

Filières énergétique et médicale

UE 4TSN902U

Master 2 Professionnel spécialité Instrumentation nucléaire

M. AICHE

e-mail: aiche@cenbg.in2p3.fr

mourad.aiche@u-Bordeaux.fr

Septembre 2021

1

Présentation de l'UE Filières énergétique et médicale

4TSN902U

Responsable d'UE: M. Aïche

En quelques chiffres ...

- 12 Crédits ECTS
- 100 heures d'enseignement en présentiel
- 250 heures de temps de travail personnel
- 8 intervenants (4 industriels, 4 E-C)

Objectif principal

Comprendre les enjeux du nucléaire et ses applications (radioprotection et mesures nucléaires) dans deux secteurs clés que sont la production d'énergie et le médical.

Connaissances mobilisables

- Saisir, les spécificités et les complémentarités des approches en radioprotection, interaction rayonnement-matière (y compris rayonnement-vivant)
- Être capable d'aborder les différentes problématiques avec le recul de la démarche ingénieur
- se donner les moyens d'être force de proposition dans l'entreprise dans des contextes variés
- Savoir simuler (Monte Carlo, MCNP, ...)
- En sûreté : cycle électronucléaire, déchets, protection des personnels, démantèlement
- Être capable de comprendre les attentes et contraintes d'un appel d'offres et d'y répondre 2

Présentation de l'UE Filières énergétique et médicale

4TSN902U

Resp: M. AICHE

Intitulé	Enseignant	Organisme	
Bio-Physique. Effets bio. des rayts. Ionisants sur le vivant	M. ANTOINE	Physicien Médical, Bergonié	S37
Physique des réacteurs: généralités, rappels sur la Fission et la neutronique	M. AICHE	Univ Bx / CENBG	S35
Simulation numérique MCNP-3D	S. BOYER	CEA-CESTA	S40
Radiothérapie – Physique médicale PEF: Visite Inst. Bergonié date ?	J. CARON	Physicien Médical, PCR, Bergonié	S36
Médecine nucléaire Imagerie méd. R _x et γ Visite (M1&M2) Haut-Lévêque 13/12/2021 - Heure 15:30-18:30	E. HINDIE	Univ Bx/CHU Haut-Lévêque	S38
Instrumentation nucléaire dédiée à la production d'électricité	V. NENERT	Dir. Projet, INGEROP	S01
Démantèlement Nucléaire	T. COMIN	PCR, ONET technologies	S04
Protection des personnels	L. MASSON	Ing/gérant, PROGRAY	S38

3

Planning des cours

S35	S36	S38	S38	S40	S42	S47
Ven 03/09 14h00-17h00	Lun 06/09 09h00-12h30	Mer 22/09 14h00-17h30	Jeu 23/09 14h00-17h30	Mer 06/10 09h30-13h00	Lun 18/10 09h00-12h30	Lun 22/11 10h30-12h30
C1	C2	C3	C4	C5	C6	Exam

Contrôle : 1 Examen final (2 heures)

Support du cours

Documents en téléchargement à l'adresse url :

<https://www.cenbg.in2p3.fr/ftp/hshd/M2pro>

4

MASTER SCIENCES, TECHNOLOGIES, SANTÉ

Mention Physique, spécialité Instrumentation

FILIÈRES ÉNERGÉTIQUES ET INSTRUMENTATION MÉDICALE 1

4TSN902U

M2	Semestre d'automne	12 ECTS
----	--------------------	---------

OBJECTIFS

Permettre aux étudiants de comprendre les applications et les enjeux du Nucléaire dans deux secteurs d'application : la production d'énergie et le médical.

PRÉREQUIS RECOMMANDÉS

UE de Physique Nucléaire de L3 Physique (S5) ou Sciences de la Matière (S6)

PROGRAMME

Filières énergétiques

Physique des réacteurs et cycle électronucléaire

Rappels sur la fission et la neutronique, Réacteurs à Eau Pressurisée (REP), Autres réacteurs, EPR enjeux pour l'avenir.

Présentation générale du cycle électronucléaire (des mines aux déchets)

La sûreté et la protection des personnels : principes de base dans le secteur nucléaire

Organismes de sûreté et de contrôle (ASN, IRSN, DRIRE...).

Instrumentation médicale

Interaction rayonnement vivant : Ions, photons, électrons, balistique et dosimétrie

Effets biologiques des rayonnements ionisants : effets directs et indirects, survie cellulaire, dose, efficacité biologique relative, section efficace d'inactivation cellulaire.

Quelques thèmes d'intérêt en radiobiologie moderne : effets de proximité, communication intercellulaire, réponse adaptative, études en microfaisceau

Radiothérapie : Fractionnement, étalement, plan de traitement, radiorésistance, pharmaco-modulation.

Dosimétrie patient

Hadron et proton thérapie.

Les méthodes d'exploration et la médecine nucléaire : Radiologie, scanner X, Imagerie fonctionnelle et métabolique, Scintigraphie, Radiologie interventionnelle.

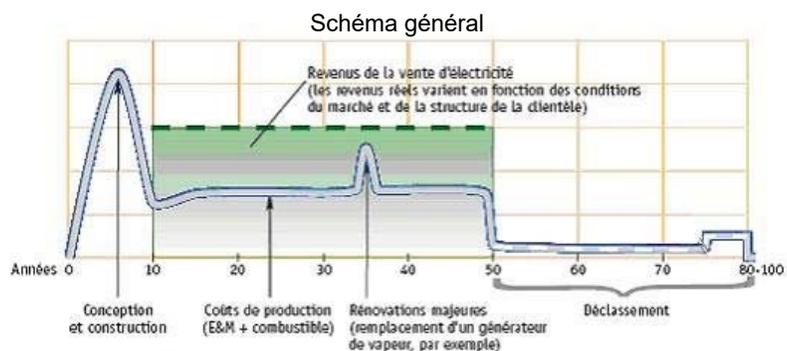
COMPÉTENCES ACQUISES

Connaitre les différentes étapes du cycle électronucléaire. Comprendre les effets biologiques des rayonnements ionisants. Applications dans le milieu médical : imagerie, radiothérapie.

5

Préambule

Vie d'une centrale nucléaire

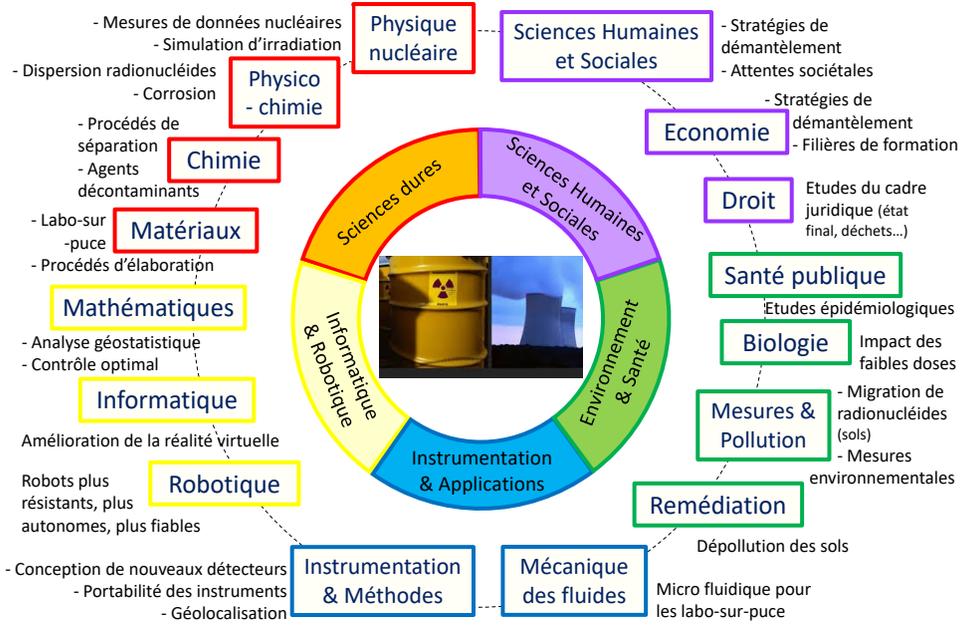


- Fort investissement à partir du point 0
- Accompagner l'évolution de la législation en vigueur et les exigences de sûreté
- Fort investissement durant la déconstruction

6

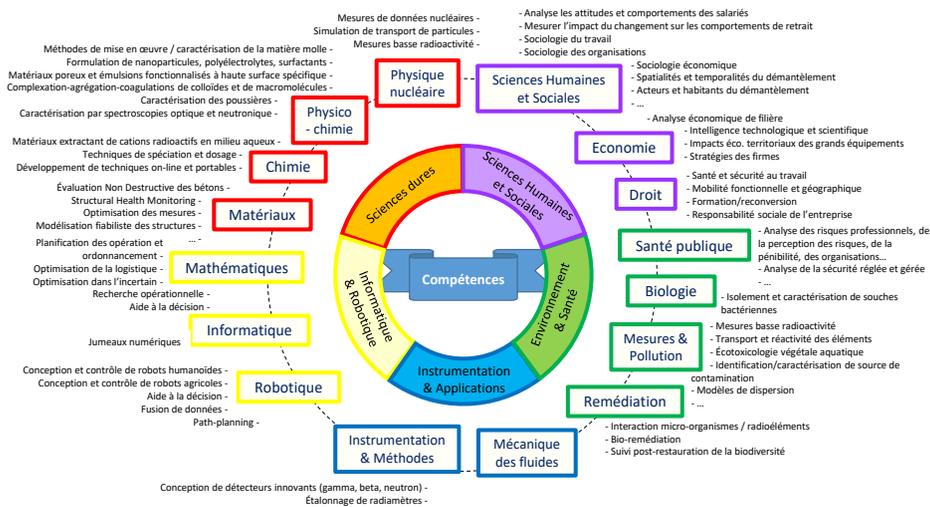
Préambule

La R&D au cœur du nucléaire énergétique



Préambule

Exemple de Carte des compétences en lien avec la déconstruction



Objectifs de l'unité d'enseignement

Sensibiliser aux enjeux du nucléaire énergétique et à ses applications dans le secteur de la production d'énergie.

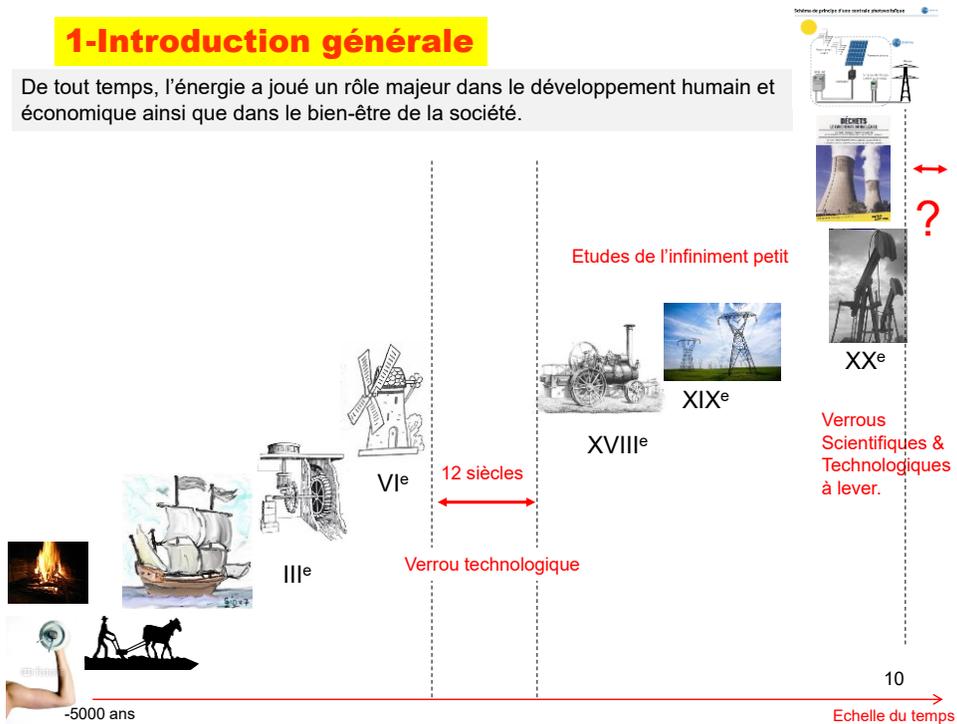
Pour atteindre ces objectifs :

- ❑ de bonnes connaissances en physique nucléaire
 - ⇒ Aspects (théorique) fondamentaux
- ❑ introduction à la physique des réacteurs
 - ⇒ neutronique du cœur
- ❑ introduction aux réacteurs nucléaires
 - ⇒ amont du cycle, conception et fonctionnement
- ❑ Aval du cycle
 - ⇒ gestion des déchets radioactifs

9

1-Introduction générale

De tout temps, l'énergie a joué un rôle majeur dans le développement humain et économique ainsi que dans le bien-être de la société.



1-Introduction générale

1.1 Bref historique : de la physique nucléaire à l'énergie nucléaire



1932 Découverte du neutron (J. Chadwick)



11



1956 Première pile nucléaire (G-G) Calder Hall sur le site Windscale, à Cambria en grande Bretagne (production du Pu militaire)



1957 Création de OIEA (AIEA), AEN-OCDE



1957 Premier accident nucléaire à Windscale classé de niveau 5, le plus haut niveau étant 7, de l'échelle internationale des événements nucléaires INES, en Grande Bretagne.

1963 EDF produit ses premiers watts d'électricité d'origine nucléaire. C'est le « tout nucléaire français »

1967 Mise en service de l'usine de La Hague, en Normandie. Elle assure le traitement des combustibles nucléaires usés en provenance des réacteurs.

1974 La société Westinghouse cède sa licence de constructeur des REP à FRAMATOME

1979 Accident nucléaire à Three Mile Island, aux États-Unis. Cet accident est classé au niveau 5.

1986 Accident gravissime de niveau 7 (sur l'échelle INES) dans la centrale nucléaire de Tchernobyl en Ukraine.

1997 Début du premier démantèlement d'une centrale nucléaire française, celle de Brennilis. EDF estime que le démantèlement complet pourrait être achevé en 2032! et entraîner 1500 tonnes de déchets.

2004-> Construction d'un nouveau réacteur nucléaire EPR :
Olkiluoto (Finlande) , Flamanville (France), Taishan (Chine)

2011 Accident nucléaire de Fukushima, Japon. Cet accident est classé au niveau 7.

12

Au dernières nouvelles ...

Publié le 02/09/2021

Centrale nucléaire de Cruas-Meyssac - Réacteurs de 900 MWe - EDF

Contamination externe d'un intervenant conduisant au dépassement de la limite annuelle [...]

Le 27 août 2021, l'exploitant de la centrale nucléaire de Cruas a déclaré à l'Autorité de sûreté nucléaire un événement significatif relatif à la radioprotection concernant le dépassement, pour un salarié d'EDF, d'une limite de dose individuelle annuelle.

Publié le 01/09/2021

Détection tardive de l'indisponibilité d'une pompe du système d'alimentation de secours des GV

Le 27 août 2021, l'exploitant de la centrale nucléaire de Chooz a déclaré à l'ASN un événement significatif pour la sûreté relatif à la détection tardive de l'indisponibilité d'une pompe du système d'alimentation de secours des générateurs de vapeur (ASG) du réacteur 2.

Publié le 26/08/2021

Sortie du domaine de fonctionnement autorisé du réacteur 2 de la centrale nucléaire de Civaux

Le 27 août 2021, EDF a déclaré à l'ASN un événement significatif pour la sûreté relatif à la sortie du domaine de fonctionnement autorisé par les règles générales d'exploitation du réacteur 1 à la suite de l'ouverture de deux soupapes de sécurité.

Publié le 24/08/2021

Centrale nucléaire de Paluel - Réacteurs de 1300 MWe - EDF

Sortie du domaine de fonctionnement autorisé du réacteur 1 de Paluel

Le 20 août 2021, EDF a déclaré à l'ASN un événement significatif pour la sûreté relatif à la sortie du domaine de fonctionnement autorisé par les règles générales d'exploitation du réacteur 1 à la suite de l'ouverture de deux soupapes de sécurité.

Publié le 24/08/2021

Centrale nucléaire de Cattenom - Réacteurs de 1300 MWe - EDF

Contamination corporelle externe

Le 19 août 2021, l'exploitant de la centrale nucléaire de Cattenom a déclaré à l'Autorité de sûreté nucléaire un événement significatif relatif à la radioprotection concernant le dépassement du quart d'une limite de dose individuelle annuelle.

13

Au dernières nouvelles ...

Pour l'EPR de Flamanville, un démarrage fin 2022 toujours conditionné à des réparations

L'affaire des soudures défectueuses avait conduit EDF à annoncer en 2019 un nouveau retard d'au moins trois ans pour l'EPR. Si les réparations suivent le calendrier prévu, la mise en service interviendrait fin 2022.

Le Monde avec AFP -

Publié le 07 avril 2021 à 14h44 - Mis à jour le 07 avril 2021 à 15h12 - Lecture 1 min.



Le site du réacteur nucléaire pressurisé européen (EPR) de Flamanville (Manche), en juillet 2011. AFP/RENZO TRIBOUILLARD

Le Monde ACTUALITÉS - ÉCONOMIE - VIDÉOS - OPINIONS - CULTURE

Lire aussi Nucléaire : risques de nouveaux retards et de nouveaux surcoûts pour l'EPR de Flamanville

Dix ans de retard sur le calendrier initial

EDF a aussi signalé récemment à l'ASN un écart de conception concernant trois piquages du circuit primaire principal du réacteur EPR en construction. Le piquage correspond à la partie d'une tuyauterie qui la raccorde à une autre ou à un récipient. Les piquages en question sont situés sur le circuit primaire principal, qui contient l'eau permettant de refroidir le cœur du réacteur et de transférer l'énergie issue de la réaction nucléaire aux générateurs de vapeur.

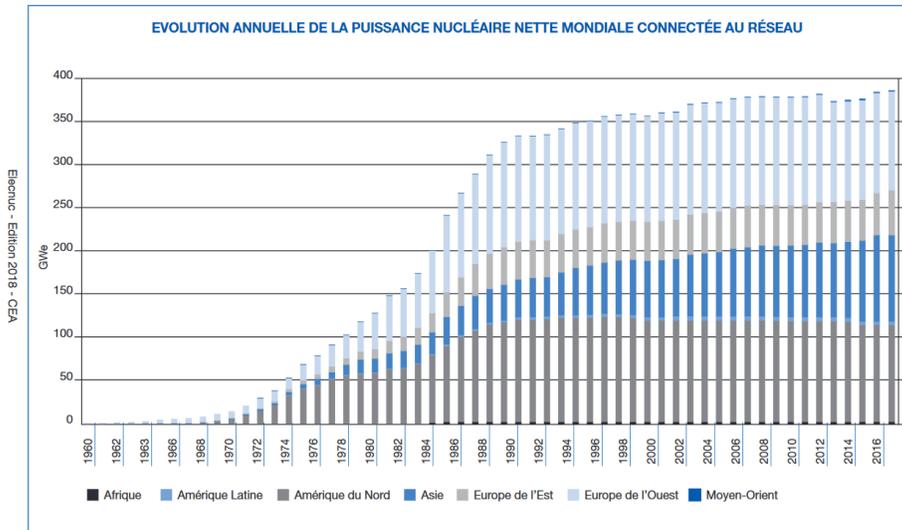
« Il faut trouver une solution pour renforcer la tuyauterie, le piquage, ou reprendre la soudure », a déclaré Bernard Doroszczuk. « Nous prendrons position au plus tard cet été », a-t-il dit. « On ne peut pas dire si la réparation, au vu de la stratégie qui sera présentée par EDF, permettra de rentrer dans le planning » de l'EPR, a-t-il prévenu.

La construction à Flamanville du premier réacteur français de troisième génération a multiplié les déboires. Il devrait démarrer fin 2022, soit avec a retard sur le calendrier initial. L'EPR était censé être connecté au réseau en 2012 et coûter En réalité, il devrait coûter, selon EDF, La Cour des comptes, elle, estime que la facture totale serait plutôt de 19,1 milliards d'euros.

14

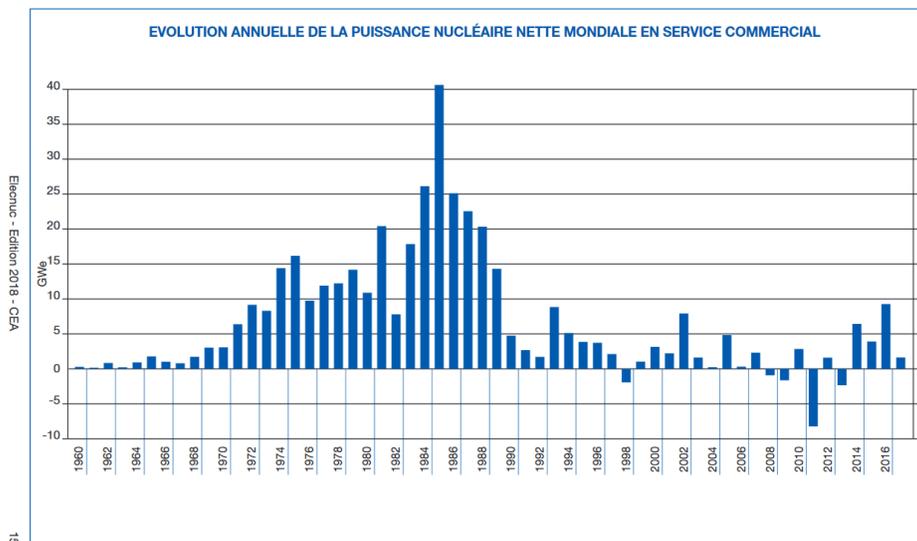
1.2 Evolution de la puissance installée (1954-2014)

Le recours à l'énergie nucléaire a connu une croissance extrêmement rapide sur 36 ans jusqu'à 1990, avec la construction de 448 réacteurs produisant un total de 391 GWe à travers le monde.

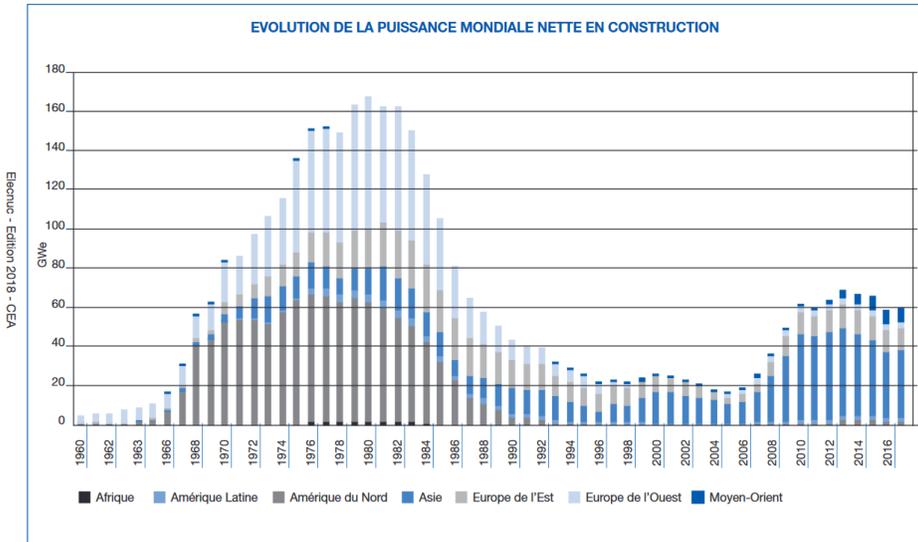


Source CEA

15

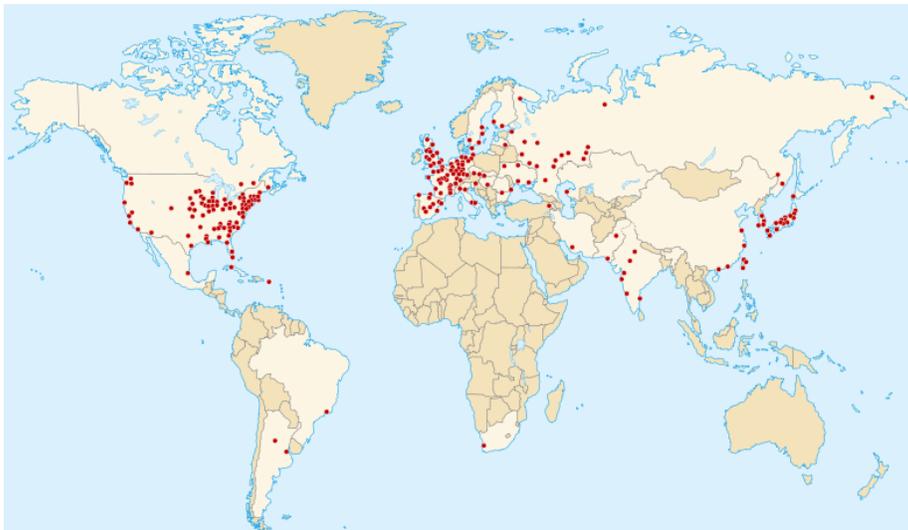


16



17

1.3 Répartition géographique des centrales dans le monde



18

1.4 Part du nucléaire dans la production d'électricité

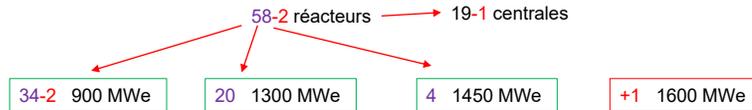
En 2016, le **parc nucléaire mondial** a généré 2 606 TWh, soit 10,4% de la production mondiale d'électricité. Le nucléaire est la 3^{ème} source de production d'électricité dans le monde.

Evolution du parc nucléaire

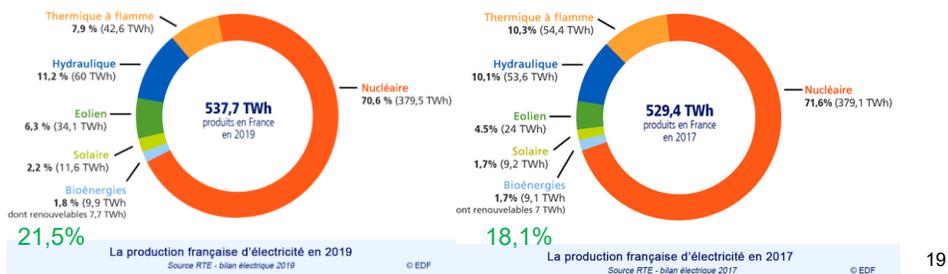
- Nucléaire passage à 50% d'ici 2035
- Renouvelable passage à 32% d'ici 2030
- Réacteurs en activité 56

Situation en France

Arrêt Fessenheim	2020
Déconstruction prévue	2025
2 réacteurs 900MW	



Parts dans la production d'électricité en France (2019 comparé à 2017)



Nucléaire -1,4% Hydraulique +10,1% Thermique à flamme -23,3% Energie solaire +29,4% Eolien +40% Bioénergies +5,9%

Petit exercice de calcul

- 1) Si les réacteurs nucléaires tournaient à plein régime toute l'année quelle sera l'énergie électrique produite en France par les 58 réacteurs en 2019 ?
- 2) Quel est le rendement moyen d'exploitation d'un réacteur du parc nucléaire français en 2019
- 3) Évaluer la puissance installée en 2 ans en France entre 2017 et 2019

34	900 MWe	20	1300 MWe	4	1450 MWe
----	---------	----	----------	---	----------

1) Puissance installée : 62,4 GW

$$\text{Energie disponible} : We = 62,4 \text{ GW} \times 365 \text{ j} \times 24 \text{ h} = 546,6 \text{ TWh}$$

$$2) \text{Rendement} = 379,5 / 546,6 = 69,4\%$$

$$3) P = (537,7 - 529,4) / (365 \cdot 24) = 947,5 \text{ MW}$$

Remarque

Un réacteur est arrêté pour :

- Une ASR (Arrêt pour Simple Chargement ~ 30 j tous les 12 à 18 mois)
- Une VP (Visite partielle) ~ 60j en alternance avec une ASR
- Une VD (Visite Décennale)

Question : Pourquoi EDF sous traite-t-elle la maintenance de ses centrales nucléaires ?

20

Une VD par exemple, nécessite l'intervention d'environ 1500 salariés



Qui sont les entreprises ?

Six grands groupes français réalisent 50 % du chiffre d'affaires de la maintenance sous-traitée dans les centrales nucléaires :

Alstom, Framatome, Suez, Vinci, Groupe Onet, Spie.

Des grandes entreprises étrangères comme Westinghouse et Siemens interviennent également sur le parc nucléaire au niveau national.

21

42 réacteurs de plus de 30 ans

PUISSANCE DE CHAQUE RÉACTEUR

RÉACTEURS
ACTIFS DEPUIS...

- ... plus de 30 ans
- ... 21 à 30 ans
- ... 10 à 20 ans
- EPR en construction



22

Solution préconisé par l'industriel (EDF)

Prolongation de la durée de vie des centrale de 20 ans : « le grand carénage »

Coût estimé (EDF) : 50 Md€ (plan jusqu'à 2025)

Cour des comptes : 100 Md€ (plan jusqu'à 2030) (rapport 2016)

Ressource humaine dans le secteur nucléaire

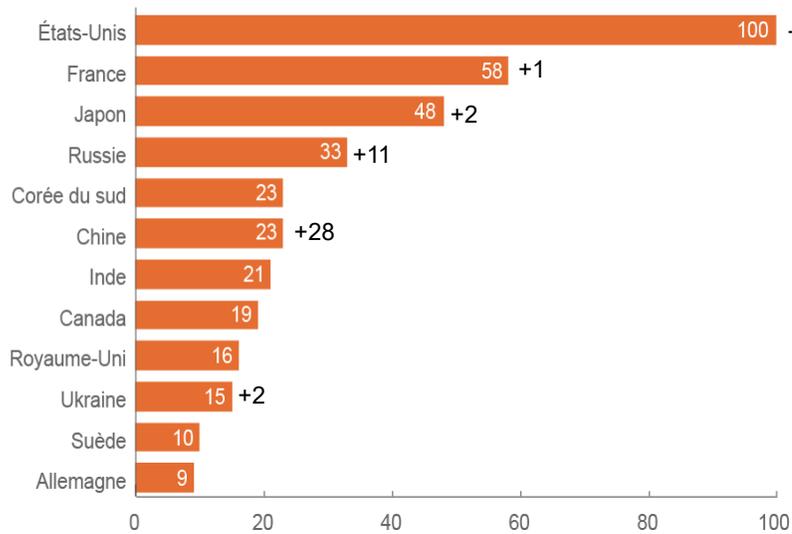
Conseil national de l'industrie

- o 2500 entreprises
- o Environ 220 000 salariés (410 000 selon AREVA)

23

1.5 Nombre de réacteurs par pays et évolution des parcs

Construction de 18 réacteurs de GIII: (8 AP1000 de Westinghouse, 6 AES-2006 de Rosatom et 4 [EPR d'Areva](#)),
16 de ces têtes de série ont pris du retard (entre 2 et 9 ans).



24

1.6 Localisation de la production et des réserves mondiales d'Uranium

Pays	Production d'Uranium	Réserves d'Uranium
Kazakhstan	19 451 (35,60%)	630 000 (11,8%)
Canada	9145 (16,75%)	469 000 (8,80%)
Australie	5983 (10,96%)	1 662 000 (31,2%)
Niger	4351 (7,97%)	421 000 (7,90%)
Russie	2993 (5,50%)	487 000 (9,14%)
USA	1537 (2,81%)	208 000 (3,89%)
Ukraine	890 (1,63%)	120 000 (2,25%)
Afrique du Sud	582 (1,07%)	279 000 (5,24%)
Brésil	265 (0,48%)	277 000 (5,19%)

Source CNRS 2011- Liste non exhaustive

25

Brèves informations (Situation globale du nucléaire dans le monde)

- Augmentation de la puissance nucléaire installée de 1,4% en 2016 (23% en chine) mais la part dans la production d'électricité recule de -0,2% est stagné à 10,5%.
- Lancement en 2016 de la construction de 3 réacteurs (15 en 2010) : 2 en Chine, 1 au Pakistan
- 8 centrales n'ont toujours pas vu le jour 10 ans après le lancement du chantier
- Le géant Américain de la construction des réacteurs Westinghouse a fait faillite
- Coût du démantèlement de la centrale à FUKUSHIMA (200 Md\$ - 630 Md\$)
- En 2030, 163 réacteurs doivent être définitivement arrêtés
- La durée moyenne de la construction d'une centrale est de 6,8 ans (+0,6 ans 2016)

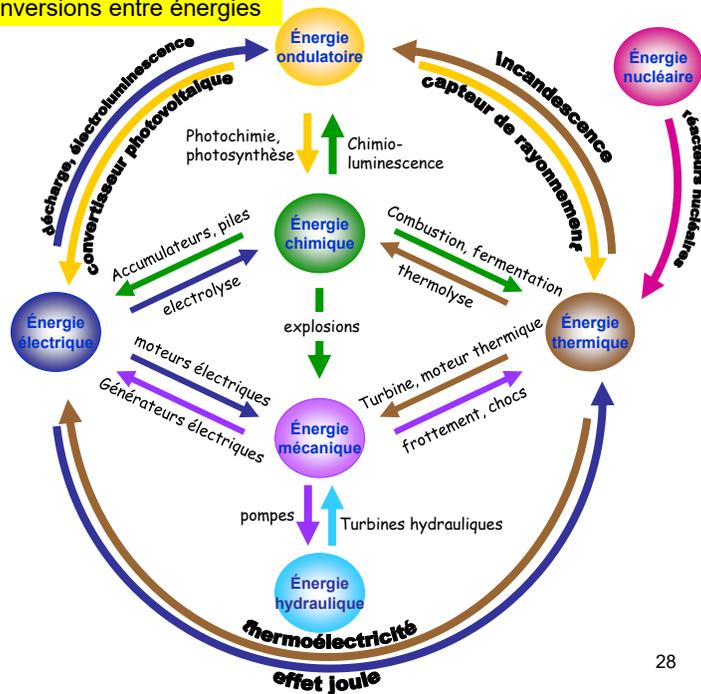
26

2. Pourquoi **reparle**-t-on aujourd'hui de l'énergie ?

Y a-t-il un **défi** à relever ?

27

Schéma général, conversions entre énergies



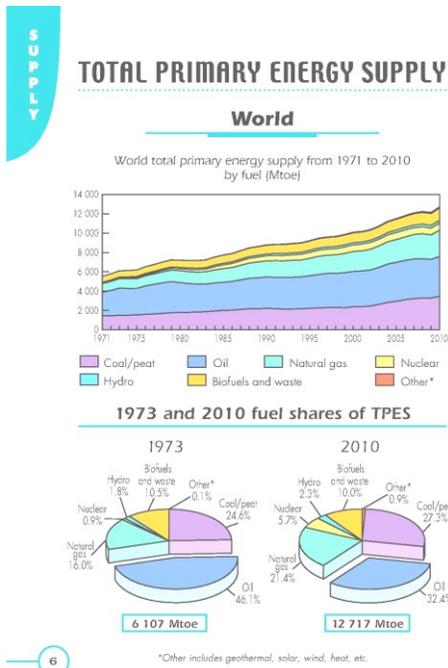
28

2.1 Contexte général



- L'épuisement prévisible à long terme des ressources non renouvelables
- La prise en compte grandissante par la société des problèmes d'ordre écologique

➔ Nécessité d'efforts importants et soutenus dans la R & D 29



2.2 Unités usuelles pour l'énergie

Dans le S.I. le **Joule (J)** est l'unité de mesure de l'énergie.

Dans la pratique, chaque type de ressource d'énergie possède son unité privilégiée, et c'est pour les agréger ou les comparer que l'on utilise les **unités de base que sont le tep** ou parfois le **kWh**, toute énergie primaire étant assez souvent convertie en électricité.

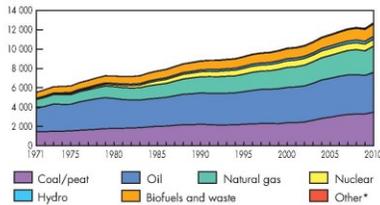
Source/vecteur	Unités de base	Unité
pétrole	tonne équivalent pétrole	tep
Gaz naturel	british thermal unit	btu
Charbon	tonne équivalent charbon	tec
Electricité	kiloWatheure	kWh

Remarque : La **calorie** qui ne fait plus partie du système international d'unité, a longtemps été utilisée dans le domaine thermique en tant qu'unité de chaleur.

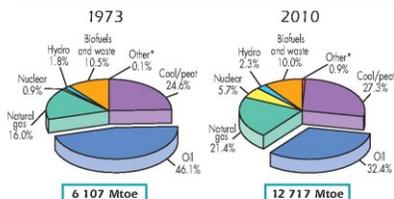
TOTAL PRIMARY ENERGY SUPPLY

World

World total primary energy supply from 1971 to 2010 by fuel (Mtoe)



1973 and 2010 fuel shares of TPES



6

*Other includes geothermal, solar, wind, heat, etc.

Conversions entre unité

1 baril = 159 litres (précisément 158,9873).

1 (kWh) = 3,6 MJ
1 (MWh) = 0,086 tep

1 (tep) = 41,855 GJ
1 (tep) = 11 628 kWh
1 (tep) = 1 000 m³ de gaz*
1 (tep) = 7,33 barils de pétrole*

1 (tep) = 1,4286 tec
1 (tec) = 29,307 GJ

Unités anglo-saxonne

1 Boe (Barrel of oil equivalent) = 1 baril
1 Boe = 0.136 tep
1 cf (cubic feet) = 0,0283 m³ = 0,0283 mtep
1 (btu) = 1060 J

M=mille; MM=Méga; B=Giga T=Téra

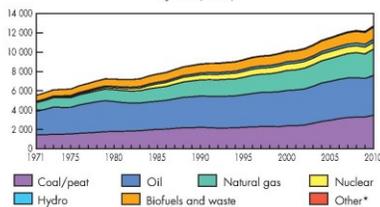
* équivalence conventionnelle du point de vue énergétique

31

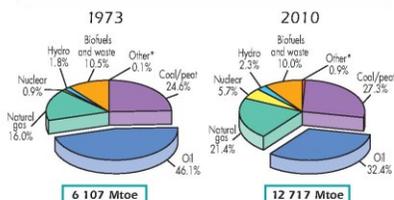
TOTAL PRIMARY ENERGY SUPPLY

World

World total primary energy supply from 1971 to 2010 by fuel (Mtoe)



1973 and 2010 fuel shares of TPES



6

*Other includes geothermal, solar, wind, heat, etc.

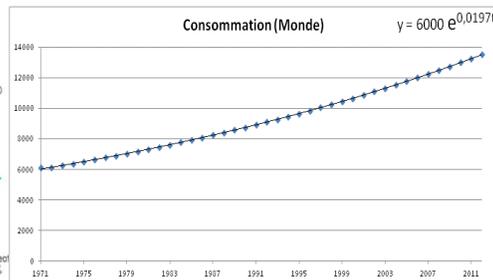
Modèle mathématique pour une croissance de la demande (d) de 2% par an :

$$d(t_1) = d(t_0) + 2\% \times d(t_0)$$

$$d(t_2) = d(t_1) + 2\% \times d(t_1)$$

etc ...

C'est un modèle de croissance exponentielle



Avec une croissance mondiale de la demande de 2% on doit doubler l'offre tout les 40 ans !

32

2.3 Contexte énergétique mondial

	Monde		Europe		France	
Non renouvelables	80.7 %		84 %		79 %	
Renouvelables	19,3 %		16 % (27% 2030)		21% (32% 2035)	
source	Pétrole	Gaz	Charbon	Nucléaire fission	Nucléaire fusion	Renouvelable
Monde	33%	21%	27%	6%	--	13 %
Europe	41%	24%	15%	14%	--	6 %
France	31%	15%	4,3%	40,9%	--	8,8 %
Réserves (en Années et par an de conso.)	Prouvées 40 ans Ultimes 135 ans	Prouvées 65 ans Ultimes 230 ans	Prouvées 220 ans Ultimes 1400 ans	Prouvées 70 ans (3000) Ultimes 280 (12 000)	Infinies	infini

L'évolution démographique

6 milliards en 2000



9 à 10 milliards en 2050

L'effet de serre (réf. 1990)

- Le CO2 représente 60% environ des émissions de GES additionnel
- Les travaux des climatologues et biologistes montrent que la planète peut « absorber » une quantité de CO₂ de 500kg/an/hab.

- ⚠ Correspond à une réduction d'un facteur 4 des émissions mondiales actuelles ! ...
- ⚠ stabiliser l'effet de serre

⇒ réduire nos émissions d'un facteur 2 en 2050

33

Est-ce que ce scénario est possible pour le pétrole par exemple ?

En 2010, la demande mondiale était de 85,54 millions barils/jours. Soit environ 30 Gbarils/an

La limite actuelle de production est estimée à 95 millions barils/jour.

De plus, les champs pétrolifères auraient tendance à s'épuiser de façon naturelle de 5% par an.

Au niveau mondial, les réserves "prouvées" de pétrole sont donc portées à :
1 238 milliards de barils. Avec la demande actuelle, cette réserve durera environ 40 ans.

Y a-t-il de nouveaux gisements ?

La société de prospection Américaine Nobel Energy a déclaré sur son site, avoir découvert 2,3 milliards de barils entre 2007 et 2011

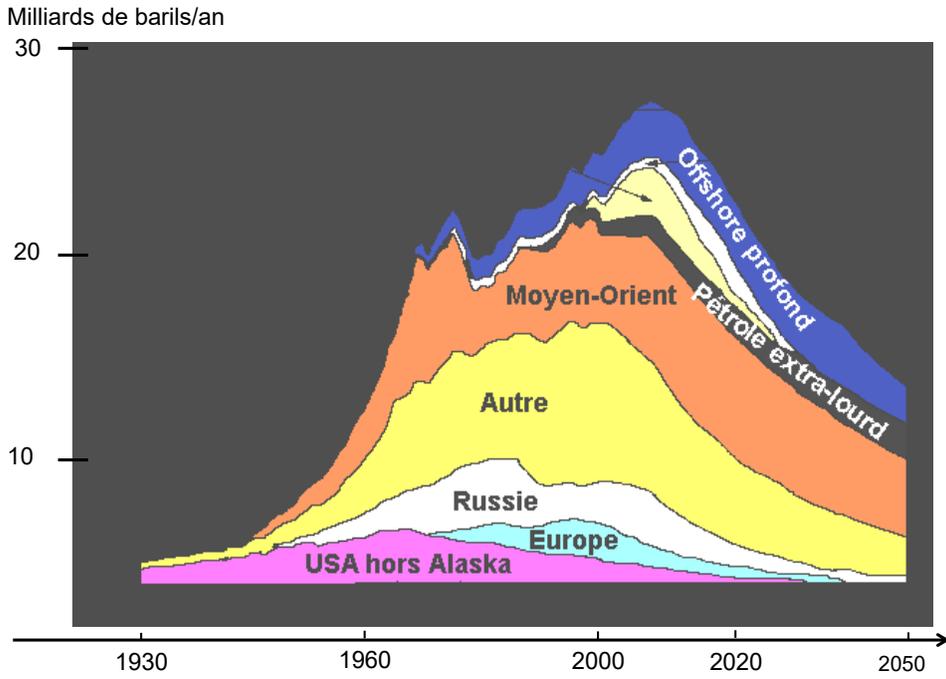
Les gisements les plus récemment découverts sont en mer Méditerranée orientale (fin 2010) au large des côtes de la Grèce, chypre, Turquie, Syrie et Israël/palestine

~75 milliards de barils en mer égée (Grèce, Chypre, Turquie)

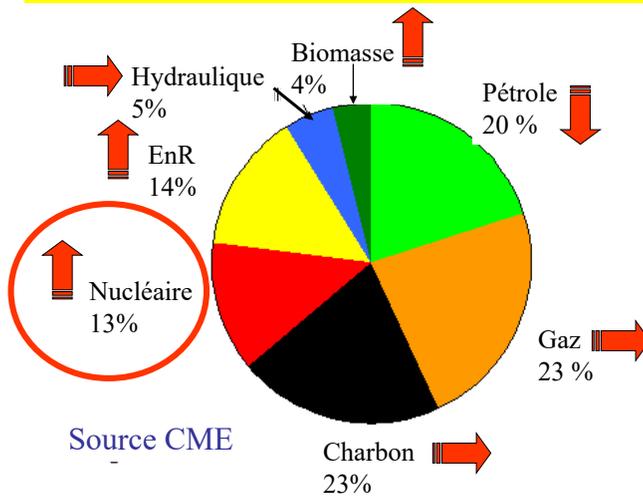
~381 milliards de barils au large des côtes israel/palestine

A l'échelle mondiale ceci ne représente que quelques années d'exploitation.

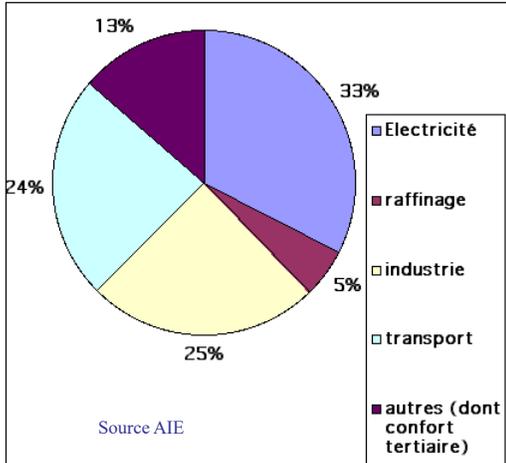
34



Scénario énergétique du CME (Conseil Mondiale de l'Énergie) pour 2050



Origine des émissions de CO₂ dans le monde



Coût d'1 kWh en terme d'émission de CO₂ :

1 kWh 'charbon' = 955 g de CO₂

1 kWh 'pétrole' = 818 g de CO₂

1 kWh 'Gaz nat.' = 600 g de CO₂

1 kWh 'nucléaire' = 4 g de CO₂

37

Le noyau atomique : une Source d'énergie

Les promesses de la fusion

Deux voies possibles

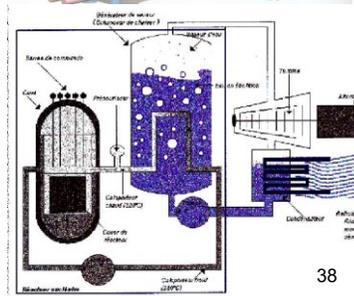
- Fusion inertielle (LMJ)
- Tokamaks (ITER)

Les progrès de la fission

Deux voies possibles

- Réacteurs hybrides
- Réacteurs IV générations régénérateur ou surgénérateur.

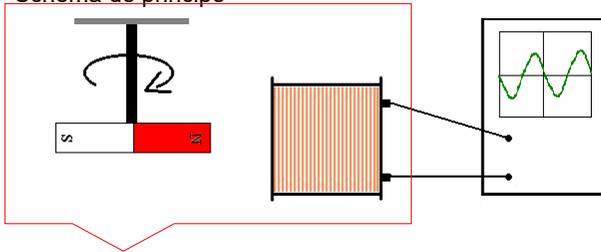
Incinération des déchets radioactifs



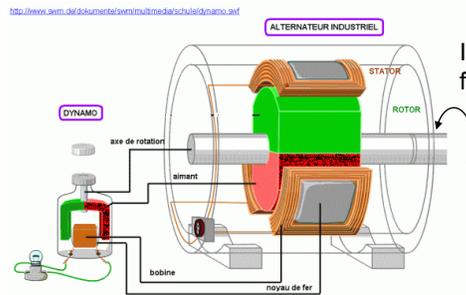
38

2.4 Comment produire de l'électricité

Schéma de principe

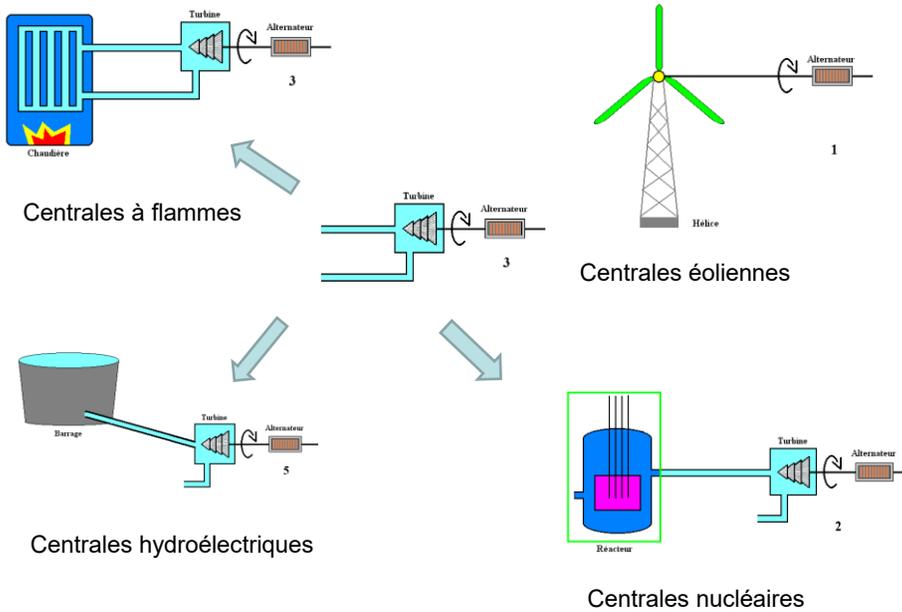


Un alternateur est un convertisseur d'énergie mécanique en énergie électrique



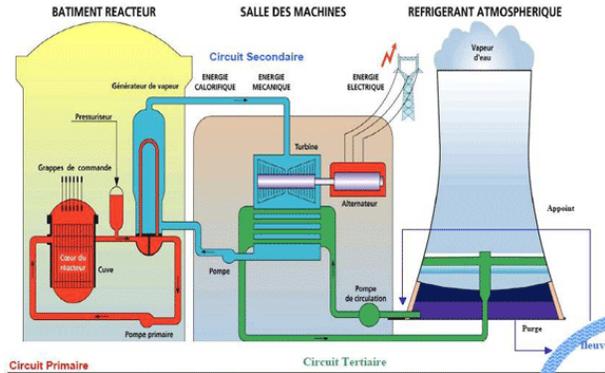
Il faut une turbine pour faire tourner le rotor

39



40

La centrale nucléaire



Nous nous limiterons volontairement à l'étude

- du combustible neuf (fabrication, nature, purification, enrichissement, etc ...)
 usé (traitement recyclage, déchets ultimes etc ...)
- de la fission nucléaire et production d'énergie (physique des réacteurs, neutronique)
- du pilotage et fonctionnement d'un réacteur

41

3 – Atome: définitions fondamentales

42

3.1 Constituants de l'atome

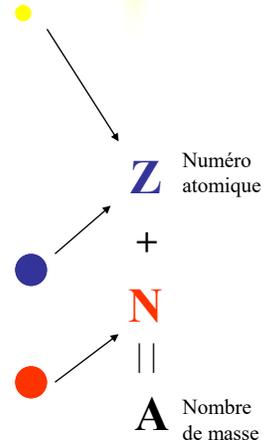
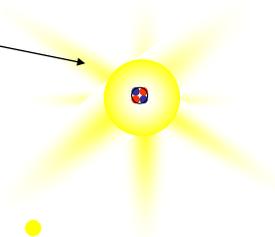
L'atome aujourd'hui

Il est composé d'un ou plusieurs **électrons** chargés négativement. ($-e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

Ces **électrons** entourent un noyau central très dense contenant à son tour deux sortes de nucléons de masses voisines, à savoir :

- les **protons** porteurs chacun d'une charge élémentaire positive ($+e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)
- les **neutrons** sans charge électrique

orbitale



43

3-2 Le noyau

Un **noyau** est le nom générique de l'objet qui est au centre de l'atome.

Un grand nombre d'expériences ont montré que les noyaux atomiques sont à peu près **sphériques** et que leur masse représente pratiquement celle de l'atome (environ 99,75%).

$$M_{\text{noyau}} \approx 0,9975 M_{\text{atome}}$$

3-3 L'élément chimique

On appelle élément chimique une espèce d'atomes caractérisés par une valeur déterminée du nombre de charge Z du noyau ou numéro atomique.

44

Exemple :



Il existe 90 éléments chimiques naturels numérotés de 1 à 92, à l'exception des numéros 43 et 61 qui sont des éléments artificiels instables produits dans les réacteurs nucléaires ainsi que ceux au-delà du numéro 93.

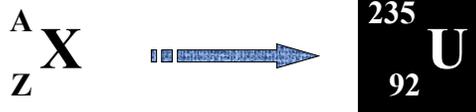
45

3-4 Le nucléide

Un **nucléide** ou **nuclide** est utilisé pour désigner une **espèce nucléaire** donnée. On appelle **nucléide** une espèce d'atomes caractérisés par une valeur déterminée du **nombre de charge Z** et du **nombre de masse A**.

Chaque nucléide est caractérisé par la paire (Z,A).

Représentation standard des nucléides

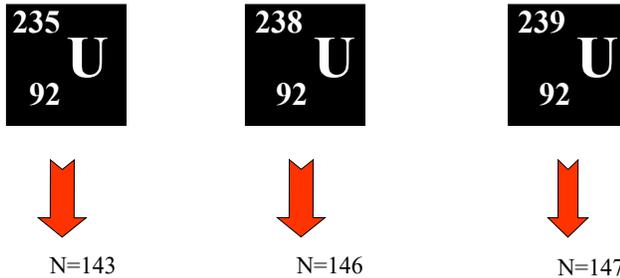


$$\begin{matrix} Z = 92 \Rightarrow X \equiv U \\ A = 235 \end{matrix}$$

46

3-5 Les isotopes

On appelle isotopes l'ensemble des nucléides appartenant au même élément chimique, avec des nombres de masse A différents et un numéro atomique Z identique.



3-6 Abondance isotopique

L'abondance isotopique traduit la proportion d'un isotope donné dans l'élément chimique naturel considéré.

47

Exemples

Oxygène



99,759 %

0,037 %

0,204 %

Remarque : Le comportement chimique d'un élément ne dépend que de Z (nombre d'électrons). Par conséquent, la séparation des isotopes d'un même élément ne peut être fondée que sur des différences issues des caractères physiques.

Exemple: L'Uranium naturel contient 0,7% ${}^{235}\text{U}$ et 99,3% ${}^{238}\text{U}$

Le combustible utilisé dans les centrales nucléaires est enrichi de 3 à 5 % en ${}^{235}\text{U}$. On utilise la **centrifugation** ou la **diffusion gazeuse**. Cette dernière technique repose sur le fait que les molécules ${}^{235}\text{U}$ diffusent en moyenne, plus vite que celles de ${}^{238}\text{U}$, à travers plusieurs barrières poreuses.

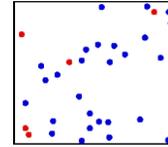
48

Principe de la Diffusion gazeuse

a) La vitesse des molécules dans un gaz est liée à la température de ce dernier

$$E_c = \frac{3}{2} \cdot k_B \cdot T \qquad \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{3}{2} \cdot k_B \cdot T \Rightarrow v = \sqrt{3 \cdot \frac{k_B \cdot T}{m}}$$

$$m(^{238}\text{U}) > m(^{235}\text{U}) \quad \rightarrow \quad ||\vec{v}(^{235}\text{U})|| > ||\vec{v}(^{238}\text{U})||$$



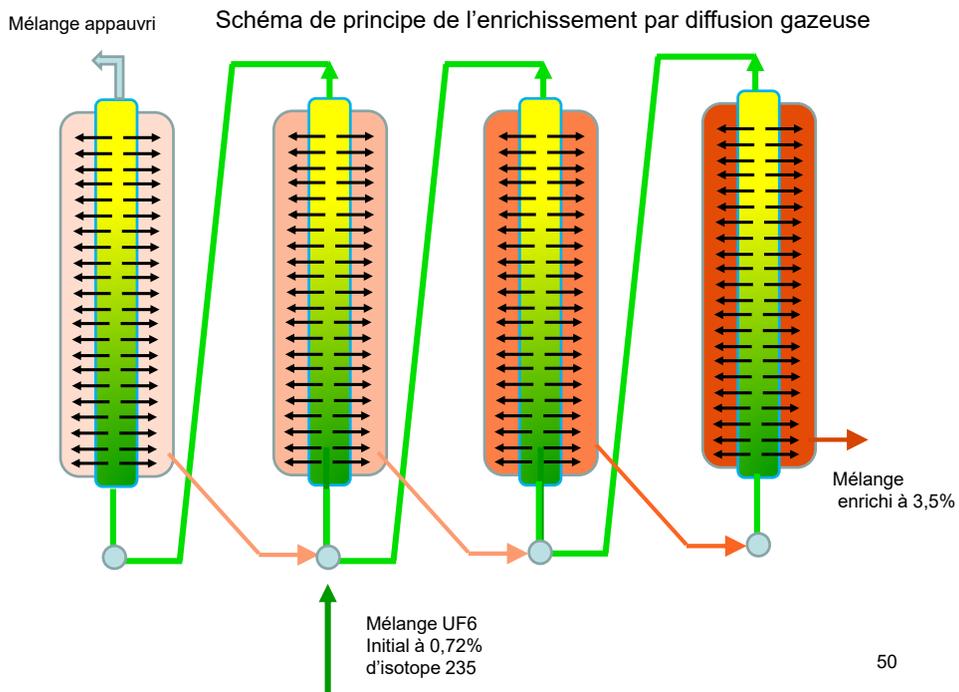
La vitesse de déplacement des molécule ^{235}U étant plus grande, la probabilité de passer à travers une paroi poreuse est directement proportionnelle à la fréquence de frappe sur la paroi.

b) Intérêt à comprimer un gaz ?



Rép: En réduisant le volume occupé par les molécules, on réduit également la longueur de parcours de celles-ci. Par conséquent le temps entre deux chocs sur la paroi se réduit. Autrement dit, les molécules viennent frapper la paroi avec une fréquence plus élevée.

49



50

Diffusion gazeuse

Usine Georges Besse (EURODIF) Tricastin Vallée du Rhône



2500kWh / UTS

Pour atteindre une teneur de 3 à 5% en uranium-235, il faut faire diffuser l'uranium sous forme gazeuse (UF₆) dans une série de barrières poreuses constituant la « cascade de diffusion ». La cascade de l'usine Georges-Besse contient 1400 étages, chaque étage comportant un diffuseur, un compresseur et un échangeur de chaleur.

Qu'est ce que l' UTS ?

L'**unité de travail de séparation (UTS, SWU en anglais pour « Separative Work Unit »)** correspond au travail nécessaire à la séparation d'un kilogramme d'uranium en deux lots 51 de teneur isotopique différente (en uranium 235 fissile et en uranium 238).



Que devient l'usine EURODIF ?

L'usine [EURODIF](#) Production a arrêté progressivement sa production jusqu'en juin 2012.

Depuis juin 2013, à la suite de l'autorisation de l'ASN, l'exploitant a lancé les premières opérations PRISME (Projet de rinçage intensif suivi de la mise à l'air EURODIF) qui consistent à effectuer des opérations de rinçages répétés des [barrières](#) avec du trifluorure de chlore (ClF₃) afin de récupérer la quasi totalité de l'uranium déposé dans les barrières en vue de son [démantèlement](#).

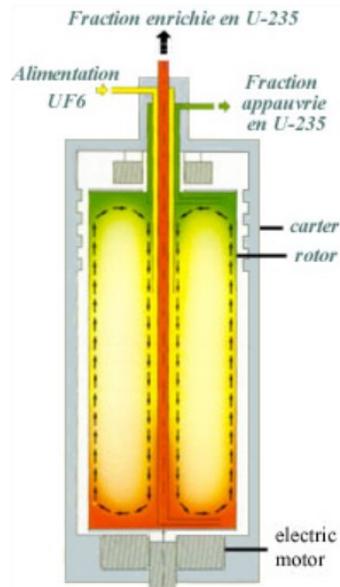
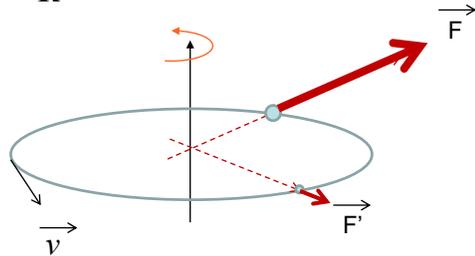
Une nouvelle usine Georges BESSE II (GBII) utilisant le principe de la centrifugation pour enrichir l'uranium, remplace l'usine Georges BESSE.

52

Principe de la Centrifugation

A la distance R de l'axe de rotation, la force centrifuge d'une masse m à pour expression :

$$F = m \frac{v^2}{R}$$



53

Enrichissement par centrifugation

GB II, entrée en opération en 2009



Le gaz d'uranium est introduit dans des cascades de milliers de centrifugeuses comprenant un rotor de 1 à 2 m de haut et de 15 à 20 cm de diamètre. Pour une séparation efficace, les centrifugeuses doivent tourner à 50 000-70 000 tours par minute.

La fraction enrichie va alimenter la centrifugeuse suivante, tandis que la fraction appauvrie repart à la précédente.

54

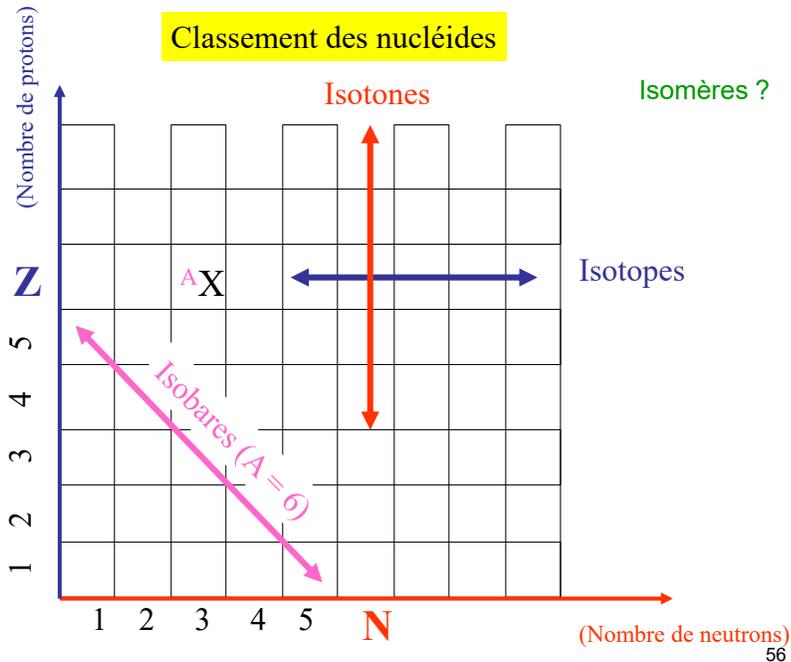
Marché mondial de l'enrichissement

L'industrie de l'enrichissement est concentrée sur le plan mondial. Quatre grandes entités cumulent la quasi-totalité des capacités d'enrichissement :

Rosatom (Russie) : 44,8 %
 Areva : 12,8 %,
 Urenco (Royaume-Uni, Pays-Bas, Allemagne, États-Unis) : 32,6 %
 CNNC (Chine) : 8,8 %.

Le secteur fait face à des surcapacités depuis l'accident de Fukushima en 2011, avec un cours de l'UTS divisé par deux. En 2004, les capacités mondiales d'enrichissement s'élevaient à 38 à 39 millions d'UTS par an. Les capacités de productions étaient respectivement les suivantes :

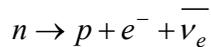
Rosatom	Cité atomique d'Angarsk (Russie)	11 MUTS / an	Centrifugation	
Areva	Georges-Besse II (France)	7.5 MUTS / an	Centrifugation	
USEC	Paducah (États-Unis)	5 MUTS / an	Diffusion gazeuse	
USEC	importateur d'uranium hautement enrichi (militaire) russe	5 MUTS / an	Dilution	
Urenco	Capenhurst (Royaume-Uni) , Gronau (Allemagne) , Almelo (Pays-Bas)	6 MUTS / an	Centrifugation	
Japan Nuclear Fuel Ltd.	Rokkasho (Japon)	1 MUTS / an	Centrifugation	
CNNC	Shaanxi (Chine)	1 MUTS / an	Centrifugation	55
Total		38 à 39 MUTS / an		



3.7 Le neutron

Le neutron hors du noyau a des caractéristiques spécifiques

- a) Possède une masse de 1,0086655 u
- b) Il « tourne » sur lui-même (spin intrinsèque $S = \frac{1}{2}$). Le neutron obéit à la statistique de Fermi-Dirac.
- c) Il a une parité positive $P_n = +1$
- d) Il a une charge électrique globale nulle. Contrairement aux particules chargées (p , d , α , ...), le neutron peut s'approcher d'un noyau cible même à très faible vitesse. Etant une particule neutre, il est insensible à la répulsion coulombienne.
- e) Possède un moment magnétique négatif $\mu_n = -1,9\mu_B$ qui est à l'origine de l'interaction Électromagnétique du neutron.
- f) Possède une vitesse « thermique » de 2200 m/s
- g) Le neutron libre est une particule instable ($T_{1/2} = 10,4$ min) :
Il ne peut exister sur Terre qu'en pénétrant à l'intérieur d'un noyau.



57

4 - Stabilité des nucléides

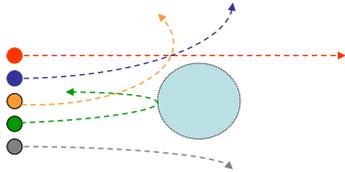
58

4-1 Rayon et densité nucléaire

Les premières estimations de la taille du noyau furent établies par Rutherford au moyen des expériences de diffusion de particules α .

Par la suite d'autres techniques expérimentales ont été mises en œuvre :

- Estimation du rayon nucléaire des émetteurs α à partir de λ_α
- Estimation du rayon nucléaire des émetteurs β : noyaux miroirs.
- Par l'analyse de la formule semi-empirique de masse (énergie de liaison)
- Par diffusion de neutrons rapides sur les noyaux
- Par diffusion d'électrons rapides sur les noyaux



Mesure du rayon nucléaire par diffusion de particules énergétiques

59

Estimation du rayon nucléaire des émetteurs β : noyaux miroirs.

Deux noyaux isobares tels que le nombre de protons de l'un soit égal au nombre de neutrons de l'autre constituent une « paire de noyaux miroirs »

On considère un modèle de noyau dans lequel la charge électrique portée par les protons est distribuée uniformément à l'intérieur du volume nucléaire supposé sphérique et de rayon R . Le rayon R du noyau est relié au nombre de masse ou au nombre de nucléon A du noyau par la relation :

$$R = r_0 A^{1/3} \text{ ou } r_0 \text{ est le rayon nucléaire unité que l'on se propose de déterminer.}$$

1° Energie coulombienne d'interaction d'une sphère :

Calculer l'énergie de répulsion coulombienne W_Q d'une sphère de rayon R renfermant la charge électrique Q uniformément distribuée en volume.

Donner l'expression W_Z de cette énergie pour un noyau donné A_ZX pour lequel on prendra $Q=Ze$ avec Z le nombre de protons et e la charge électrique élémentaire et la mettre sous la forme :

$$W_Z = a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}}. \text{ On précisera l'expression de la constante } a_C.$$

En déduire la différence d'énergie coulombienne W_{AZ} entre deux noyaux isobares dans le cas particulier où le nombre de charges respectifs est Z et $Z-1$.

60

2° Exprimer la différence d'énergie au repos existant entre les deux noyaux miroirs A_ZX et ${}^A_{Z-1}Y$ en supposant que celle-ci ne provient que de la différence de masse entre neutron et proton et de la différence d'énergie coulombienne. Dire en quoi le principe d'« indépendance de charge » des forces nucléaires intervient dans cette hypothèse.

3° Le noyau A_ZX précédent est émetteur β^+ et l'on désigne par T_{\max} l'énergie cinétique maximum du spectre β émis. Exprimer la différence d'énergie au repos entre les deux noyaux X et Y (noyau fils) en fonction de T_{\max} sachant que la transition β conduit au niveau fondamental du noyau résiduel.

4° Dédire des résultats précédents une relation donnant r_0 en fonction de T_{\max} et la mettre

sous la forme : $r_0 = b \frac{A^{2/3}}{a + T_{\max}}$ ou a et b sont des constantes à préciser.

En calculant numériquement les constantes a et b donner la relation numérique de r_0 en Fermis en fonction de T_{\max} en MeV.

Données :

$$m_p = 1,007\,276\,63\,u \quad m_n = 1,008\,665\,4\,u$$

$$1\,u = 931,5016\,MeV \quad m_0 = 0,511\,MeV$$

$$e = 1,6\,10^{-19}\,C$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 910^9\,(MKSA)$$

Noyau émetteur	${}^{19}_{10}Ne$	${}^{37}_{19}K$
T_{\max} (MeV)	2.23	5.10

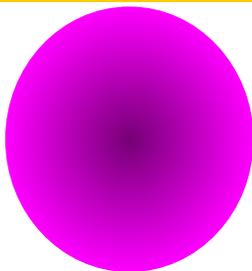
61

Pour des noyaux de masse intermédiaire, de nombreuses expériences visant à mesurer le rayon nucléaire ont montré que le rayon du noyau assimilé à une sphère se met sous la

forme : $r = r_0 A^{1/3}$ avec A la masse atomique

$$\text{et } r_0 = 1,2\,10^{-15}\,m = 1,2\,f \quad (1\,fermi = 10^{-15}\,m)$$

Pour des noyaux encore plus lourds $A > 200$



Existence d'une « peau »

62

$$\rho = \frac{\text{Masse}}{\text{volume}} = \frac{A \text{ uma}}{4/3 \pi (r_0 A^{1/3})^3} = 2,4 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

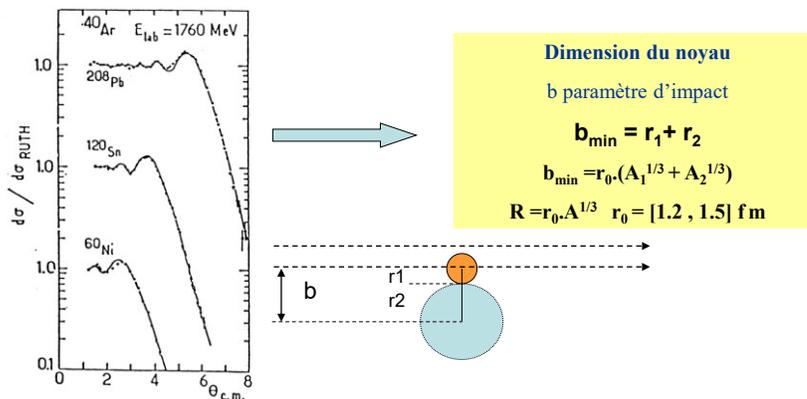
La densité nucléaire est constante

$$d = 1,4 \cdot 10^{44} \text{ nucléons/m}^3$$

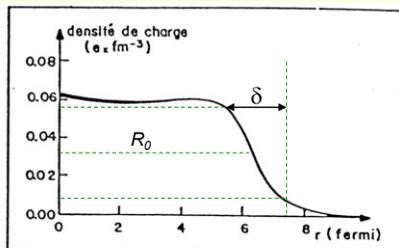
1 cm³ de matière nucléaire → 230 millions de tonnes!

La terre aurait un diamètre de 200 m!!

63



Qu'elle est la distribution des charges (protons) dans les noyaux ?



Le noyau peut être comparé à une gouttelette chargée en volume. C'est un système à faible épaisseur de peau, ce qui permet de schématiser la goutte en distinguant une région intérieure caractérisé par une valeur constante de la densité et une surface séparant la région interne du vide.

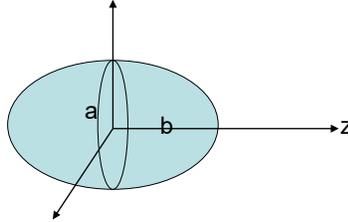
$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \exp[(r - R_0)/\delta]}$$

64

La distribution des charges (protons) a-t-elle une symétrie sphérique ?

La réponse expérimentale se fait par la mesure du **moment quadrupolaire**, qui lorsque il est nul, montre que le noyau est de forme sphérique. Sinon, il est déformé et présente une forme qu'on assimile à un ellipsoïde.

$$\rho = \frac{Ze}{\int dv} = \frac{3Ze}{4\pi a^2 b}$$



Le moment quadrupolaire classique dans la direction z sera :

$$Q = \frac{\rho}{e} \int (3z^2 - r^2) dv = \frac{2}{5} Z(b^2 - a^2)$$

Avec l'approximation du rayon moyen $R=(a+b)/2$ et l'ellipticité $\eta=(b-a)/2$

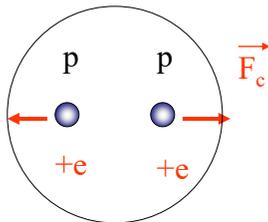
$$Q = \frac{4}{5} Z \eta R^2 \quad \text{et} \quad \frac{b}{a} \approx 1 + \eta \quad \text{Pour beaucoup de noyaux, } Q \neq 0$$

Exemple: deuton, $Q = 0,273 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^2$ Bi ($Z=83$) : $Q = -40 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^2$

65

4-2 Les forces en présence dans un noyau

Un noyau ou nucléide est dit stable, si sa structure interne reste inchangé au cours du temps. La présence de protons dans le noyau entraîne l'existence d'un terme de Coulomb répulsif.

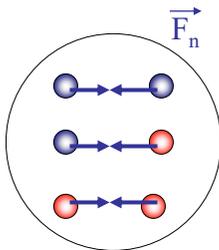


Répulsion coulombienne

$$F_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad \text{Pour 2 proton distant de 1 fm}$$

$$F = \frac{910^9 (1,610^{-19})^2}{(10^{-15})^2} = 230 \text{ N}$$

L'énergie de répulsion coulombienne augmente en Z^2 . Tous les protons participent.



Existence d'une force nucléaire attractive indépendante de la charge. L'énergie nucléaire n'augmente certainement pas en N^2 . Chaque neutron n'interagit donc pas avec l'ensemble des neutrons du noyau. La portée des forces nucléaires est inférieure aux dimensions du noyau.

66

Caractéristiques générales des forces spécifiquement nucléaires

a- la portée des forces nucléaires est de l'ordre du fermi= 10^{-15}m

Les nucléons se trouvent intimement rassemblés. La longueur d'onde de Broglie associée donne une énergie cinétique :

$$E_c = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m\lambda^2} \approx 20\text{MeV}$$

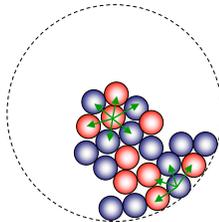
Ceci exige une grande énergie potentielle moyenne de l'ordre de 30 MeV pour

Une énergie de liaison résiduelle de $\sim 8\text{ MeV}$

b- indépendance de la charge

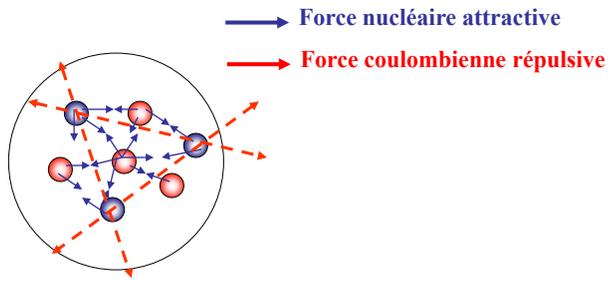
c- forces tensorielles

67



La force nucléaire n'agit qu'entre voisins proches.
Les nucléons situés en périphérie sont moins liés que ceux se trouvant au centre du noyau. On dit qu'il y a saturation de la force nucléaire.
Ceci va engendrer un « cœur » attractif et des tensions de surface.

68



La stabilité des nucléides résulte de la compétition entre la force nucléaire et la force coulombienne.

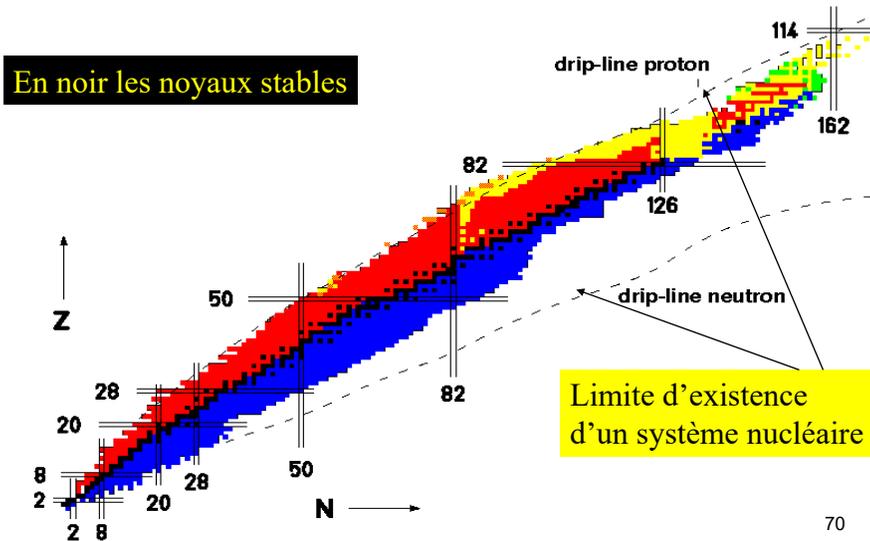
Un noyau est stable si durablement, la force nucléaire F_n reste dominante par rapport à la force de répulsion coulombienne F_c .

L'instabilité d'un nucléide résulte d'un équilibre fragile entre ces deux forces.

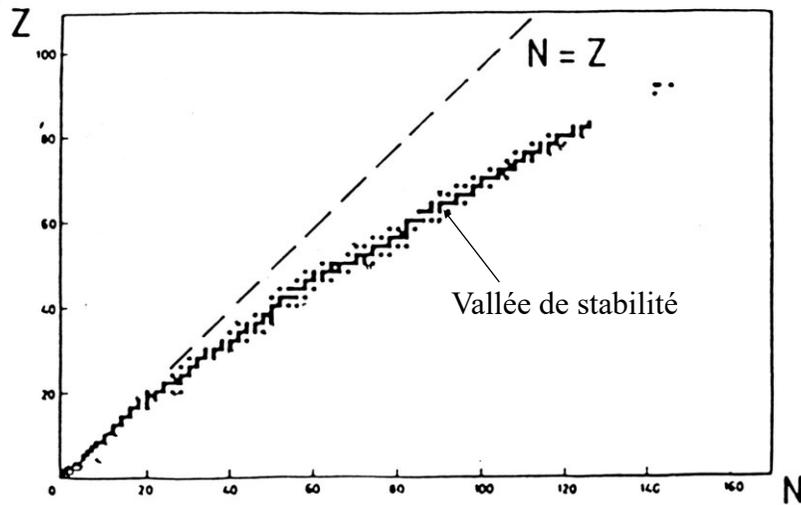
69

4-3 stabilité et instabilité

Le premier point qui caractérise la matière nucléaire est donc la notion de stabilité et d'instabilité nucléaire.



70



Au delà de $Z=20$, il faut plus de neutrons pour stabiliser le noyau

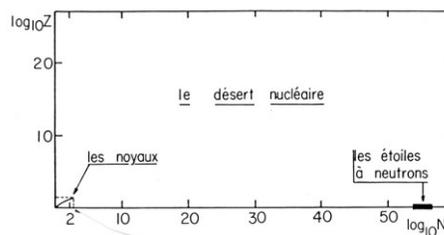
Un noyau stable a une période infinie ? Qu'en pensez vous ?

L'atome stable le plus léger est l'hydrogène (proton) .

Pourquoi un atome avec 1 neutron ne peut pas exister ?

Pourquoi faut-il plus de neutrons pour stabiliser les noyaux lourds ?
 Que nous apprend le fait que le nombre de protons dans un noyau est limité à une centaine ?

Où trouve-t-on des neutrons ?



72

Le deuxième point qui caractérise la matière nucléaire est la parité.

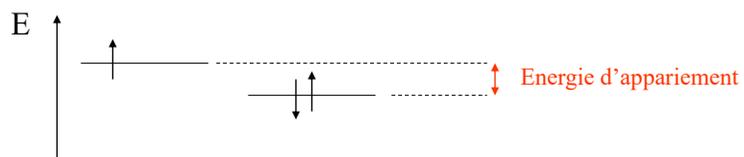
Z									
15		²⁶ P	²⁷ P	²⁸ P	²⁹ P	³⁰ P	³¹ P	³² P	³³ P
14	²⁴ Si	²⁵ Si	²⁶ Si	²⁷ Si	²⁸ Si	²⁹ Si	³⁰ Si	³¹ Si	³² Si
13	²³ Al	²⁴ Al	²⁵ Al	²⁶ Al	²⁷ Al	²⁸ Al	²⁹ Al	³⁰ Al	³¹ Al
12	²² Mg	²³ Mg	²⁴ Mg	²⁵ Mg	²⁶ Mg	²⁷ Mg	²⁸ Mg	²⁹ Mg	³⁰ Mg
11	²² Na	²² Na	²³ Na	²⁴ Na	²⁵ Na	²⁶ Na	²⁷ Na	²⁸ Na	²⁹ Na
10	²⁰ Ne	²¹ Ne	²² Ne	²³ Ne	²⁴ Ne	²⁵ Ne	²⁶ Ne	²⁷ Ne	
	10	11	12	13	14	15	16	17	18 N ₇₃

Protons : Z pair \implies 3 noyaux stables
 Z impair \implies 1 noyau stable

Neutrons : N pair \implies 3 noyaux stables
 N impair \implies 1 noyau stable

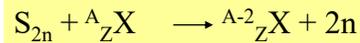
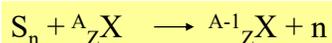
Comme pour les électrons, les nucléons se comportent comme des **fermions**.

L'existence d'une **stabilisation** des noyaux par **appariement** des nucléons est donc nettement éclairé par cette constatation.



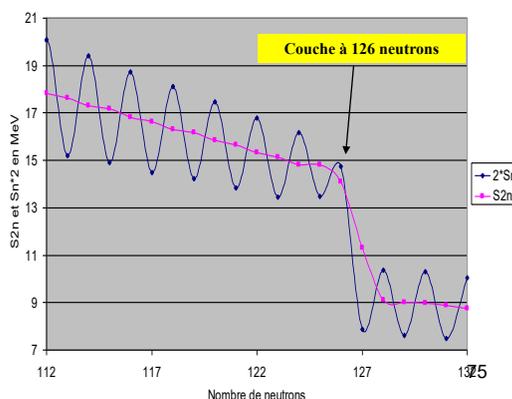
Mise en évidence expérimentale de l'énergie d'appariement et de l'effet de couche

Energie de séparation



Calculer l'énergie de séparation de 1 et 2 neutrons pour tous les isotopes du Pb et tracer les courbes $S_n, S_{2n}(A, Z=82) = f(N)$

N	DELTA m	2*S _n	S _{2n}
132	-0,1881	10,0382	8,7591
131	-3,24	7,48	8,888
130	-7,571	10,296	8,961
129	-10,494	7,626	8,998
128	-14,752	10,37	9,122
127	-17,638	7,874	11,304
126	-21,772	14,734	14,105
125	-22,476	13,476	14,825
124	-23,809	16,174	14,819
123	-23,793	13,464	15,125
122	-25,132	16,786	15,317
121	-24,81	13,848	15,652
120	-25,957	17,456	15,837
119	-25,3	14,218	16,172
118	-26,262	18,126	16,303
117	-25,27	14,48	16,612
116	-26,101	18,744	16,823
115	-24,8	14,902	17,162
114	-25,42	19,422	17,312
113	-23,78	15,202	17,642
112	-24,25	20,082	17,812
111	-22,28	15,542	38,422
110	-22,58	61,302	38,722



Le troisième point qui caractérise la matière nucléaire est l'évacuation de l'excès d'énergie par différentes voies de désexcitation.

La radioactivité est un phénomène qui apparaît lorsque l'émission de photons est « terminée ».

Le noyau est alors dans son état de plus basse énergie par rapport à l'interaction électromagnétique : c'est par définition l'état fondamental.

Pour donc diminuer l'énergie interne du système, d'autres types d'interaction deviennent favorables, ce sont :

- ➔ l'interaction faible qui se traduit par les radioactivités β et la capture électronique
- ➔ l'interaction forte responsable du réarrangement des nucléons du système : radioactivité α , fission spontanée, émissions de fragments comme le ${}^{14}\text{C}$.

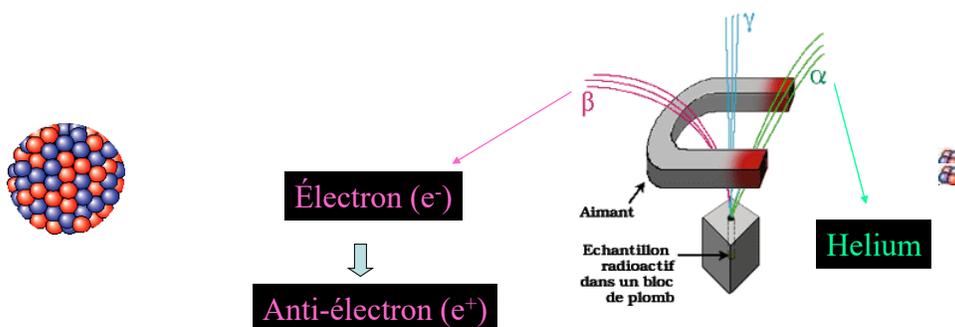
5. Instabilité et radioactivité nucléaire

77

5-1 Les principaux rayonnements

Les multiples expériences de E. Rutherford au début du 20^e siècle l'ont conduit à émettre des hypothèses sur la nature des rayonnements émis par les substances radioactives.

Observations



78

E. Rutherford

1898-1899 identifie les rayons α et β

1902 découvre la loi de la décroissance radioactive

1903 Montre que la radioactivité est un processus de transmutation des éléments

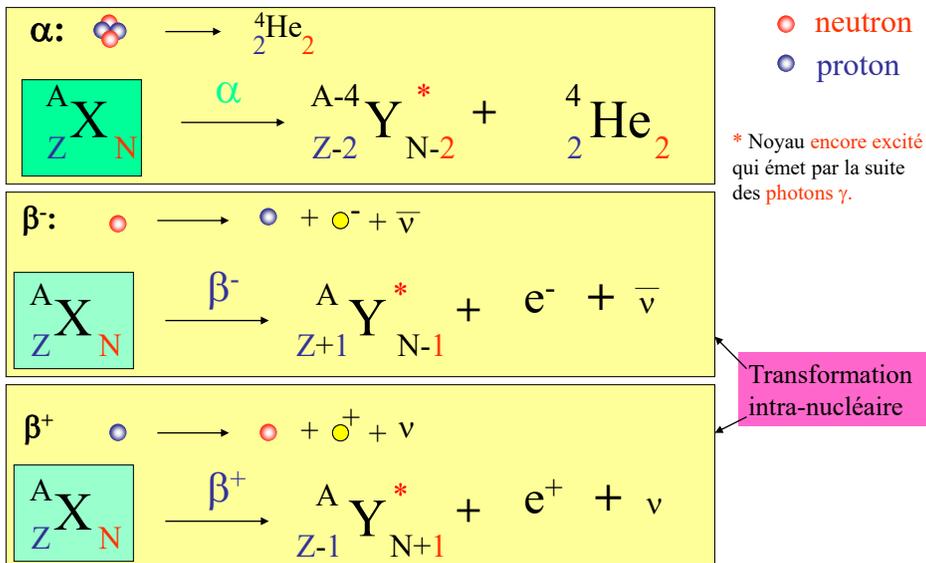
1908 Identifie les rayons α aux « atomes » d'hélium

1911 Calcule la diffusion coulombienne et met en évidence l'existence du noyau

1919 réalise la première réaction nucléaire: $^{14}\text{N} + \alpha \Rightarrow ^{17}\text{O} + \text{p}$

En conclusion, dans la nature, il existe quatre principales radio-activités : α , β^- , β^+ et γ .

79

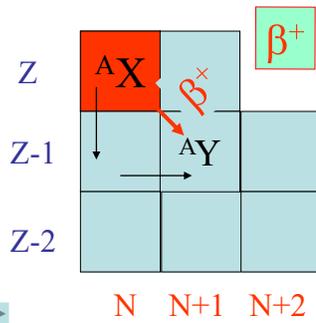
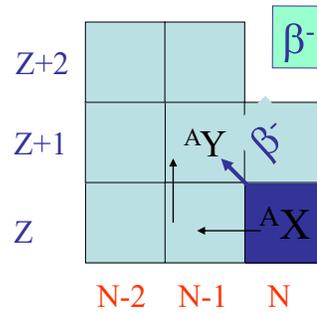
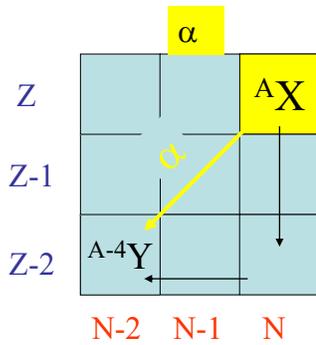


5-2 Lois de conservation

Conservation du nombre de nucléons au total (neutrons + protons).

Conservation du nombre de charges élémentaires.

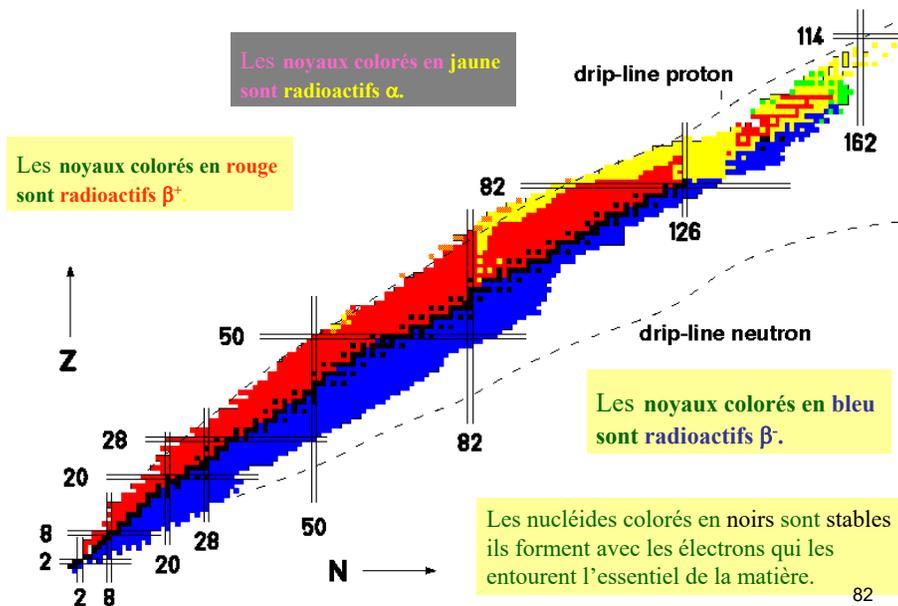
80



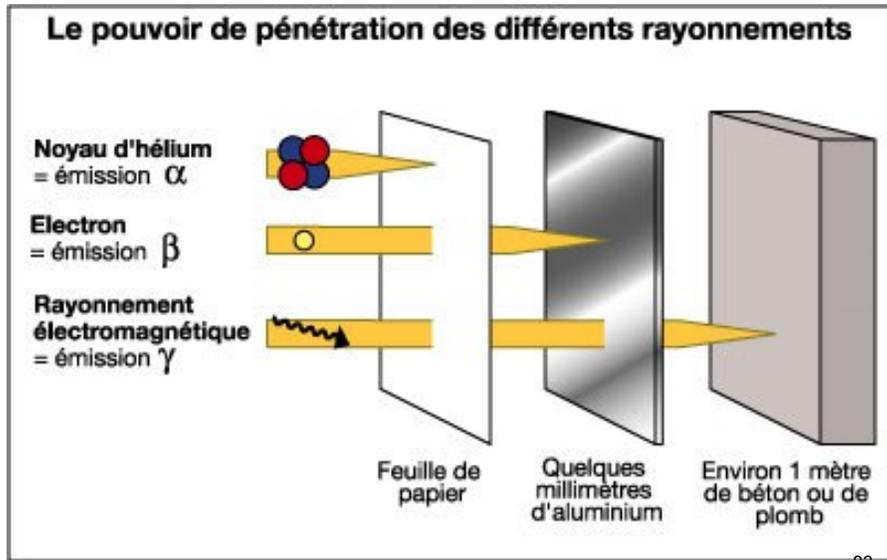
La radioactivité assure une transmutation des éléments chimiques.

Les émetteurs α sont des noyaux lourds $A > 150$.
 Les émetteurs β^- sont riches en neutrons
 Les émetteurs β^+ sont riches en protons

La carte des nucléides (le plan N-Z)

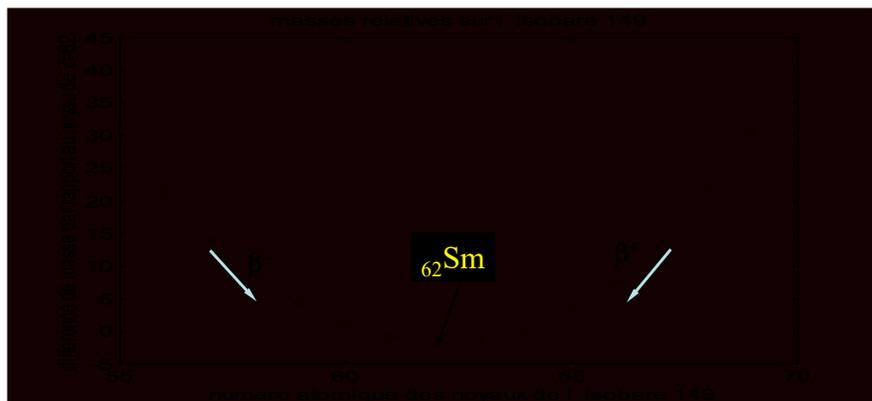


Quel est leur pouvoir de pénétration ?



Représentation de la vallée de stabilité

Pour les isobares $A=149$ tracer en valeur relative les masses $m(A=149, Z) = f(Z)$, et les relier par des flèches représentant les radioactivités β^- et β^+



Le noyau stable à la masse la plus faible. A l'échelle du noyau la masse est donc une énergie potentielle.

84

Questions sur les radioactivités β^- et β^+

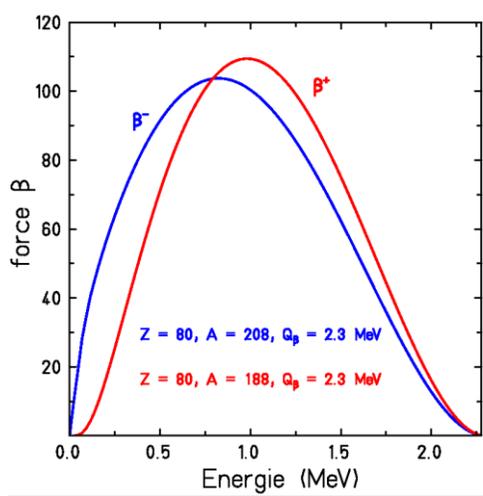
Comment évoluent généralement les périodes le long d'une chaîne radioactive β ?

Où se trouvent les isotopes qui sont à la fois β^- et β^+ ?

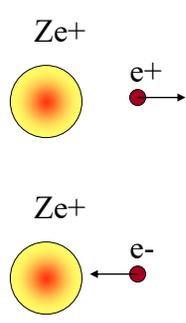
^{74}Se	^{75}Se	^{76}Se	^{77}Se	^{78}Se
^{73}As	^{74}As	^{75}As	^{76}As	^{77}As
^{72}Ge	^{73}Ge	^{74}Ge	^{75}Ge	^{76}Ge
^{71}Ga	^{72}Ga	^{73}Ga	^{74}Ga	^{75}Ga

85

Spectre d'émission des β émis par les isotopes 188 et 208 du Hg (Mercure)



D'où vient la différence entre la forme des spectres β^- et β^+ ?



Dans ces deux cas les Q de réactions sont identiques. La différence provient du fait que dès qu'ils sortent du noyau les positons sont accélérés par le champ électrique du noyau et la probabilité qu'ils sortent de l'atome avec une énergie nulle est donc nulle.

Fin cours-1

Le **laboratoire Cavendish** (*Cavendish Laboratory*) est le département de physique de l'université de Cambridge [29 prix Nobels \(en 2005\)](#)



J. Chadwick (1935) J.J. Thomson (1906) E. Rutherford (1908) C. Wilson (1927) 87