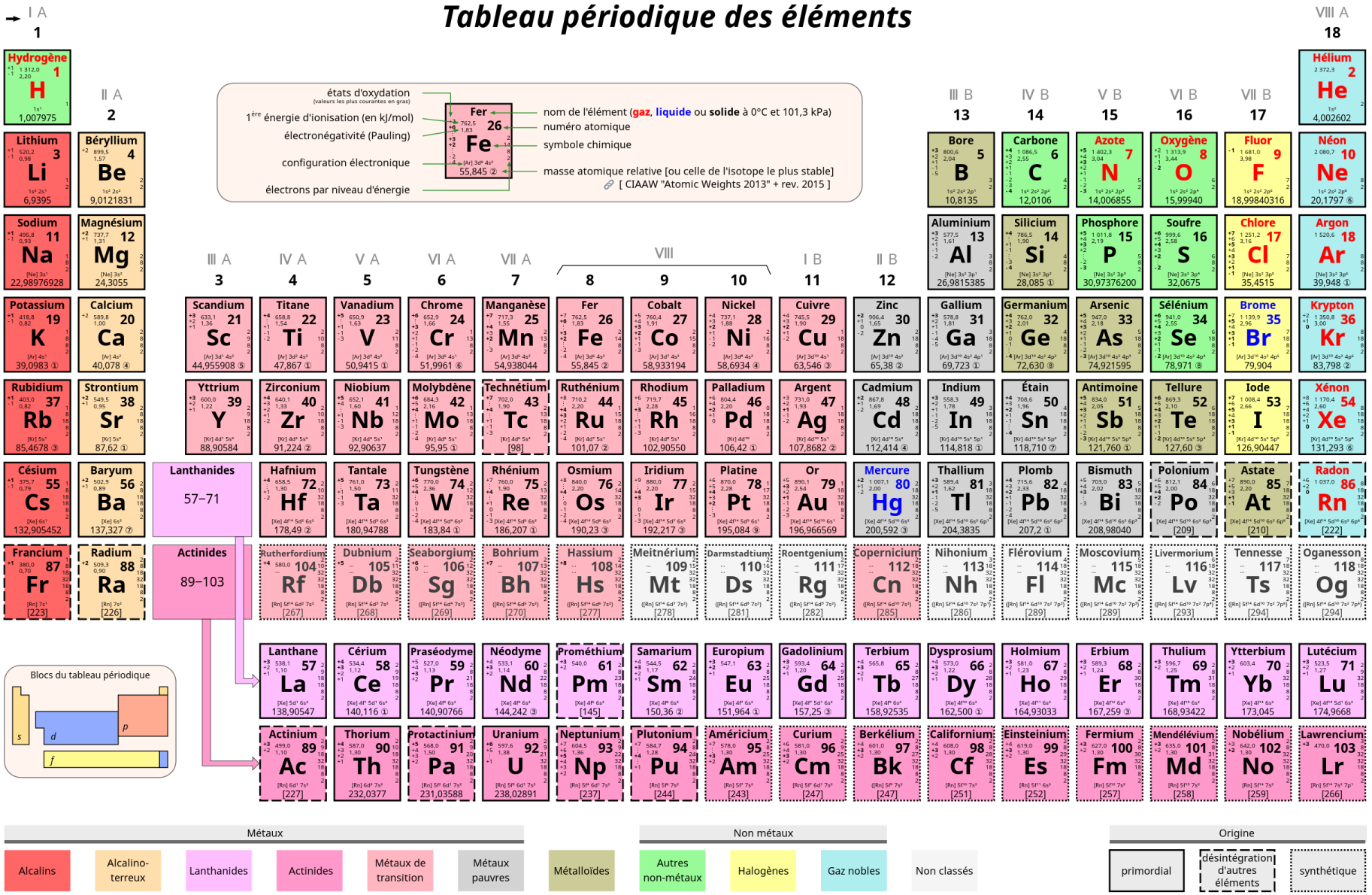


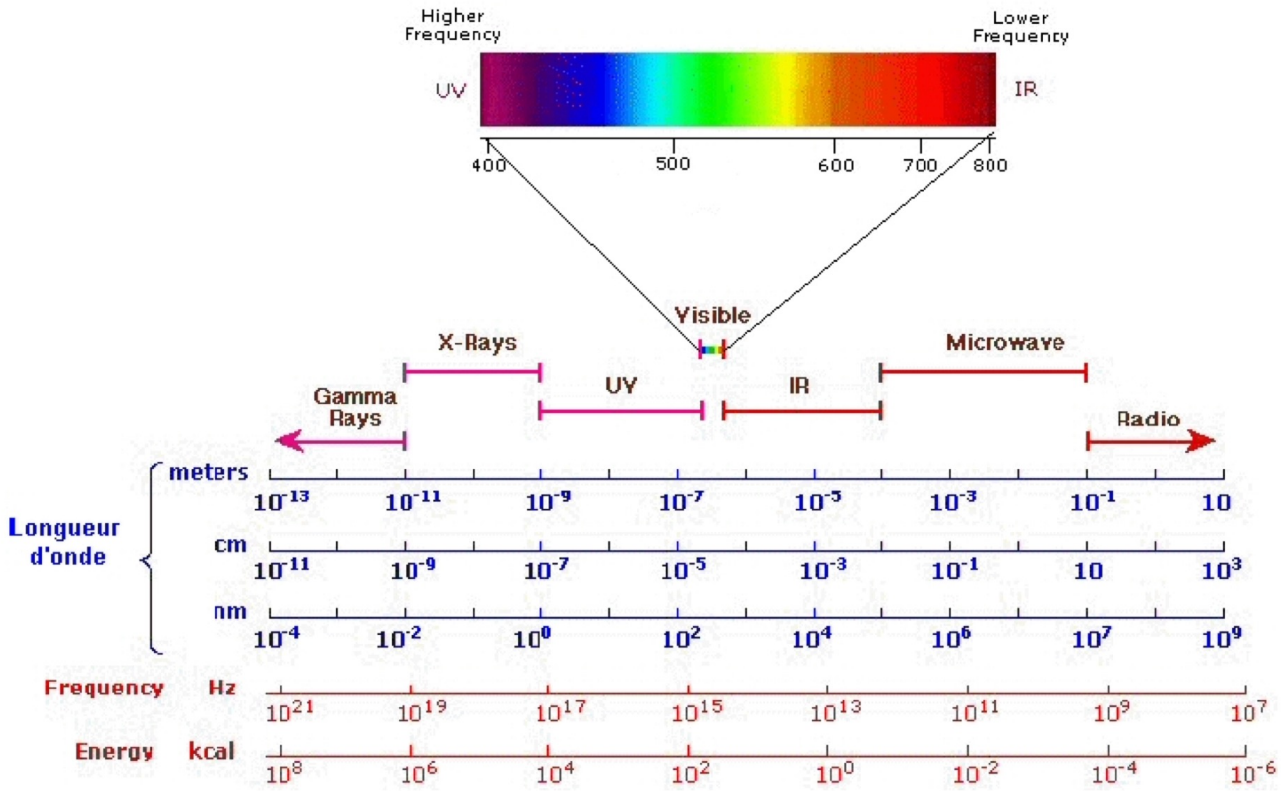
Tableau périodique des éléments



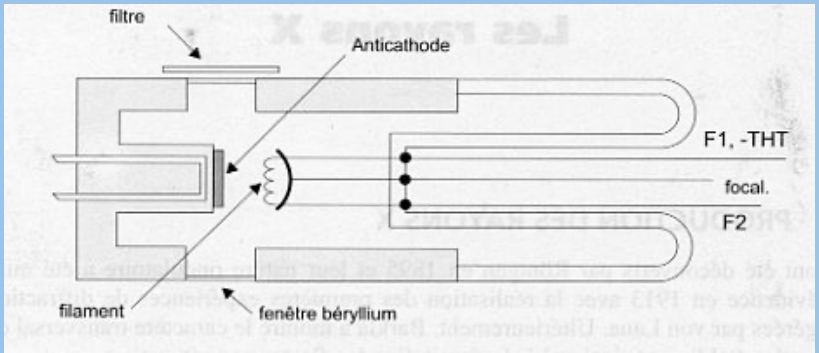
Fin de la première partie

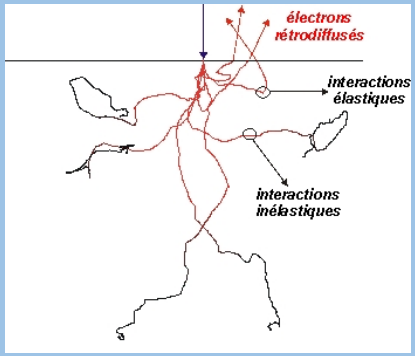
Partie II

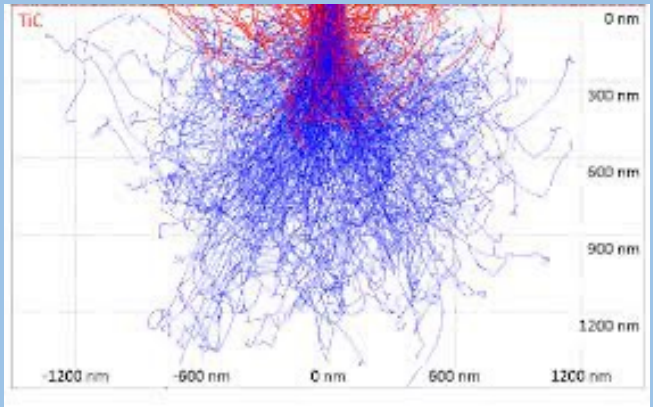
Fluroescence et Radiocristallographie

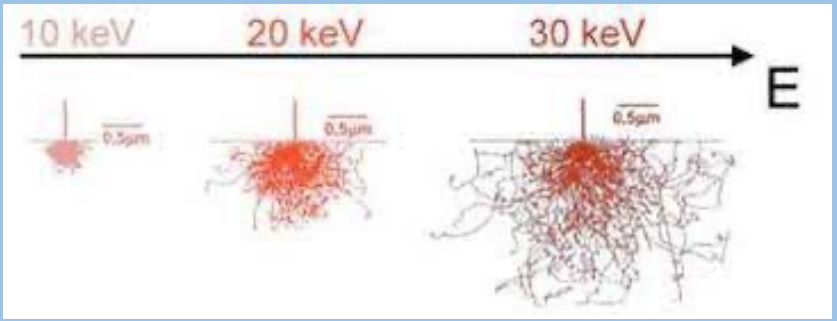


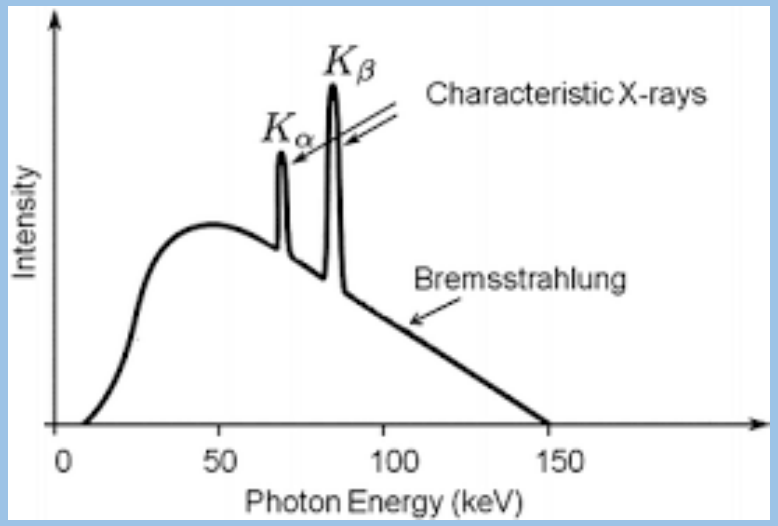



filtre
Anticathode
F1, -THT
focal.
F2
filament
fenêtre béryllium

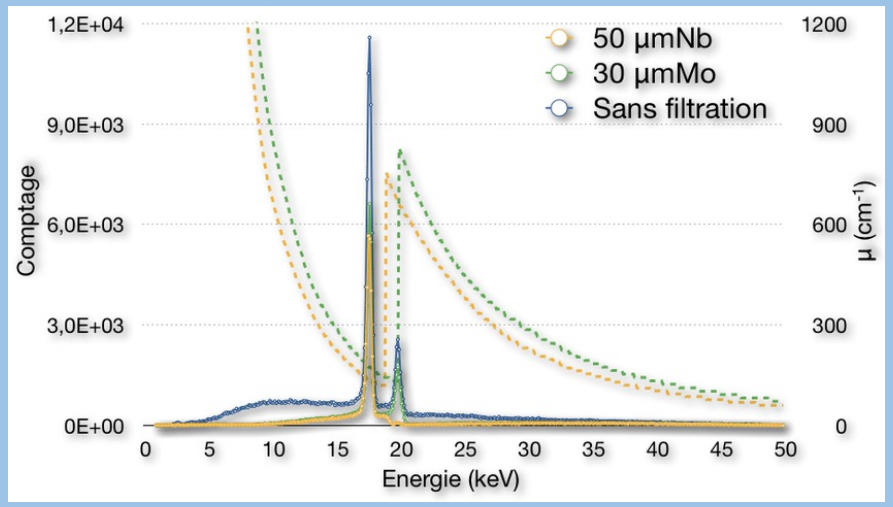

électrons
rétrodiffusés
interactions
élastiques
interactions
inélastiques

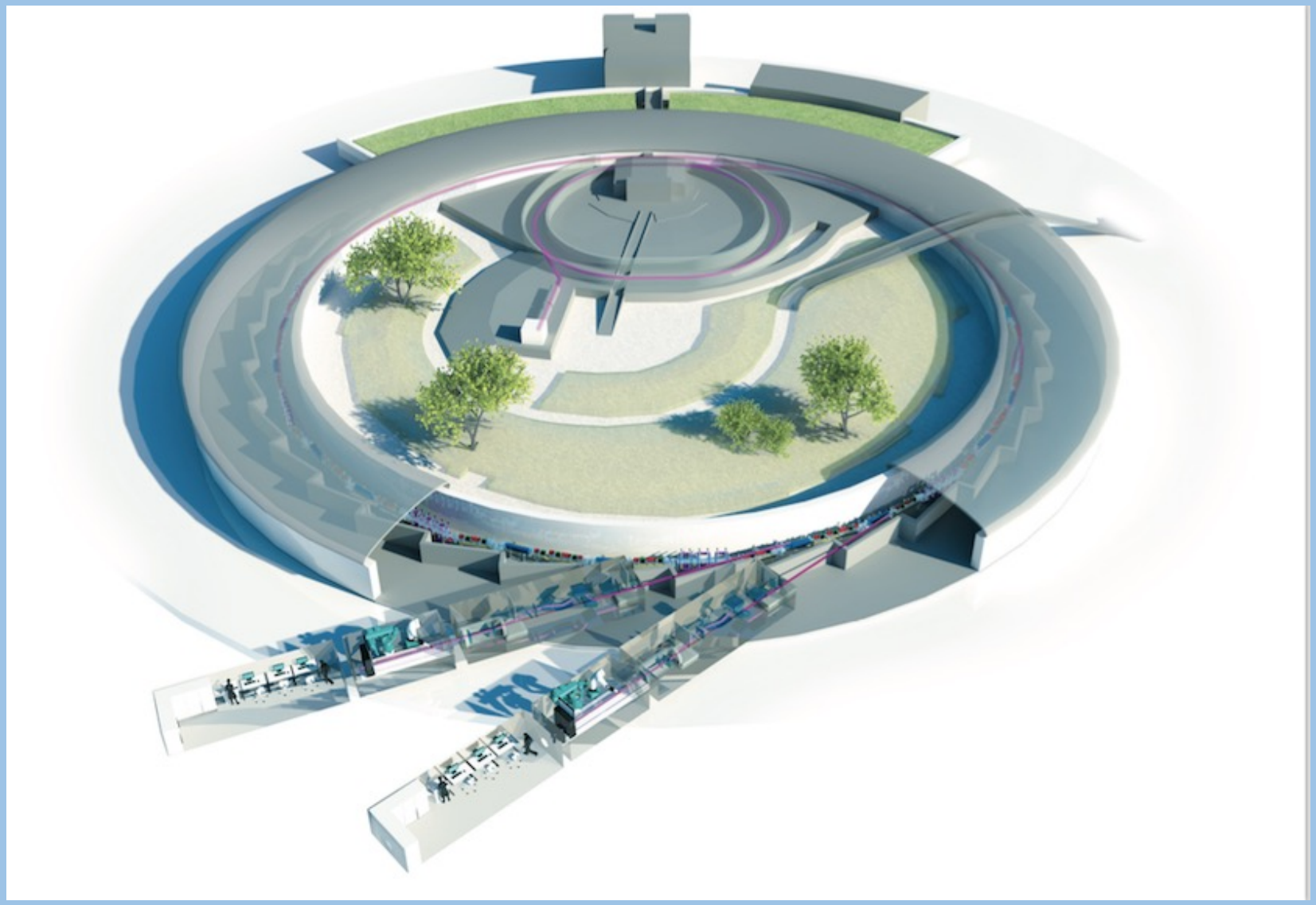

TiC
0 nm
300 nm
600 nm
900 nm
1200 nm
-1200 nm
-600 nm
0 nm
600 nm
1200 nm

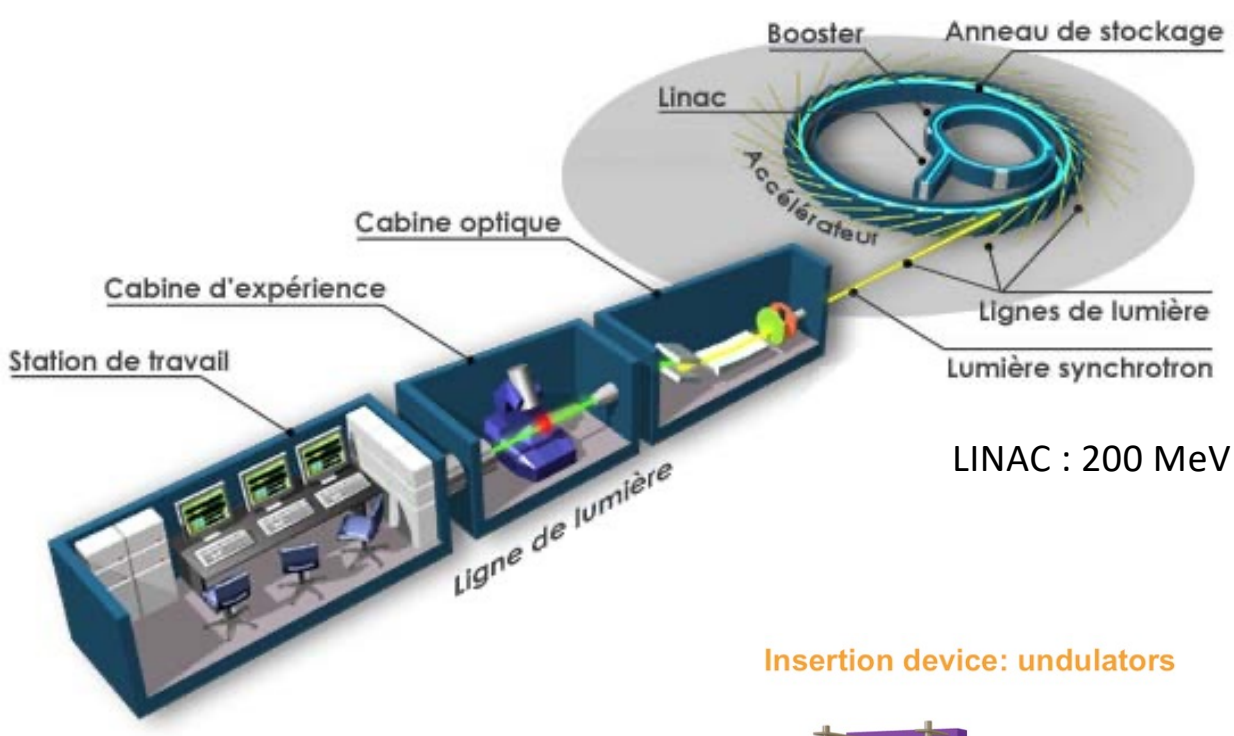

10 keV
20 keV
30 keV
E
0.5µm
0.5µm
0.5µm



On peut faire des calculs simples, mais pour des SPE Physique-Chimie

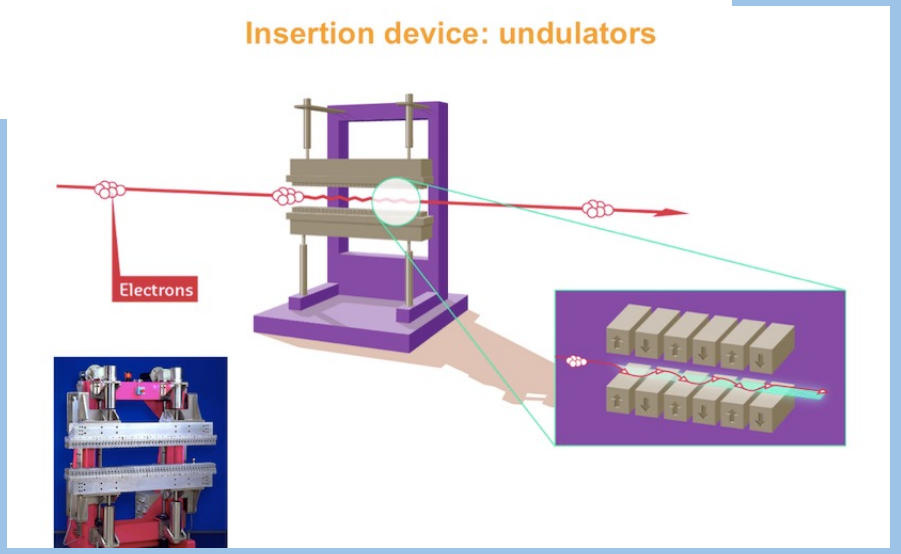


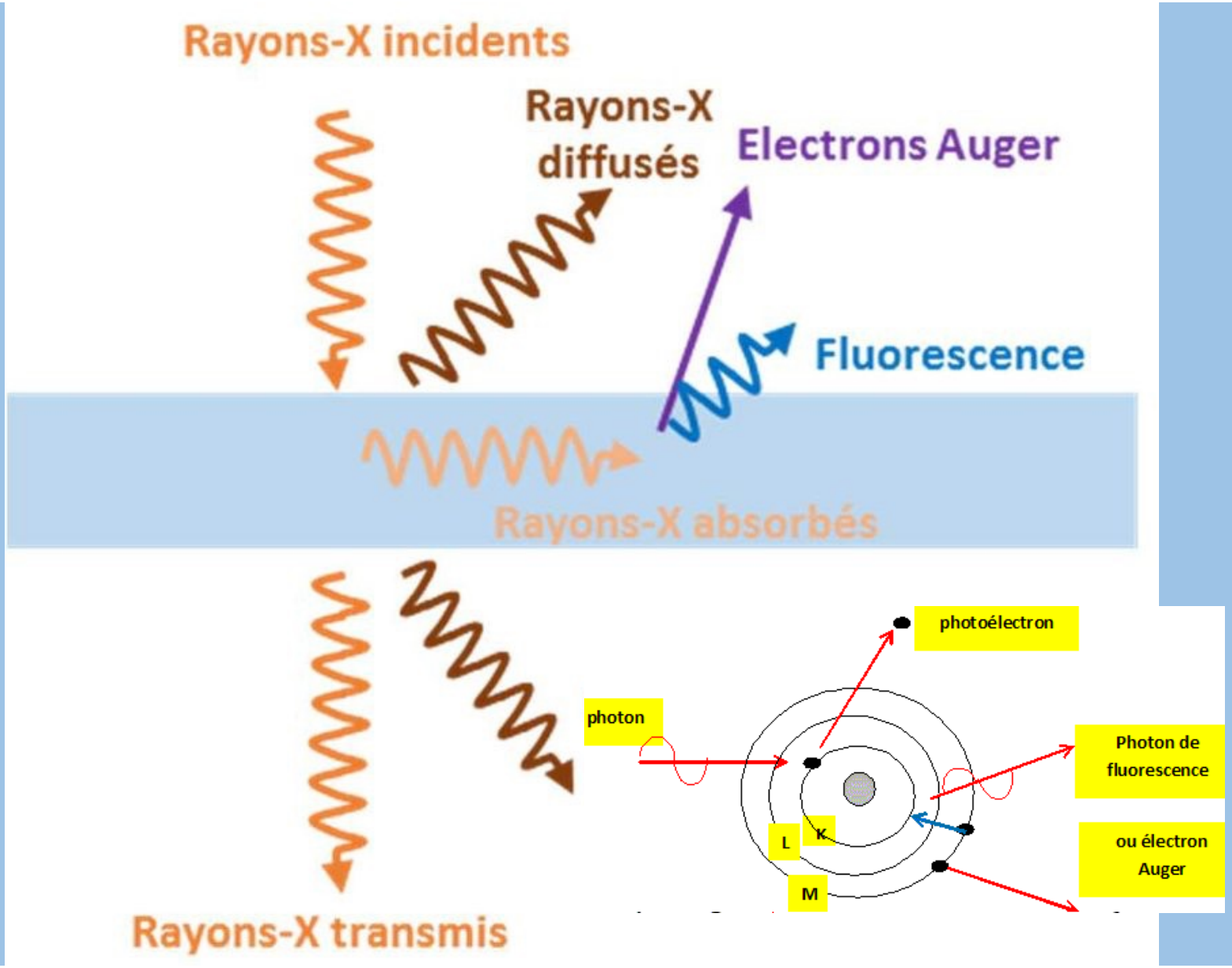


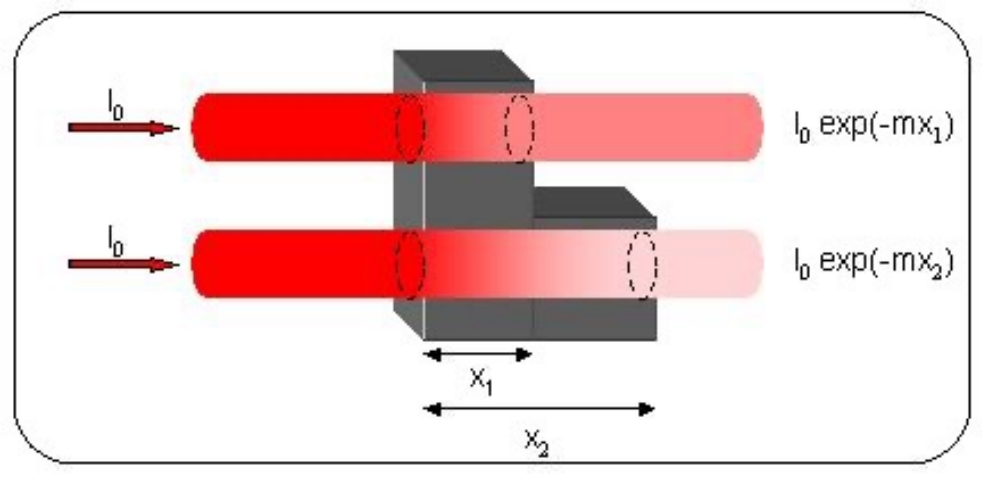


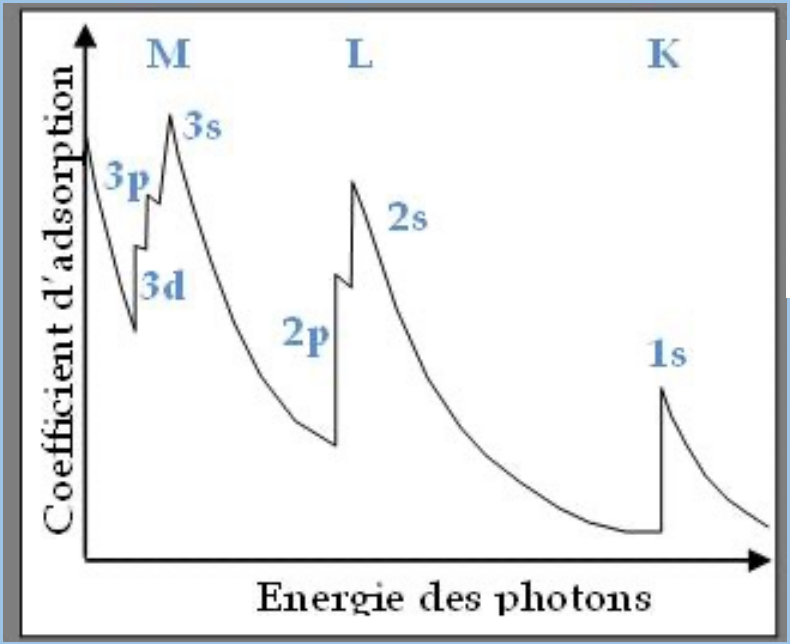
LINAC : 200 MeV

Microscopie et Imagerie :
Jusqu'à 10s nm




Rayons-X incidents
Rayons-X diffusés
Electrons Auger
Fluorescence
Rayons-X absorbés
Rayons-X transmis
photoélectron
photon
Photon de fluorescence
ou électron Auger
L
K
M





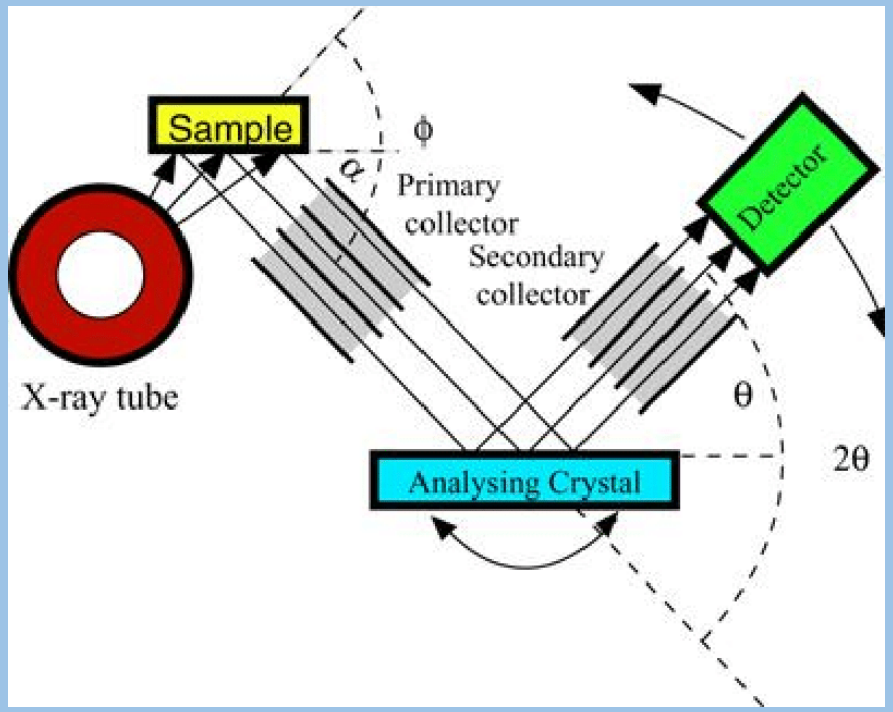
$$\frac{\mu}{\rho} = C.Z^{3/2}.\lambda^3$$

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$



$$\frac{\mu}{\rho} = C.Z^{3/2}.\lambda^3$$

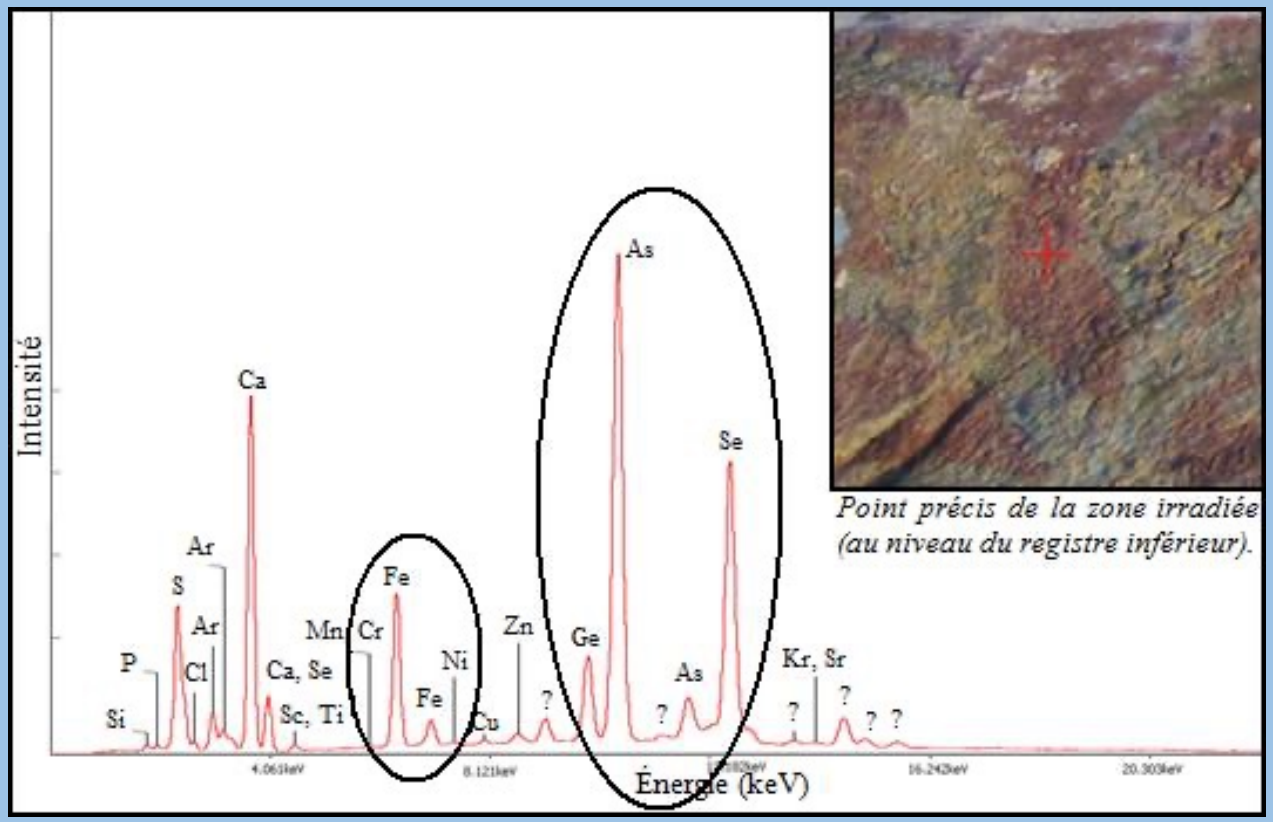
Fluorescence X



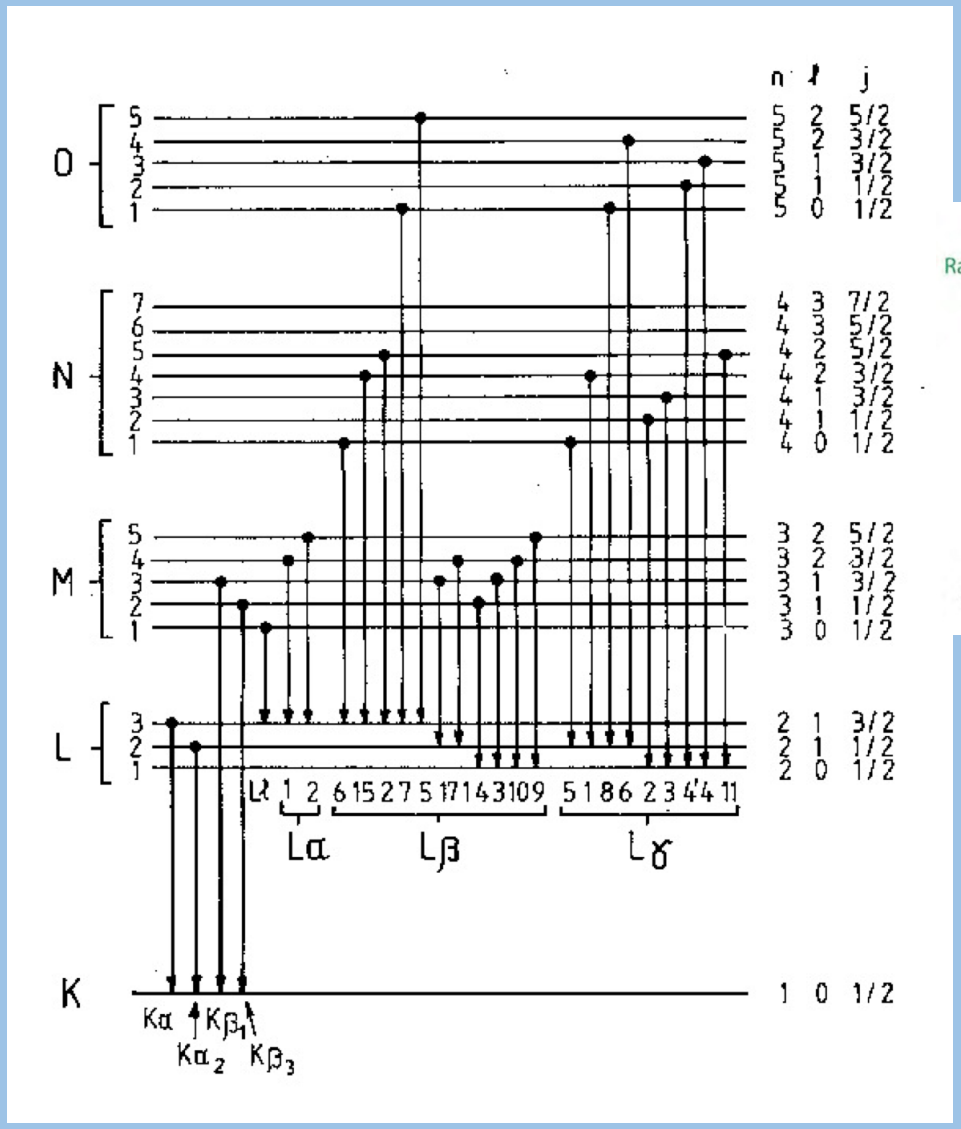
Cristal analyseur = diffracteur

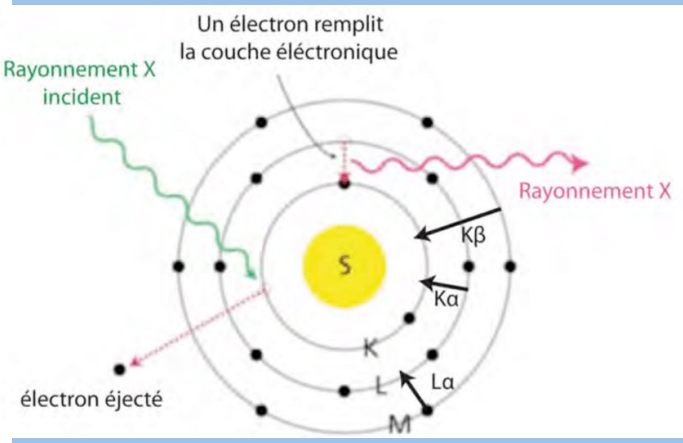
$$n\lambda = 2\,d\sin\theta$$

λ : longueur d'onde de la source
d : espacement entre 2 plans parallèles du cristal
θ : angle entre le faisceau incident et le réseau de plan



Point précis de la zone irradiée (au niveau du registre inférieur).





$$\Delta l = \pm 1$$

$$\Delta j = 0, \pm 1$$

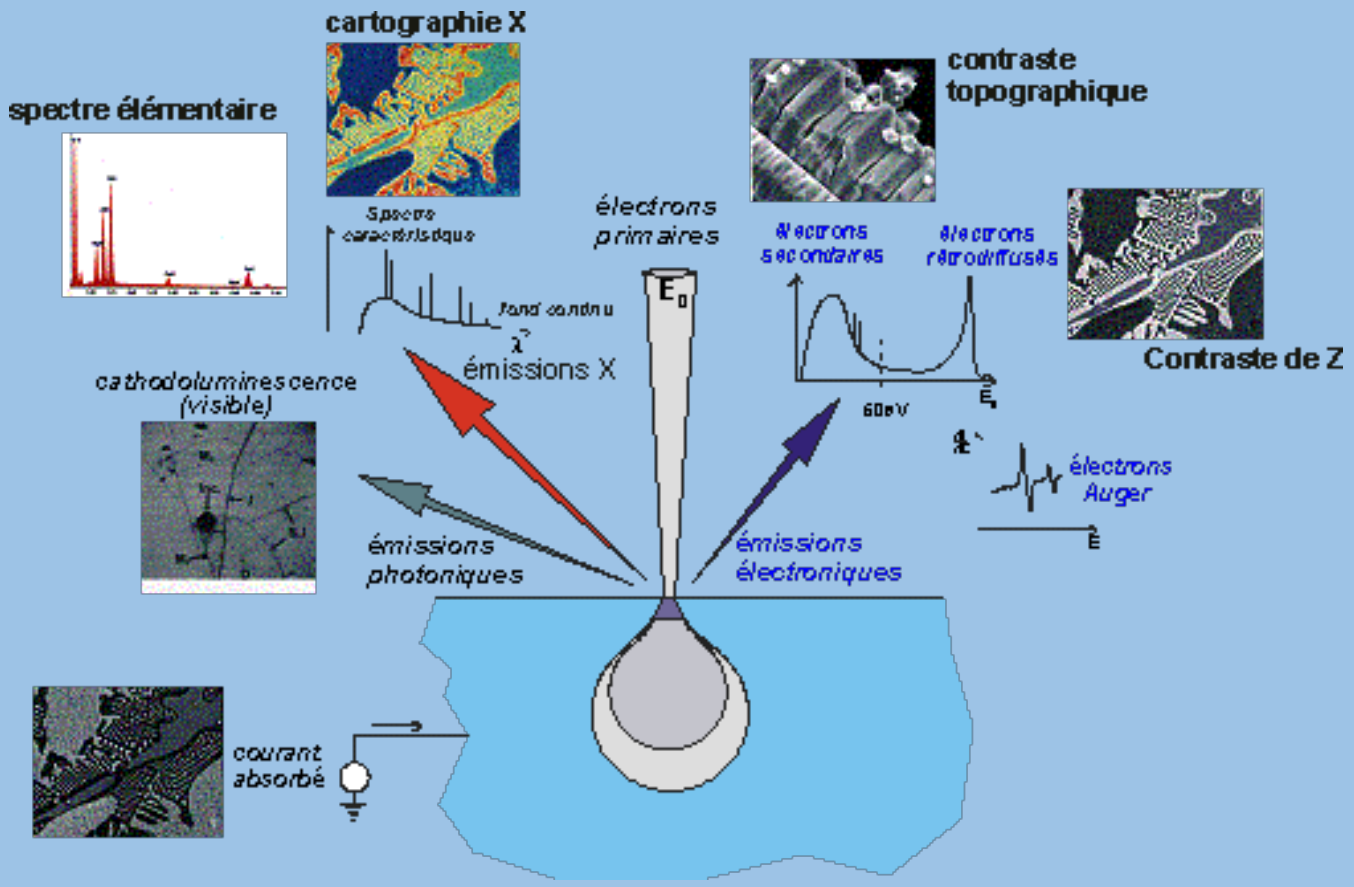
Table 1-1. *Electron binding energies (continued).*

Element	K 1s	L_1 2s	L_2 $2p_{1/2}$	L_3 $2p_{3/2}$	M_1 3s	M_2 $3p_{1/2}$	M_3 $3p_{3/2}$	M_4 $3d_{3/2}$	M_5 $3d_{5/2}$	N_1 4s	N_2 $4p_{1/2}$	N_3 $4p_{3/2}$
48 Cd	26711	4018	3727	3538	772.0†	652.6†	618.4†	411.9†	405.2†	109.8†	63.9†a	63.9†a
49 In	27940	4238	3938	3730	827.2†	703.2†	665.3†	451.4†	443.9†	122.9†	73.5†a	73.5†a
50 Sn	29200	4465	4156	3929	884.7†	756.5†	714.6†	493.2†	484.9†	137.1†	83.6†a	83.6†a
51 Sb	30491	4698	4380	4132	946†	812.7†	766.4†	537.5†	528.2†	153.2†	95.6†a	95.6†a
52 Te	31814	4939	4612	4341	1006†	870.8†	820.0†	583.4†	573.0†	169.4†	103.3†a	103.3†a
53 I	33169	5188	4852	4557	1072*	931*	875*	630.8	619.3	186*	123*	123*
54 Xe	34561	5453	5107	4786	1148.7*	1002.1*	940.6*	689.0*	676.4*	213.2*	146.7	145.5*
55 Cs	35985	5714	5359	5012	1211*b	1071*	1003*	740.5*	726.6*	232.3*	172.4*	161.3*
56 Ba	37441	5989	5624	5247	1293*b	1137*b	1063*b	795.7†	780.5*	253.5†	192	178.6†
57 La	38925	6266	5891	5483	1362*b	1209*b	1128*b	853*	836*	274.7*	205.8	196.0*
58 Ce	40443	6549	6164	5723	1436*b	1274*b	1187*b	902.4*	883.8*	291.0*	223.2	206.5*
59 Pr	41991	6835	6440	5964	1511	1337	1242	948.3*	928.8*	304.5	236.3	217.6
60 Nd	43569	7126	6722	6208	1575	1403	1297	1003.3*	980.4*	319.2*	243.3	224.6
61 Pm	45184	7428	7013	6459	—	1471	1357	1052	1027	—	242	242
62 Sm	46834	7737	7312	6716	1723	1541	1420	1110.9*	1083.4*	347.2*	265.6	247.4
63 Eu	48519	8052	7617	6977	1800	1614	1481	1158.6*	1127.5*	360	284	257
64 Gd	50239	8376	7930	7243	1881	1688	1544	1221.9*	1189.6*	378.6*	286	271
65 Tb	51996	8708	8252	7514	1968	1768	1611	1276.9*	1241.1*	396.0*	322.4*	284.1*
66 Dy	53789	9046	8581	7790	2047	1842	1676	1333	1292.6*	414.2*	333.5*	293.2*
67 Ho	55618	9394	8918	8071	2128	1923	1741	1392	1351	432.4*	343.5	308.2*
68 Er	57486	9751	9264	8358	2207	2006	1812	1453	1409	449.8*	366.2	320.2*
69 Tm	59390	10116	9617	8648	2307	2090	1885	1515	1468	470.9*	385.9*	332.6*
70 Yb	61332	10486	9978	8944	2398	2173	1950	1576	1528	480.5*	388.7*	339.7*

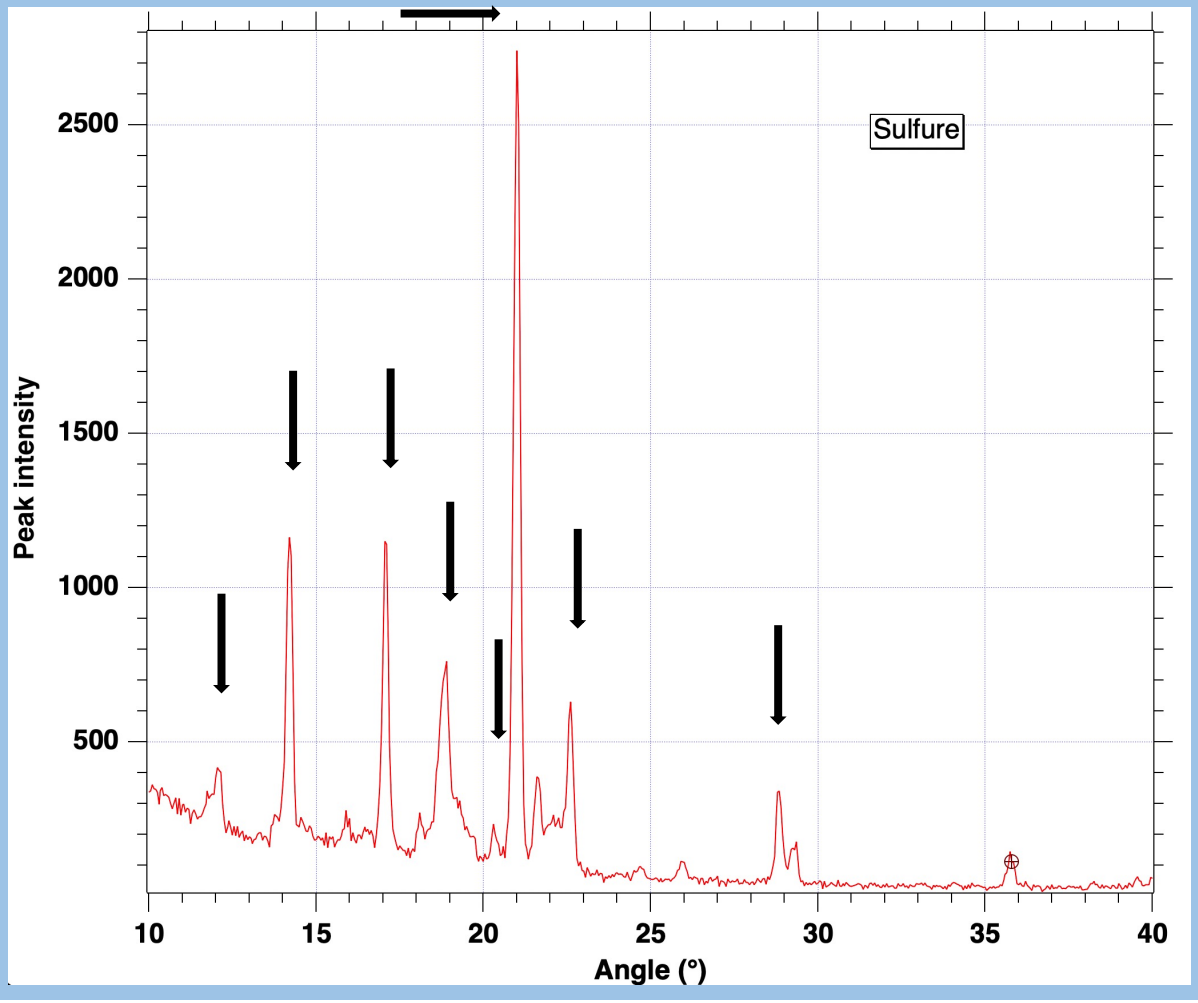
Table 1-2. *Energies of x-ray emission lines (continued).*

Element	Kα_1	Kα_2	Kβ_1	Lα_1	Lα_2	Lβ_1	Lβ_2	Lγ_1	Mα_1
22 Ti	4,510.84	4,504.86	4,931.81	452.2	452.2	458.4			
23 V	4,952.20	4,944.64	5,427.29	511.3	511.3	519.2			
24 Cr	5,414.72	5,405.509	5,946.71	572.8	572.8	582.8			
25 Mn	5,898.75	5,887.65	6,490.45	637.4	637.4	648.8			
26 Fe	6,403.84	6,390.84	7,057.98	705.0	705.0	718.5			
27 Co	6,930.32	6,915.30	7,649.43	776.2	776.2	791.4			
28 Ni	7,478.15	7,460.89	8,264.66	851.5	851.5	868.8			
29 Cu	8,047.78	8,027.83	8,905.29	929.7	929.7	949.8			
30 Zn	8,638.86	8,615.78	9,572.0	1,011.7	1,011.7	1,034.7			
31 Ga	9,251.74	9,224.82	10,264.2	1,097.92	1,097.92	1,124.8			
32 Ge	9,886.42	9,855.32	10,982.1	1,188.00	1,188.00	1,218.5			
33 As	10,543.72	10,507.99	11,726.2	1,282.0	1,282.0	1,317.0			
34 Se	11,222.4	11,181.4	12,495.9	1,379.10	1,379.10	1,419.23			
35 Br	11,924.2	11,877.6	13,291.4	1,480.43	1,480.43	1,525.90			
36 Kr	12,649	12,598	14,112	1,586.0	1,586.0	1,636.6			
37 Rb	13,395.3	13,335.8	14,961.3	1,694.13	1,692.56	1,752.17			
38 Sr	14,165	14,097.9	15,835.7	1,806.56	1,804.74	1,871.72			
39 Y	14,958.4	14,882.9	16,737.8	1,922.56	1,920.47	1,995.84			
40 Zr	15,775.1	15,690.9	17,667.8	2,042.36	2,039.9	2,124.4	2,219.4	2,302.7	

Microscopie Electronique à Balayage: The Swiss Army knife



Activité 1 : détermination de la composition d'un sulfure



$2d\sin\theta=\lambda$

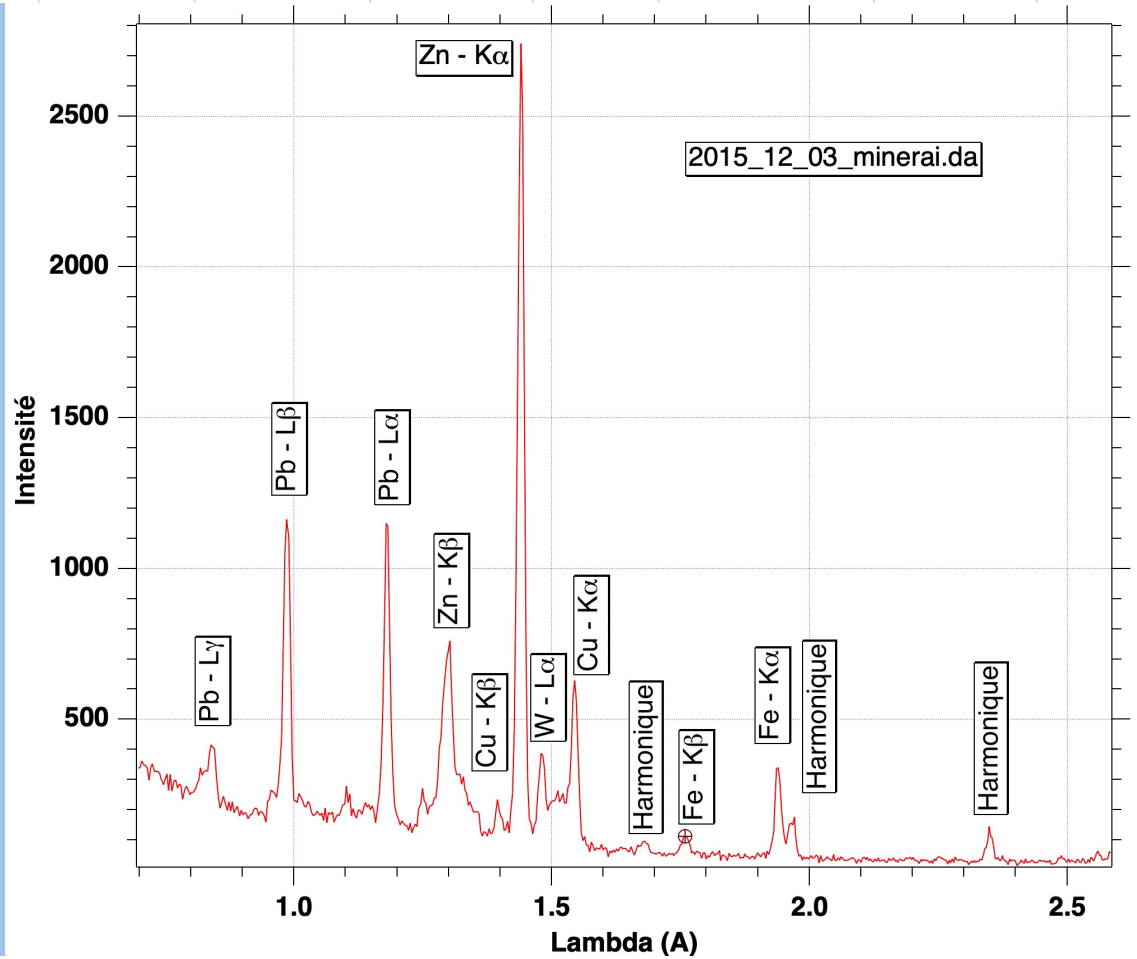
Cristal diffracteur : d=2.01 A (LiF)

theta(°)
12.05
14.2
17.05
18.9
21
21.6
22.6
28.85
29.3

h=6.62607015 E-34
c=299792458 m/s
e=1.602176634 E-19

E=hc/lambda

theta(°)	lambda	Energie (J)	Energie (eV)	Table	Mesure-Théorie	%	Raie
12.05	0.839235999	2.36697E-15	14775.08936	14764.4	10.68936055	0.07234718	Pb L-alpha
14.2	0.986135538	2.01437E-15	12574.12028	12618.15	-44.02971673	0.350161409	Pb L-beta
17.05	1.178688448	1.6853E-15	10519.98677	10500.5	19.4867666	0.185235657	Pb L-gamma
18.9	1.302147822	1.52551E-15	9522.564689	9572	-49.43531124	0.519138623	ZnK-beta
21	1.440638939	1.37886E-15	8607.144049	8627.32	-20.17595071	0.234409353	Zn K-alpha
21.6	1.479860479	1.34232E-15	8379.024275	8905.3	-526.2757252	6.280871232	Cu - K-beta
22.6	1.544866965	1.28584E-15	8026.443152	8037	-10.55684814	0.131525857	Cu - K-alpha
28.85	1.939722933	1.02409E-15	6392.55569	6397.34	-4.784309587	0.074841891	Fe - K-alpha
29.3	1.7591	1.12924E-15	7048.938021	7057.98	-9.041978518	0.128274337	Fe - K-beta



Activité 2 : l'expérience de Lavoisier

https://laurentgry-sciences.fr/tp/tplavoisier.pdf

J'ai pris un matras (vase) de 36 pouces cubiques environ de capacité dont le col était très long. Je l'ai courbé de manière qu'il pût être placé dans un fourneau, tandis que l'extrémité de son col irait s'engager sous la cloche, placée dans un bain de mercure. J'ai introduit dans ce matras quatre onces de mercure très pur. [Puis] le mercure fût échauffé presqu'au degré nécessaire pour le faire bouillir.

Le second jour, j'ai commencé à voir nager sur la surface du mercure de petites parcelles rouges*, qui, pendant quatre ou cinq jours ont augmenté en nombre et en volume ; après quoi elles ont cessé de grossir et sont restées absolument dans le même état. Au bout de douze jours, [...] la calcination du mercure ne faisait plus aucun progrès [...].

Le volume de l'air contenu tant dans le matras que dans son col et sous la partie vide de la cloche, réduit à une pression de 28 pouces et à 10 degrés du thermomètre, était avant l'opération de 50 pouces cubiques environ.

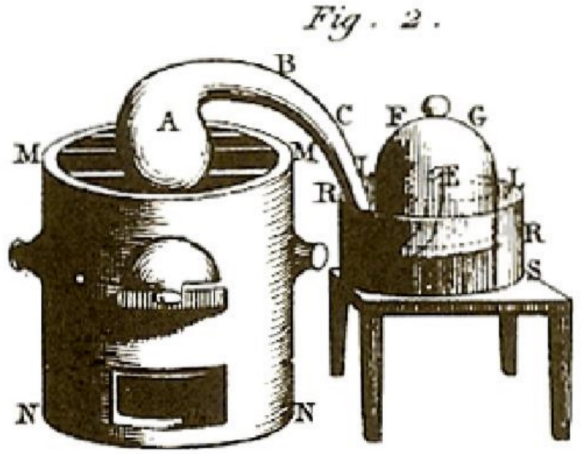
Lorsque l'opération a été finie, ce même volume à pression et à température égales, ne s'est plus trouvé que de 42 à 43 pouces : il y avait eu par conséquent une diminution de volume d'un sixième environ.

** Il se produit dans le matras une transformation chimique au cours de laquelle le dioxygène réagit avec le mercure pour former de l'oxyde de mercure HgO, rouge.*

Antoine de Lavoisier

Traité élémentaire de chimie, 1789.





Extrait 1 : « J'ai pris, planche II, figure 14, un matras A de 36 pouces cubiques environ de capacité, dont le col BCDE était très long, & avait six à sept lignes de grosseur intérieurement. Je l'ai courbé, comme on le voit représenté, planche IV, figure 2, de manière qu'il pût être placé dans un fourneau MMNN, tandis que l'extrémité E de son col irait s'engager sous la cloche FG, placée dans un bain de mercure RRSS »

Extrait 2 : « J'ai introduit dans ce matras quatre onces de mercure très pur, puis en suçant avec un siphon que j'ai introduit sous la cloche FG, j'ai élevé le mercure jusqu'en LL : j'ai marqué soigneusement cette hauteur avec une bande de papier collé, & j'ai observé exactement le baromètre & le thermomètre »

Extrait 3 : « Les choses ainsi préparées, j'ai allumé du feu dans le fourneau MMNN, & je l'ai entretenu presque continuellement pendant douze jours, de manière que le mercure fut échauffé presqu'au degré nécessaire pour le faire bouillir »

Extrait 4 : « Il ne s'est rien passé de remarquable pendant tout le premier jour : le mercure quoique non bouillant, était dans un état d'évaporation continuelle […] Le second jour, j'ai commencé à voir nager sur la surface du mercure de petites parcelles rouges, qui, pendant quatre ou cinq jours ont augmenté en nombre & en volume ; après quoi elles ont cessé de grossir & sont restées absolument dans le même état. Au bout de douze jours voyant que la calcination du mercure ne faisait plus aucun progrès, j'ai éteint le feu & j'ai laissé refroidir les vaisseaux »

Extrait 5 : « Le volume de l'air contenu tant dans le matras que dans son col & sous la partie vide de la cloche, réduit à une pression de 28 pouces & à 10 degrés du thermomètre, était avant l'opération de 50 pouces cubiques environ. Lorsque l'opération a été finie, ce même volume à pression & à température égales, ne s'est plus trouvé que de 42 à 43 pouces : il y avait eu par conséquent une diminution de volume d'un sixième environ. D'un autre côté ayant rassemblé soigneusement les parcelles rouges qui s'étaient formées, & les ayant séparées autant qu'il était possible du mercure coulant dont elles étaient baignées, leur poids s'est trouvé de 45 grains. »

Extrait 6 : « L'air qui restait après cette opération & qui avait été réduit au cinq sixièmes de son volume, par la calcination du mercure, n'était plus propre à la respiration ni à la combustion ; car les animaux qu'on y introduisait y périssaient en peu d'instants, & les lumières s'y éteignaient sur le champ, comme si on les eût plongées dans de l'eau. »

Extrait 7 : « D'un autre côté, j'ai pris les 45 grains de matière rouge qui s'était formée pendant l'opération ; je les ai introduits dans une très petite cornue de verre à laquelle était adapté un appareil propre à recevoir les produits liquides & aériformes qui pourraient se séparer : ayant allumé du feu dans le fourneau, j'ai observé qu'à mesure que la matière rouge était échauffée sa couleur augmentait d'intensité. Lorsqu'ensuite la cornue a approché de l'incandescence, la matière rouge a commencé à perdre peu à peu de son volume, & en quelques minutes elle a entièrement disparu ; en même temps il s'est condensé dans le petit récipient 41 grains ½ de mercure coulant, & il a passé sous la cloche 7 à

Extrait 8 : « Ayant fait passer une portion de cet air dans un tube de verre d'un pouce de diamètre & y ayant plongé une bougie, elle y répandait un éclat éblouissant ; le carbone au lieu de s'y consommer paisiblement comme dans l'air ordinaire, y brûlait avec flamme & une sorte de crépitation, à la manière du phosphore, & avec une vivacité de lumière que les yeux avoient peine à supporter »

Extrait 9 : « Cet air que nous avons découvert presque en même temps, M. Priestley, M. Schéele & moi, a été nommé par le premier, air déphlogistiqué ; par le second, air empiréal. Je lui avais d'abord donné le nom d'air éminemment respirable : depuis, on lui a substitué celui d'air vital. Nous verrons bientôt ce qu'on doit penser de ces dénominations »

Extrait 10 : « En réfléchissant sur les circonstances de cette expérience, on voit que le mercure en se calcinant absorbe la partie salubre & respirable de l'air, ou, pour parler d'une manière plus rigoureuse, la base de cette partie respirable ; que la portion de l'air qui reste est une espèce de mofète, incapable d'entretenir la combustion & la respiration : l'air de l'atmosphère est donc composé de deux fluides élastiques de nature différente & pour ainsi dire opposée »

Questions & Réponses

QUESTIONS :

Q1 - A partir de l'extrait 5, déterminer la température à laquelle Lavoisier a conduit sa première expérience

Rep: 10°C – température de la salle de laboratoire (il ne faisait pas chaud chez les Lavoisier)

Q2 - Dans quel état se trouve le mercure à cette température ?

Rep: Le mercure est liquide dans les CNTP.

Q3 - Déduire de l'extrait 1 une estimation en cm3 du volume de la cornue (matras) employée par Lavoisier ainsi que du diamètre du ballon à col, à partir duquel elle avait été conçue.

Rep :) Le matras utilisé pour fabriquer la cornue avait un volume de 36 pouces cubiques et un pouce cubique correspond à 19,8 $cm3$. 19,8 x 36 =712,8 $cm3$ ce qui fait à peu près 0,7 L. Diamètre du col, il est fait mention dans l'extrait 1 d'une grosseur de 6 à 7 lignes (comprendre grosseur = diamètre). Ainsi, sachant qu'une ligne correspond à 0,2 cm, cela fait un diamètre de 6 à 7 x 0,2= 1,2 à 1,4 cm.

Q4 - Déduire de l'extrait 2 la masse de mercure introduite par Lavoisier dans la cornue 5) Dessiner sur le schéma ci-dessous les cristaux de mercure qui sont apparus au cours de la première expérience.

Rep : 4 onces de mercure dans le matras et une once correspond à 30,6 g. La masse de mercure introduite était donc de 4 x 30,6=122,4 g

Q5-Au bout de combien de jours les cristaux de mercure ont-ils cessé de s'accroitre ? 5jours

Q6-A quelle température environ a été chauffé le mercure de la cornue pendant les douze jours de la première expérience ? 357°C

Q7- A quoi a servi le mercure dans la cuve ? A-t-il-joué le même rôle que le mercure dans la cornue ? Il isole l'air, permet de mesurer la pression. Il n'a pas le même rôle (ne s'oxyde pas).

Q8-Pourquoi le niveau de mercure dans la cloche n'était-il pas le même que le niveau de mercure dans la cuve ? L'air a été siphoné dans la cloche pour mettre le mercure au niveau LL (pour faciliter les lectures de volume)

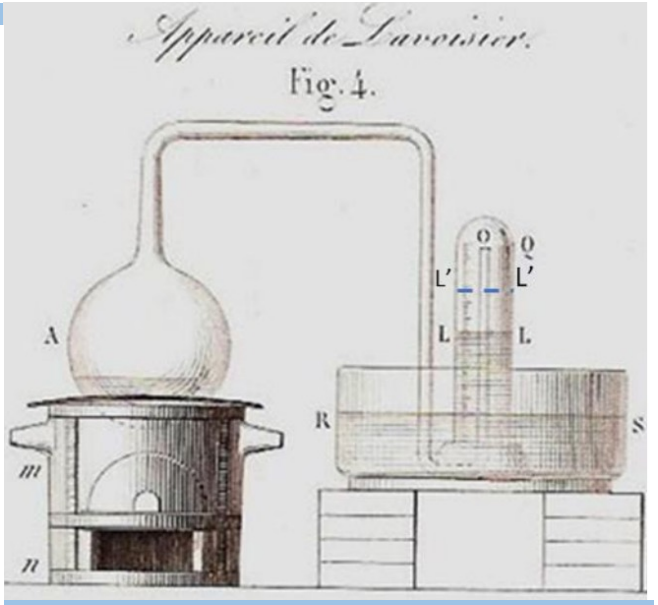
Q9 –Représenter sur le dessin le niveau de mercure tel qu'il était 12 jours plus tard par une paire de lettres L L'. Le volume de gaz emprisonné dans la cloche avait-il-augmenté ou diminué entre le début et la fin de l'expérience ? Diminué

Q10 - Quel nom donna Lavoisier à l'air résiduel de la cloche en fin de première expérience ? 16) Azote (a-zote = air privé de vie).

Q11-Déduire de l'extrait 5, la proportion de cet air résiduel par rapport à l'air initial et comparer avec ce que vous savez de la composition de l'air aujourd'hui.
Extrait 5 : diminution de l'air sous la cloche, mesurée entre les repères LL et L'L' a été 50 – 42 à 43 soit 7 à 8 pouces cubiques pour 50 pouces cubiques d'air contenu dans le dispositif (cornue + cloche), soit 14 à 16%, donc 84 à 86 % d'azote. Valeur réelle 78%.

Q12-En lisant l'extrait 7, expliquez les observations faites par Lavoisier sur le gaz obtenu en chauffant les cristaux de mercure obtenus dans l'étape précédente après les avoir séparés du mercure restant. Dégradation de l'oxyde de mercure qui relâche O2.

Q13-Comment Lavoisier a-t-il-nommé le gaz issu de la transformation des cristaux de mercure par chauffage à très haute température ? Qui avait expérimenté ce fait avant lui ? Oxygène, car oxydait les métaux comme un acide.



Q15-Quels sont les deux fluides élastiques dont parle Lavoisier dans l'extrait 10 et dans quelles proportions en volume se trouvent-ils dans l'air ?

Les deux fluides élastiques dont parle Lavoisier sont l'azote et l'oxygène en proportions respectives de 78 % et 21 %

Q16-Résumez en termes modernes par des équations chimiques en les complétant et en les équilibrant les transformations chimiques à l'œuvre dans les deux expériences

Première expérience : à la température d'ébullition du mercure soit : Hg + ½ $O2$ → HgO

Deuxième expérience : à une température bien plus élevée HgO → Hg + ½ O2

Fin du cours sur le Tableau Périodique
des Eléments Chimiques