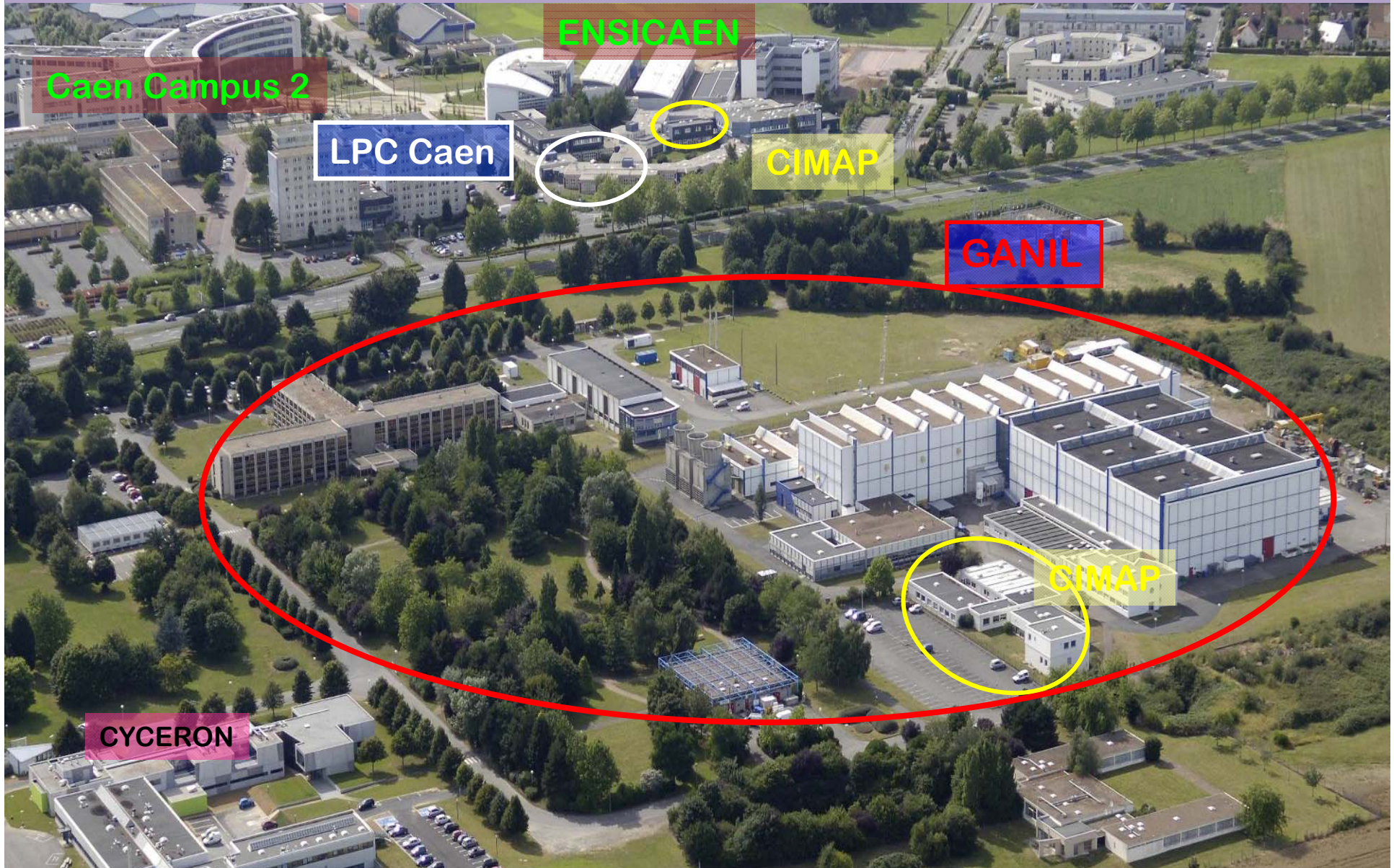
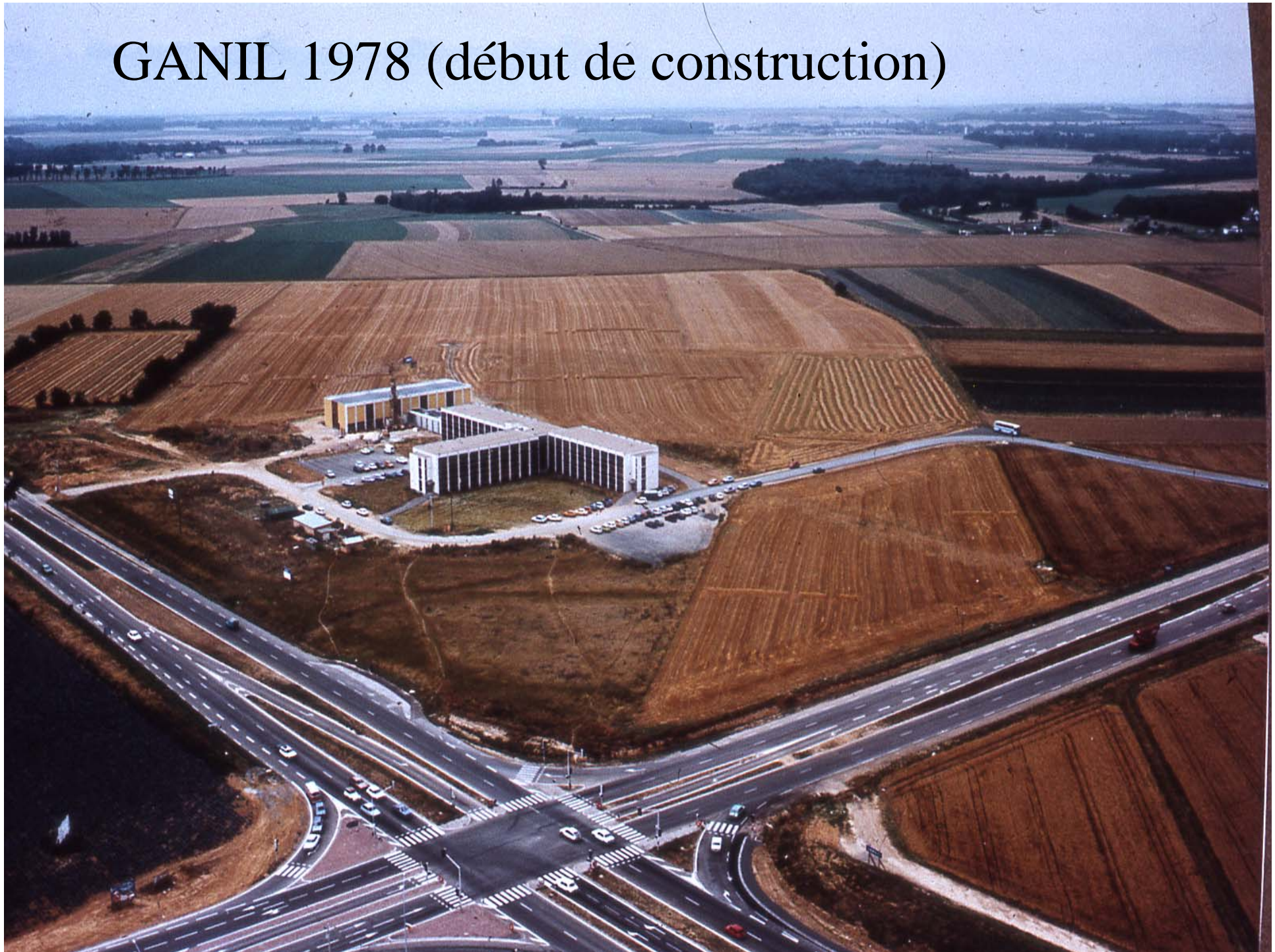


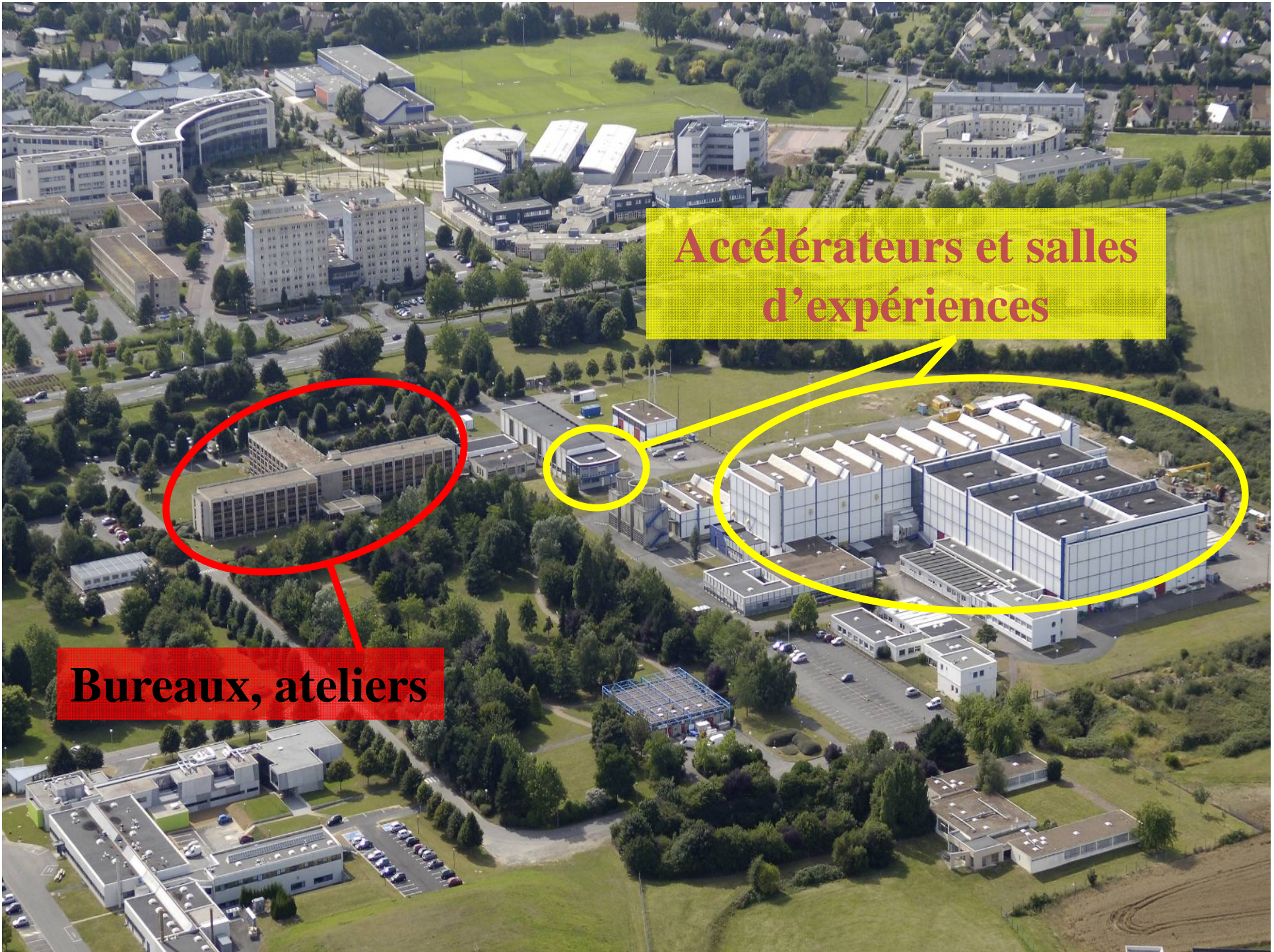
# GANIL et SPIRAL2

# Le Grand Accélérateur National d'Ions Lourds à Caen GANIL



# GANIL 1978 (début de construction)





**Accélérateurs et salles  
d'expériences**

**Bureaux, ateliers**

# GIE commun CEA/CNRS



Création GIE CEA-CNRS 1976; prolongé en 2005 pour 10 ans  
Première expérience: Janvier 1983

## Personnel permanent :

249 agents (31/12/2012): CEA(110), CNRS(138), Univ. (1):  
physiciens (CEA 6, CNRS 19, Univ. 1), ingénieurs, techniciens, administratifs

## Budget : 27,7 M€(2012 hors SPIRAL2) dont:

*2,4 M€ de ressources propres (Europe, Région, Valorisation)*  
*10,4 M€ fonctionnement et investissement*

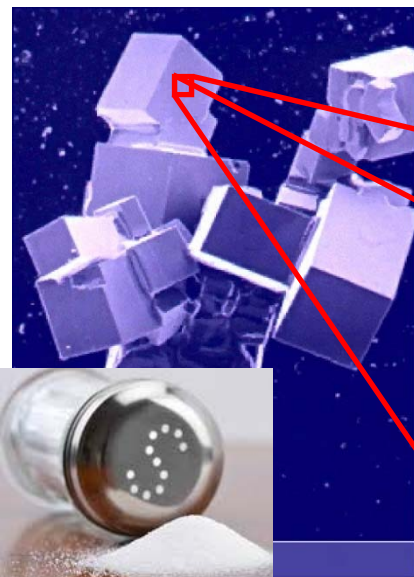
Utilisateurs : 700 chercheurs (50% étrangers, EU, Japon, Inde, US..)  
de plus 130 Laboratoires et Instituts, 30 pays

Faisceau : plus de 10 000 heures/an (3-4 expériences en parallèle)

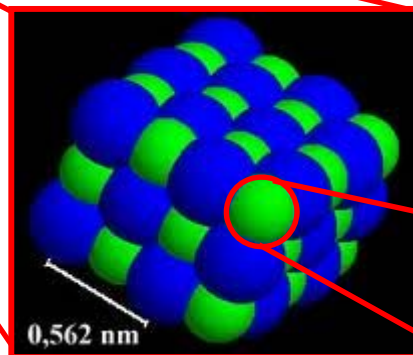
## Production Scientifique:

2500 publications, 200 thèses, 30 Prix scientifiques  
Organisation de 20 Conférences Internationales  
2000 visiteurs par an

# Notre sujet d'étude : le noyau

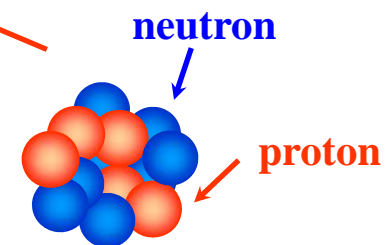
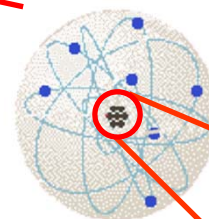


Les cristaux de sel  
**1 mm / 100**



Un arrangement régulier d'atomes de **sodium "Na"** et de **chlore "Cl"**

**1 mm / 10 000 000**  
L'atome : un cœur compact (le noyau) entouré d'électrons



Le noyau atomique : un ensemble de **protons** et de **neutrons** (nucléons)  
**1 mm / 100 000 000 000**

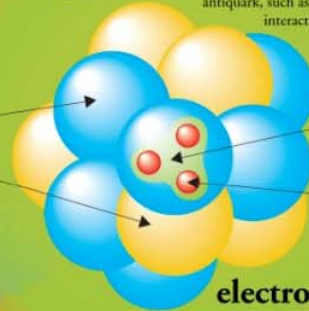
# Combien sont-ils?

- Sur terre
  - 94 éléments
  - 339 noyaux
- Dans un laboratoire
  - Environ 3000 noyaux « étudiés » parmi 8000 attendus

## The Nucleus

(1-10) × 10<sup>-15</sup> m

neutron  
10<sup>-15</sup> m  
proton



electron

In an atom, electrons range at distances typically up to 10<sup>-10</sup> m from the nucleus. If the electrons were shown to scale, this chart would cover a small town.

At the center of the atom is a nucleus formed from nucleons—protons and neutrons. Each nucleon is made from three quarks held together by their strong interactions, which are mediated by gluons. In turn, the nucleus is held together by the strong interactions between the gluon and quark constituents of neighboring nucleons. Nuclear physicists often use the exchange of mesons—particles which consist of a quark and an antiquark, such as the pion—to describe interactions among the nucleons.

### TABLEAU DE MENDELEIEV

■ Métaux de transition  
■ Halogènes  
■ Métaux pauvres  
■ Non-métaux  
■ Gaz rares  
■ Lanthanides  
■ Actinides  
■ Métaux alcalins  
■ Métaux alcalino-terreux

	I		II										III										IV										V										VI										VII										VIII																			
1	H	He																																																																																
2	Li	Be																																																																																
3	Na	Mg																																																																																
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	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																																																																
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uu	Uub	Uuq	Uuh	Uuo																																																																				
											Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																																																										
											Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																																																										

## Chart of the Nuclides

The Chart of the Nuclides presents in graphic form all known nuclei with atomic number, Z, and neutron number, N. Each nuclide is represented by a box colored according to its predominant decay mode. Magic numbers (N or Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82 and 126) are indicated by a rectangle on the chart. They correspond to major closed shells and show regions of greater nuclear binding energy.

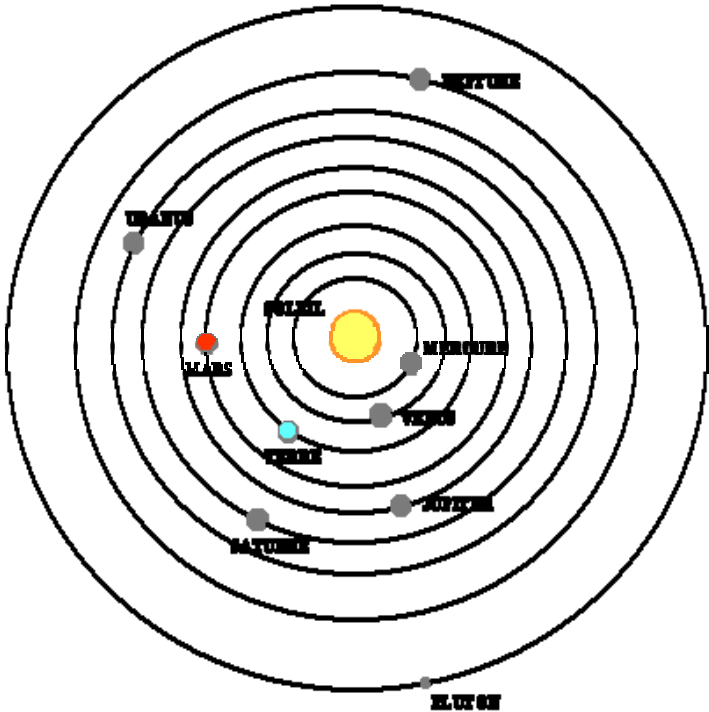


**Color Key**

- Stable
- Spontaneous fission
- Alpha particle emission
- Beta minus emission
- Beta plus emission or electron capture

# Notre sujet d'étude : le noyau

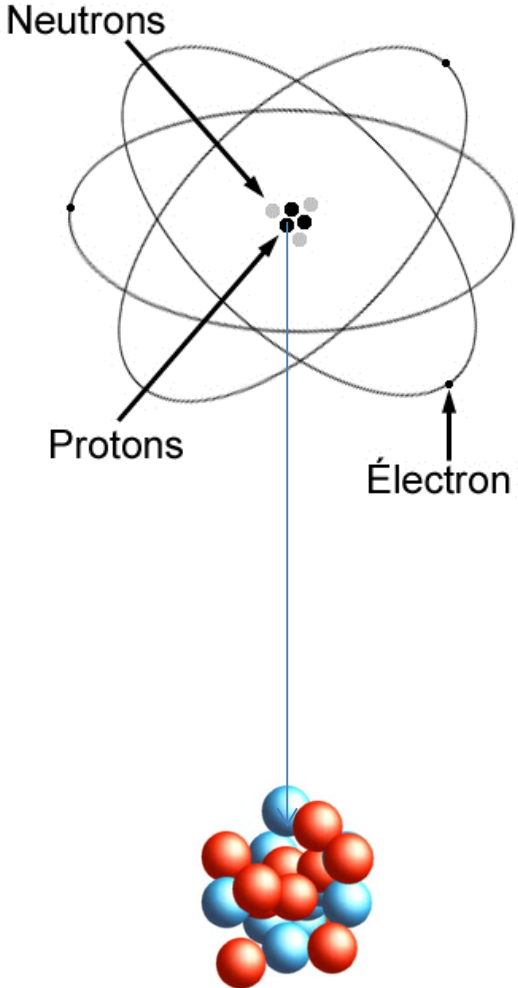
## La gravité



**Le Système Solaire et ses Planètes**

## L'atome et la force électromagnétique

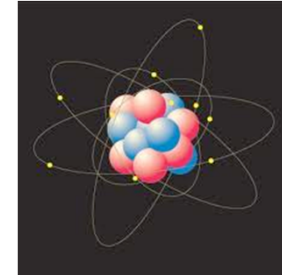
### Atome





# Notre sujet d'étude : le noyau

- Le noyau est composé de A nucléons: N neutrons et Z proton



- Ces particules obéissent aux règles de la mécanique quantique
- Ce ne sont pas des objets « durs » mais des ondes qui suivent l'équation de Schrödinger

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x)\psi = E\psi$$

- Le noyau est composé de particules chargées ou non qui ont un spin
- Les nucléons interagissent entre eux via 3 forces : forte, faible et Coulombienne

# Notre sujet d'étude : le noyau

$$M(Z, A) = Z.M_p + N.M_n - B(Z, A)$$

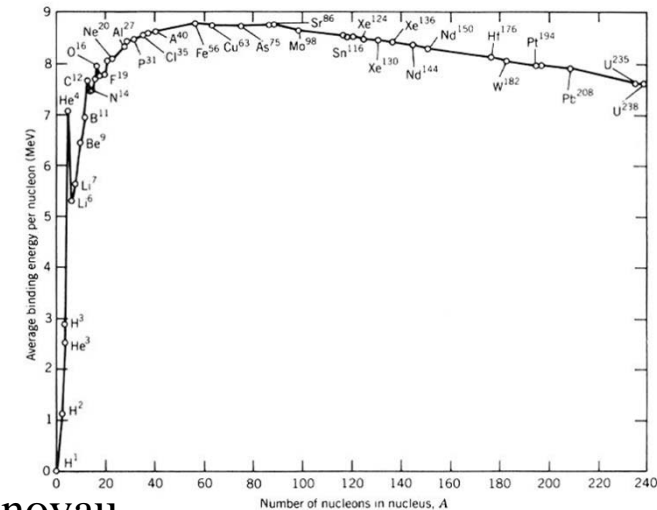
- L'énergie de liaison sature:  
la portée de l'interaction est plus courte que la taille du noyau
- L'interaction est indépendante de la charge électrique (n-n == p-n ~~-p-p)
- Certains noyaux sont plus liés que d'autres
- Les noyaux pairs sont plus liés que les impairs

→ Nombres magiques

→ Force de Pairing

Pas de force central  
Pas de comportement statistique (N<300)

} Difficile à modéliser



Quelles combinaisons de protons et de neutrons sont possibles?

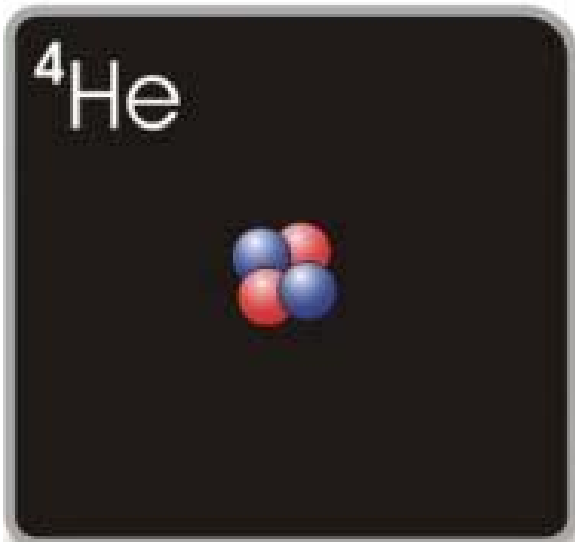
TABLEAU DE MENDELEIEV

Legend:

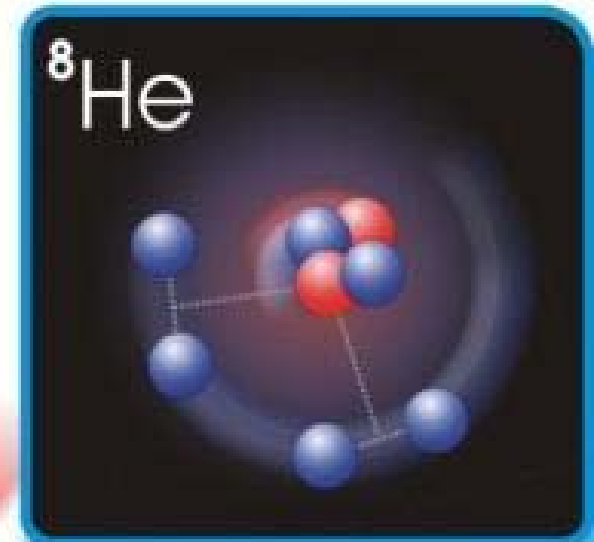
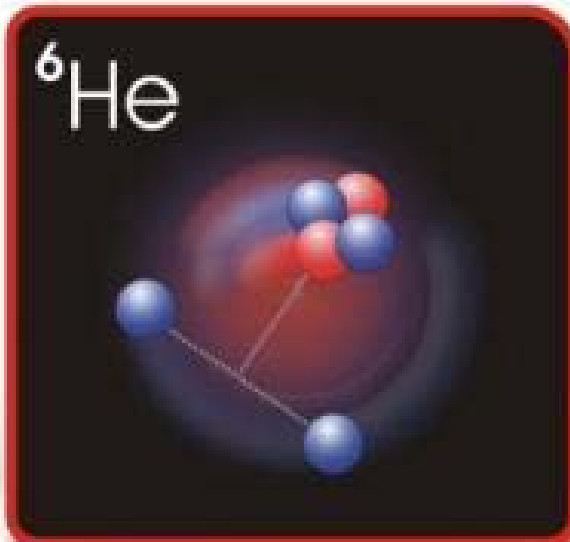
- Métaux de transition
- Halogènes
- Métaux pauvres
- Non-métaux
- Gaz rares
- Lanthanides
- Actinides
- Métaux alcalins
- Métaux alcalino-terreux

Columns: I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII

Rows: 1 to 7



2 protons  
2 neutrons



2 protons  
6 neutrons

3 fois plus de neutrons que de protons

# Quelles combinaisons de protons et de neutrons sont possibles?

Plomb : 82 protons

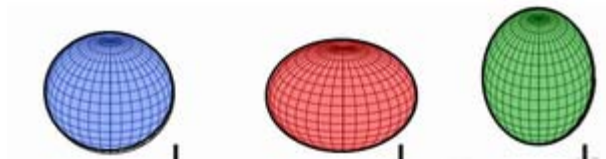


TABLEAU DE MENDELEIEV

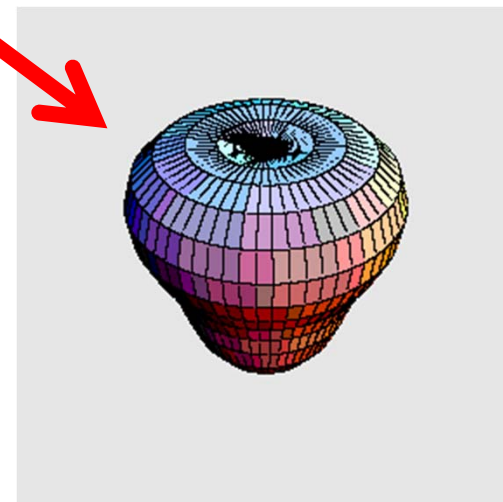
- Métaux de transition
- Halogènes
- Métaux pauvres
- Non-métaux
- Gaz rares
- Lanthanides
- Actinides
- Métaux alcalins
- Métaux alcalino-terreux

I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII	
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	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uu	Uub	Uuq	Uuh	Uuo	Uu	Uu	Uu	Uu
		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

178Pb	179Pb	180Pb	181Pb	182Pb	183Pb	184Pb	185Pb	186Pb	187Pb	188Pb	189Pb	190Pb	191Pb	192Pb	193Pb	194Pb	195Pb	196Pb	197Pb	198Pb	199Pb	200Pb	201Pb
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------



202Pb	203Pb	204Pb	205Pb	206Pb	207Pb	208Pb	209Pb	210Pb	211Pb	211Pb	212Pb	213Pb	214Pb	215Pb	216Pb
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------



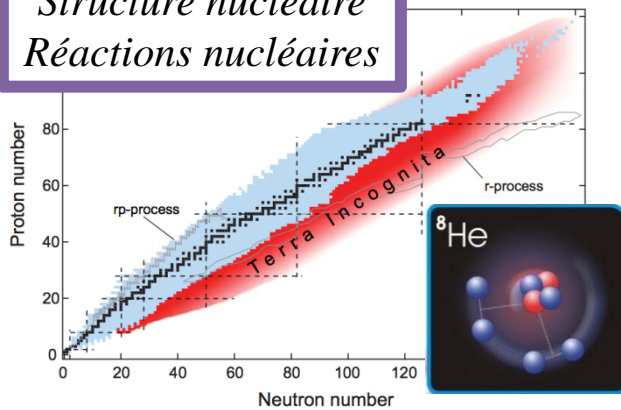
# L'étude des noyaux stables et radioactifs au GANIL

Pour comprendre le noyau atomique, on va au GANIL :

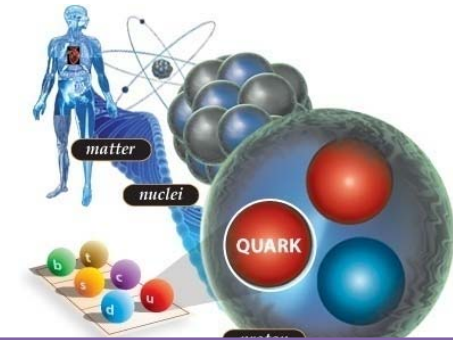
- essayer de comprendre comment il est fabriqué dans les étoiles
  - > **Astrophysique nucléaire**
- déterminer comment les protons et les neutrons sont organisés
- déterminer sa taille, sa forme, sa robustesse
  - > **Structure nucléaire**
- étudier sa réponse à une excitation
  - > **Dynamique nucléaire**
- observer sa décroissance radioactive
  - > **Interactions faible et forte**
- étudier ce qui se passe quand on le fait interagir avec un autre noyau
  - > **propriétés « thermodynamiques » du noyau**

# La recherche en physique nucléaire et ses applications

## Structure nucléaire Réactions nucléaires

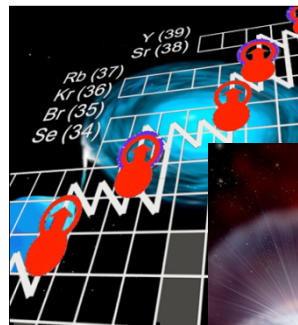
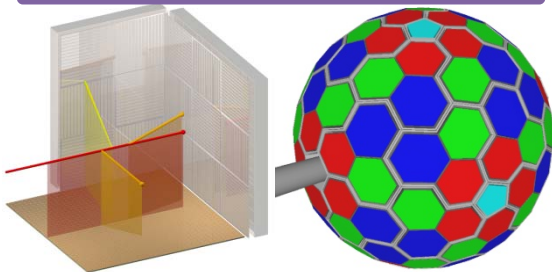


## Faisceaux d'ions Faisceaux de neutrons



## Interactions fondamentales

## Instrumentation/Détection



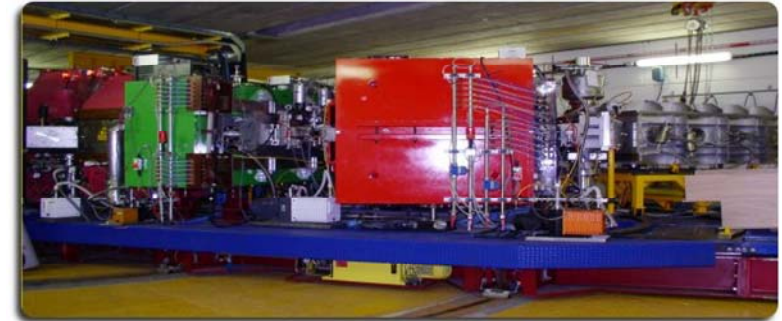
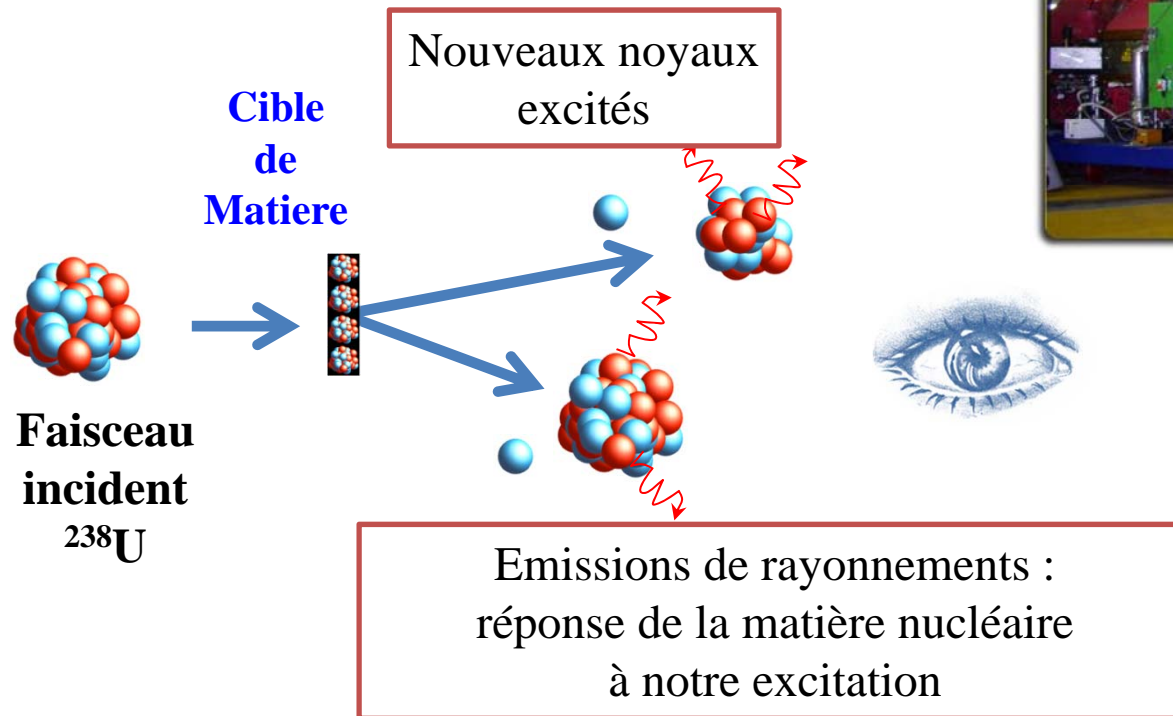
## Astrophysique nucléaire

## Applications



# Collisions Nucléaires :

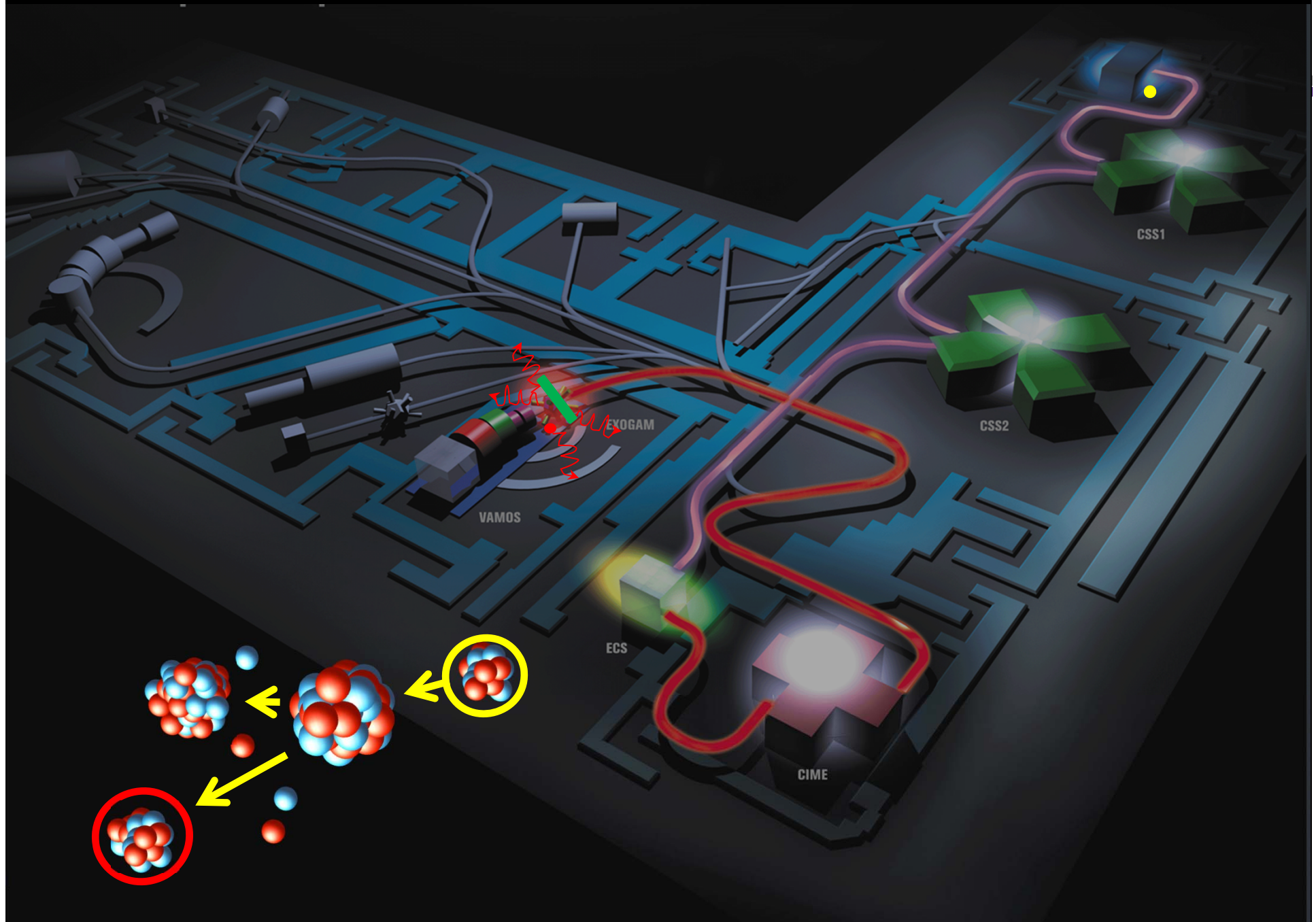
- 1) Créer de nouveaux noyaux
- 2) Exciter les noyaux pour les observer et les comprendre



Détecteurs

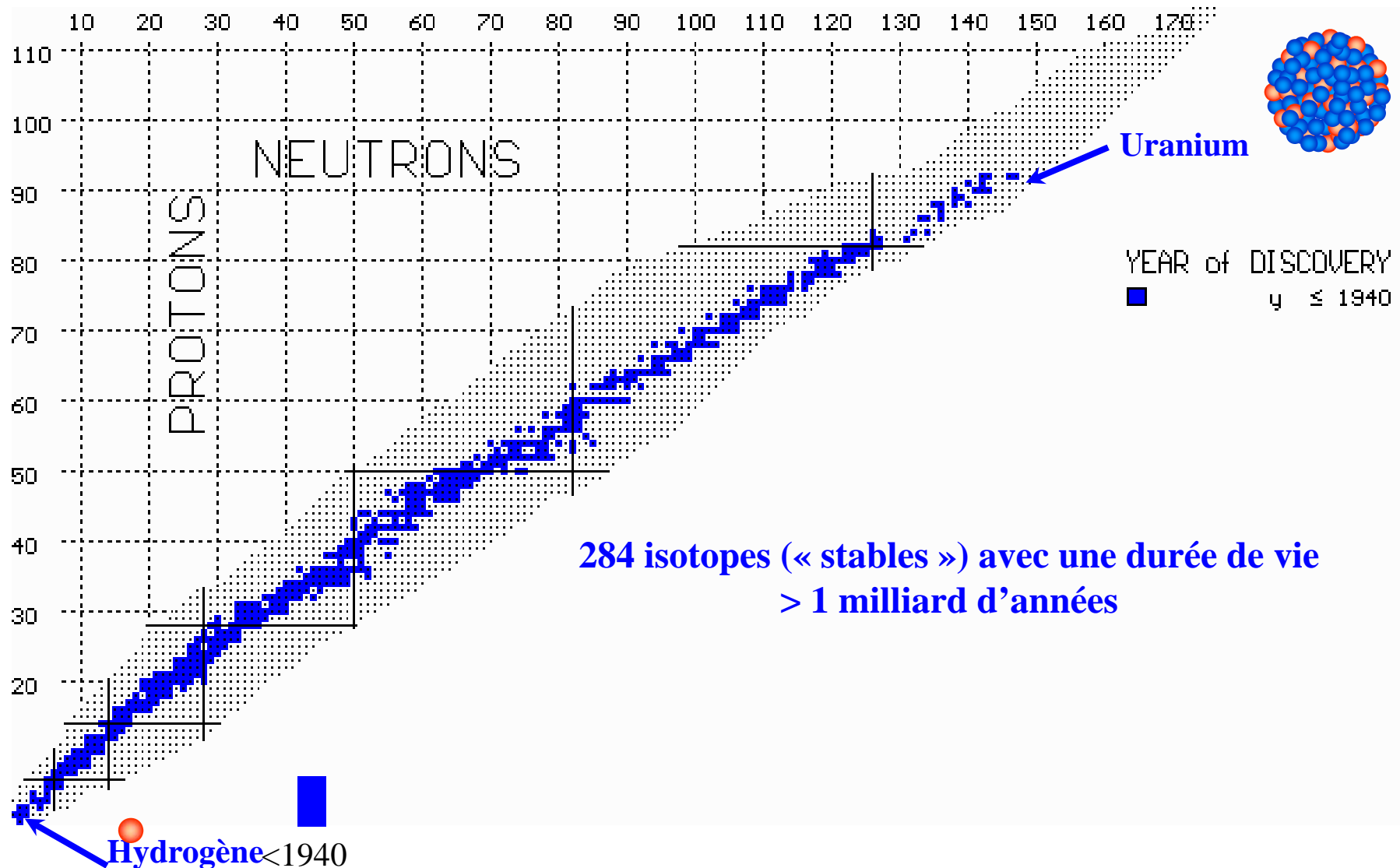


# Production et étude des noyaux radioactifs

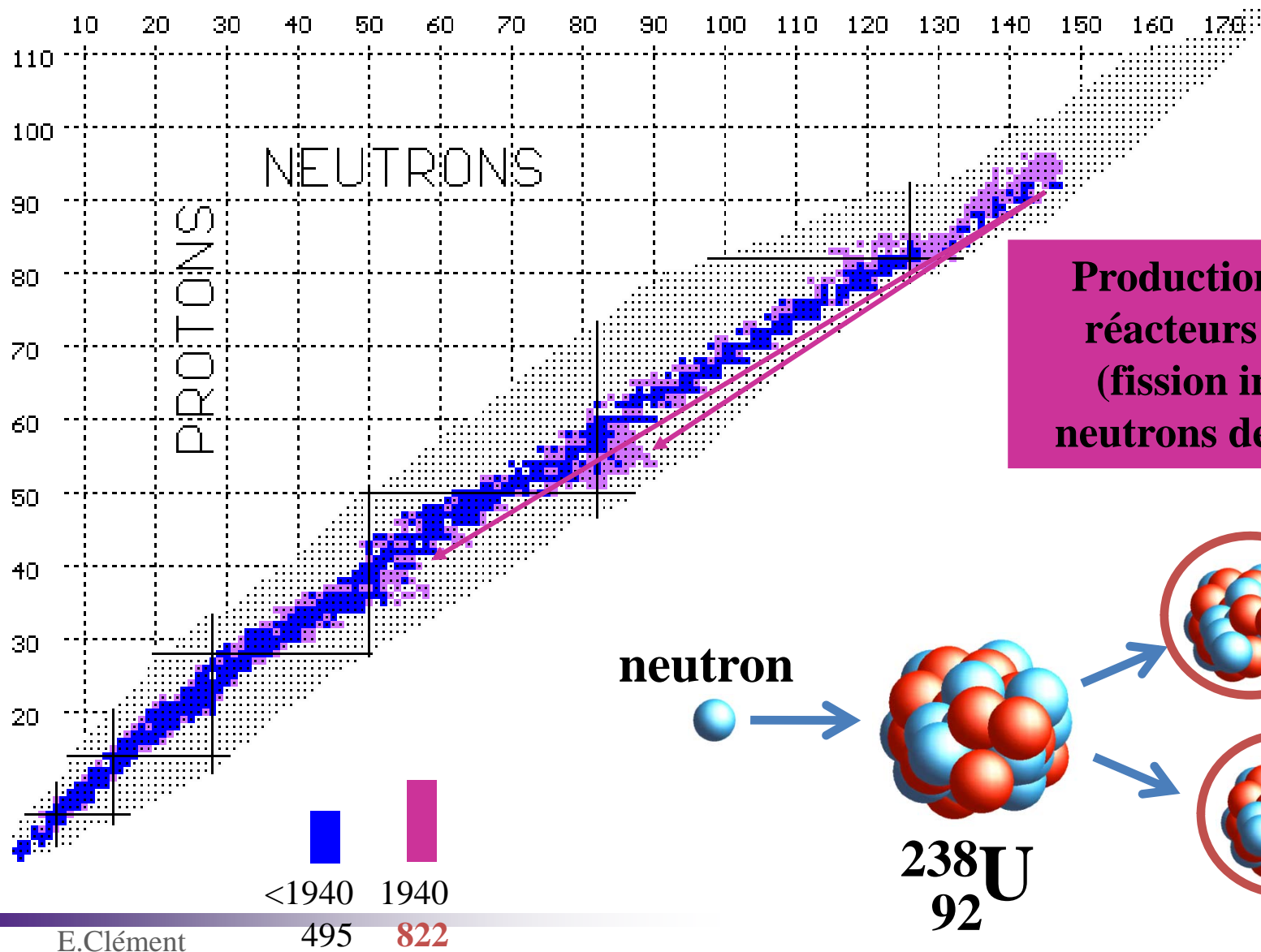




# Le terrain de jeu du physicien nucléaire avant 1940

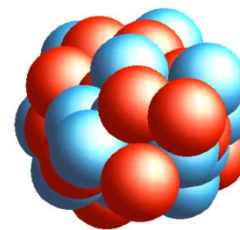


# Le terrain de jeu du physicien nucléaire en 1940

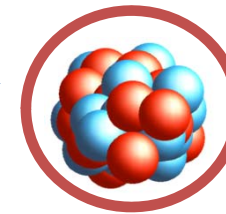
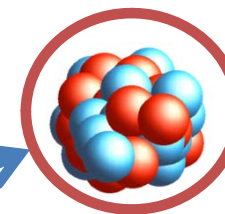


Production auprès de réacteurs nucléaires (fission induite par neutrons de l'uranium)

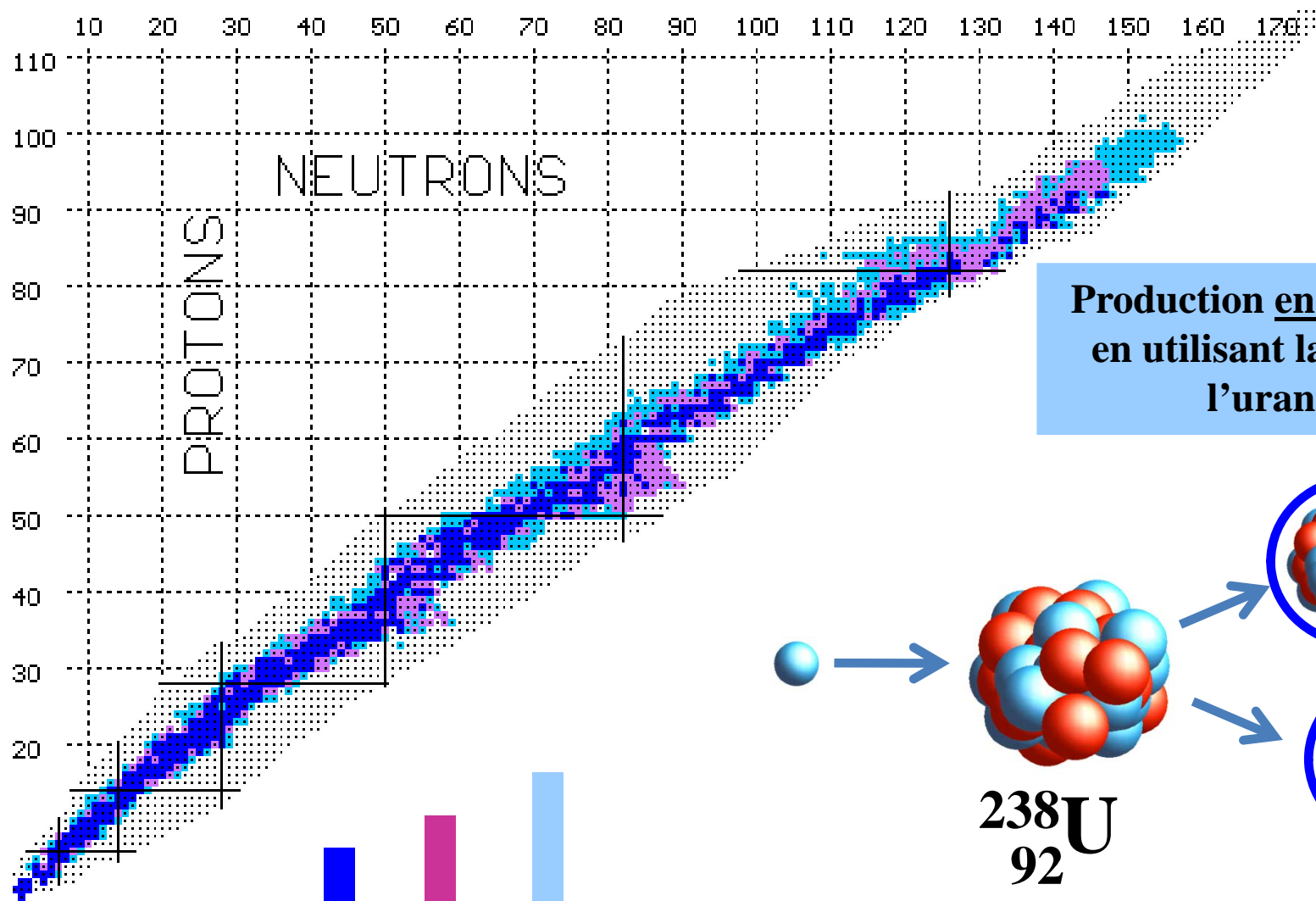
neutron



$^{238}_{92}\text{U}$

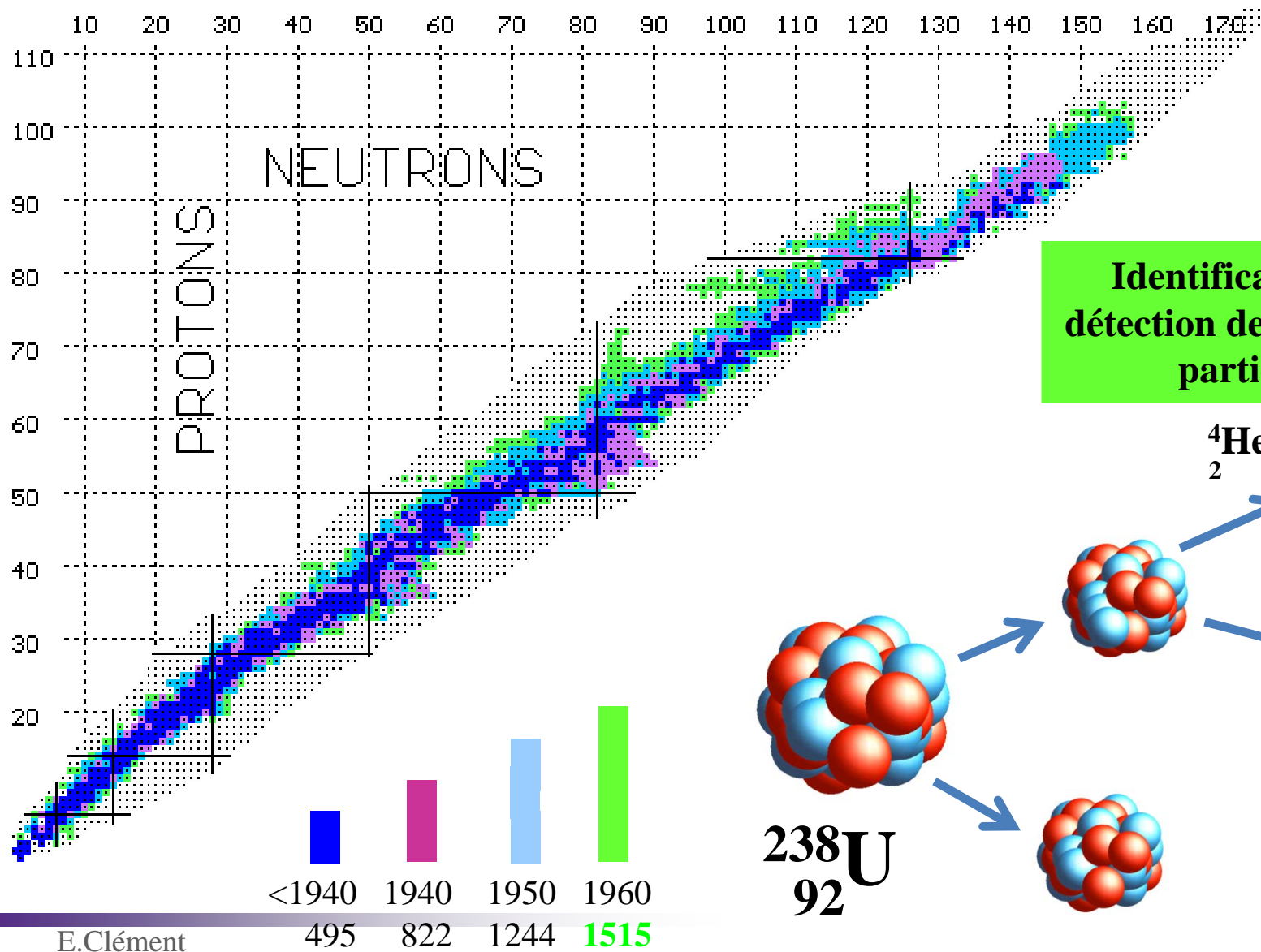


# Le terrain de jeu du physicien nucléaire en 1950

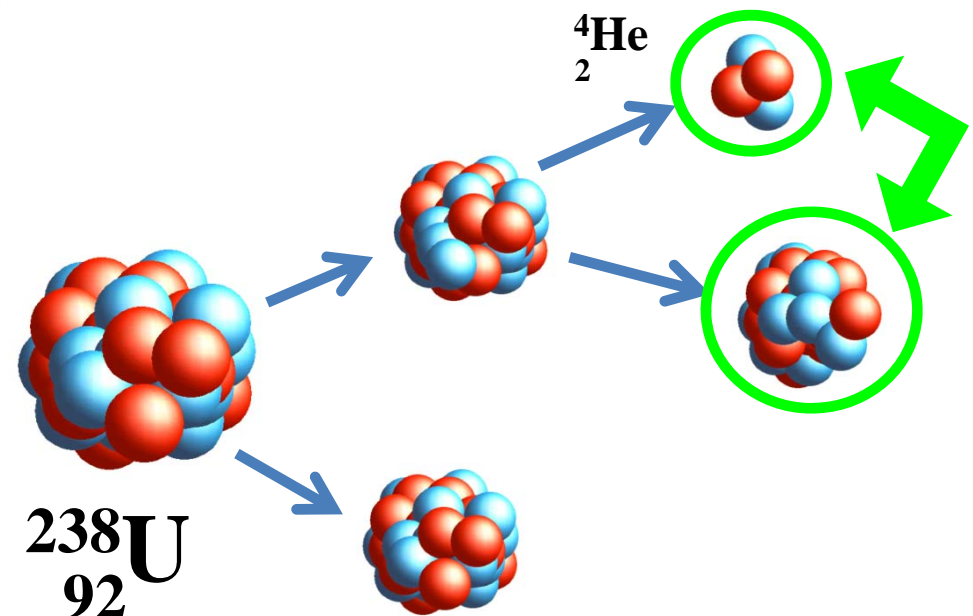


<1940	1940	1950
495	822	1244

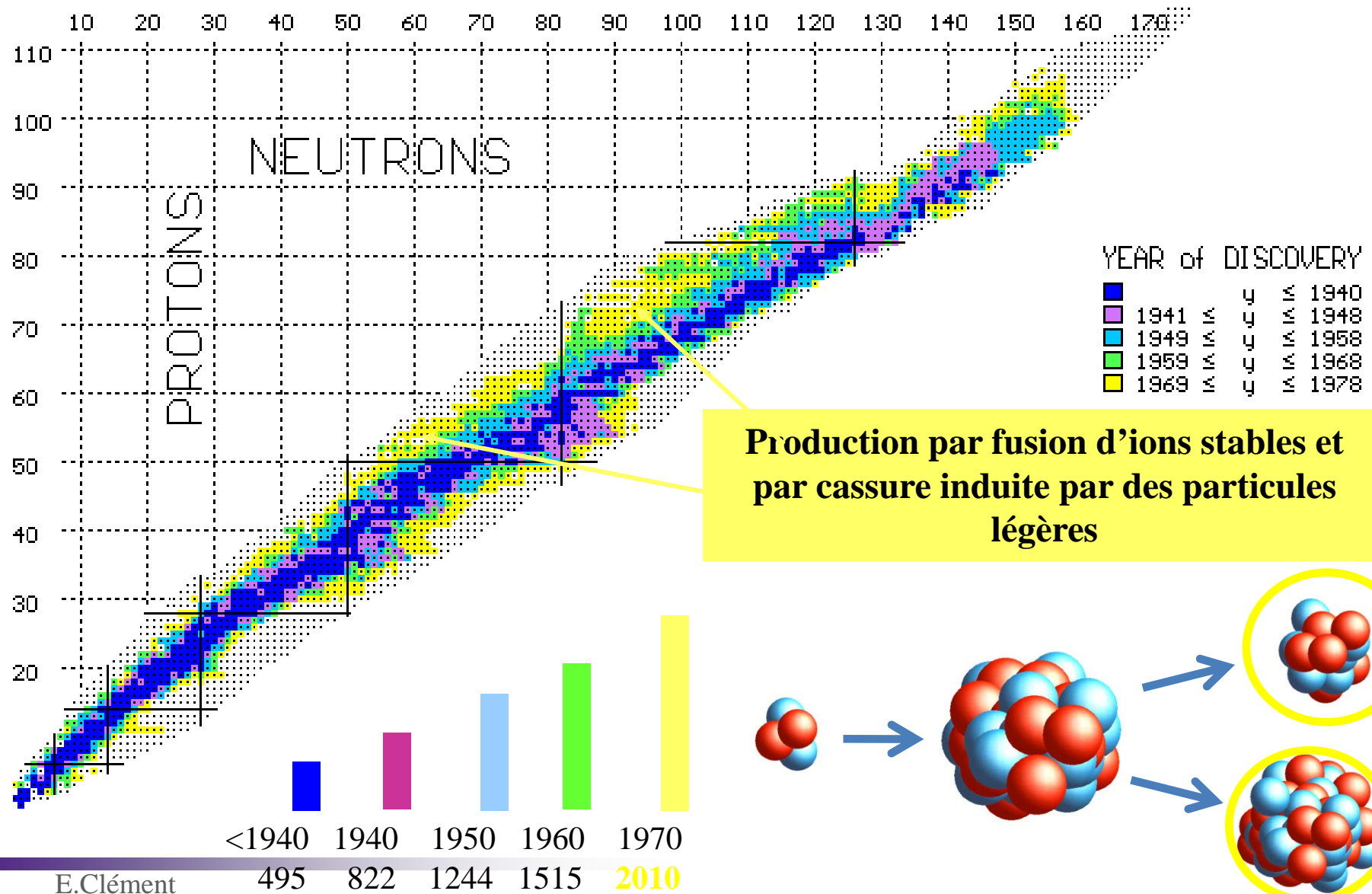
# Le terrain de jeu du physicien nucléaire en 1960



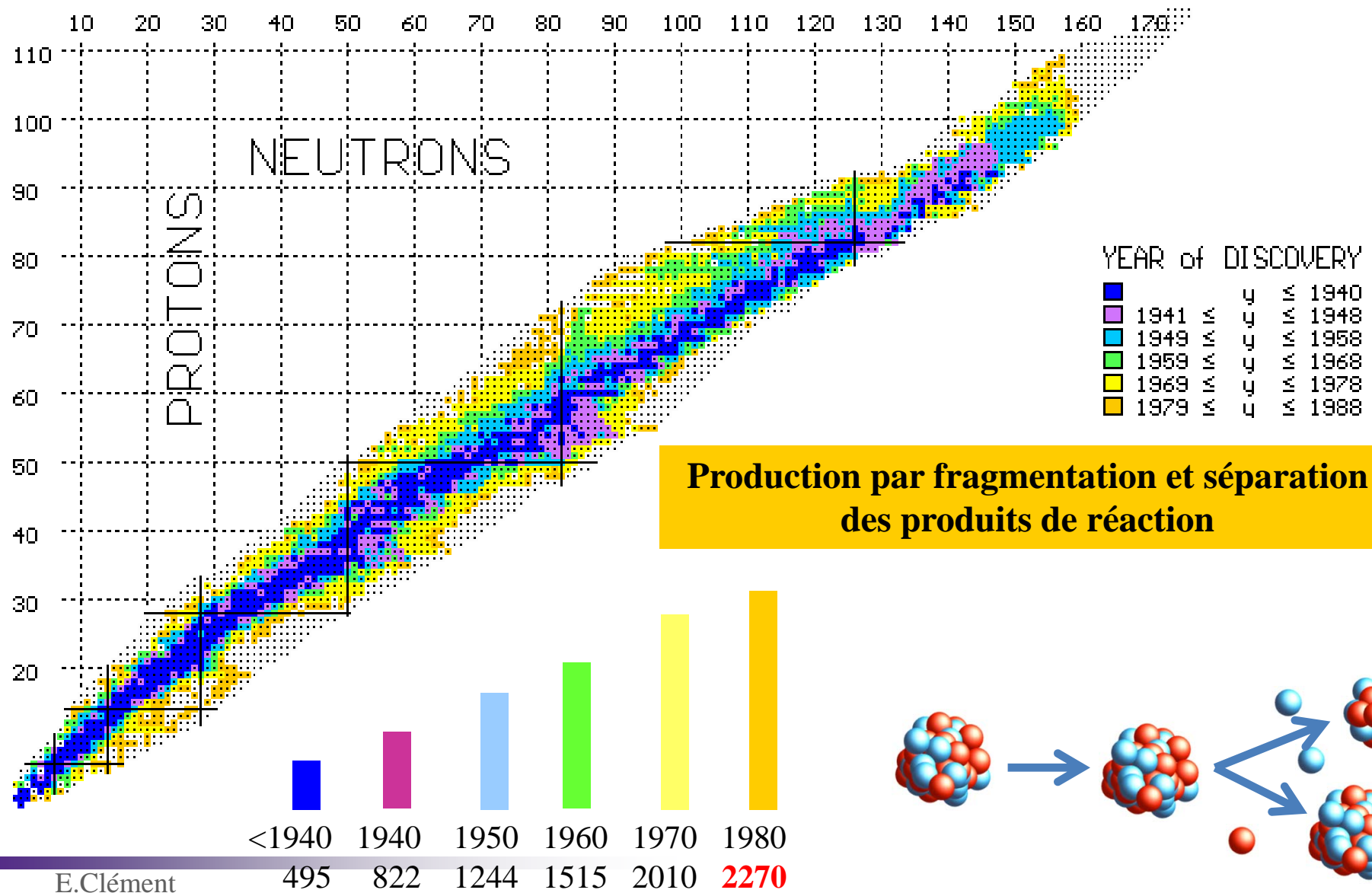
Identification par la  
détection de l'émission de  
particules  $\alpha$



# Le terrain de jeu du physicien nucléaire en 1970 (accélérateurs de « particules »)

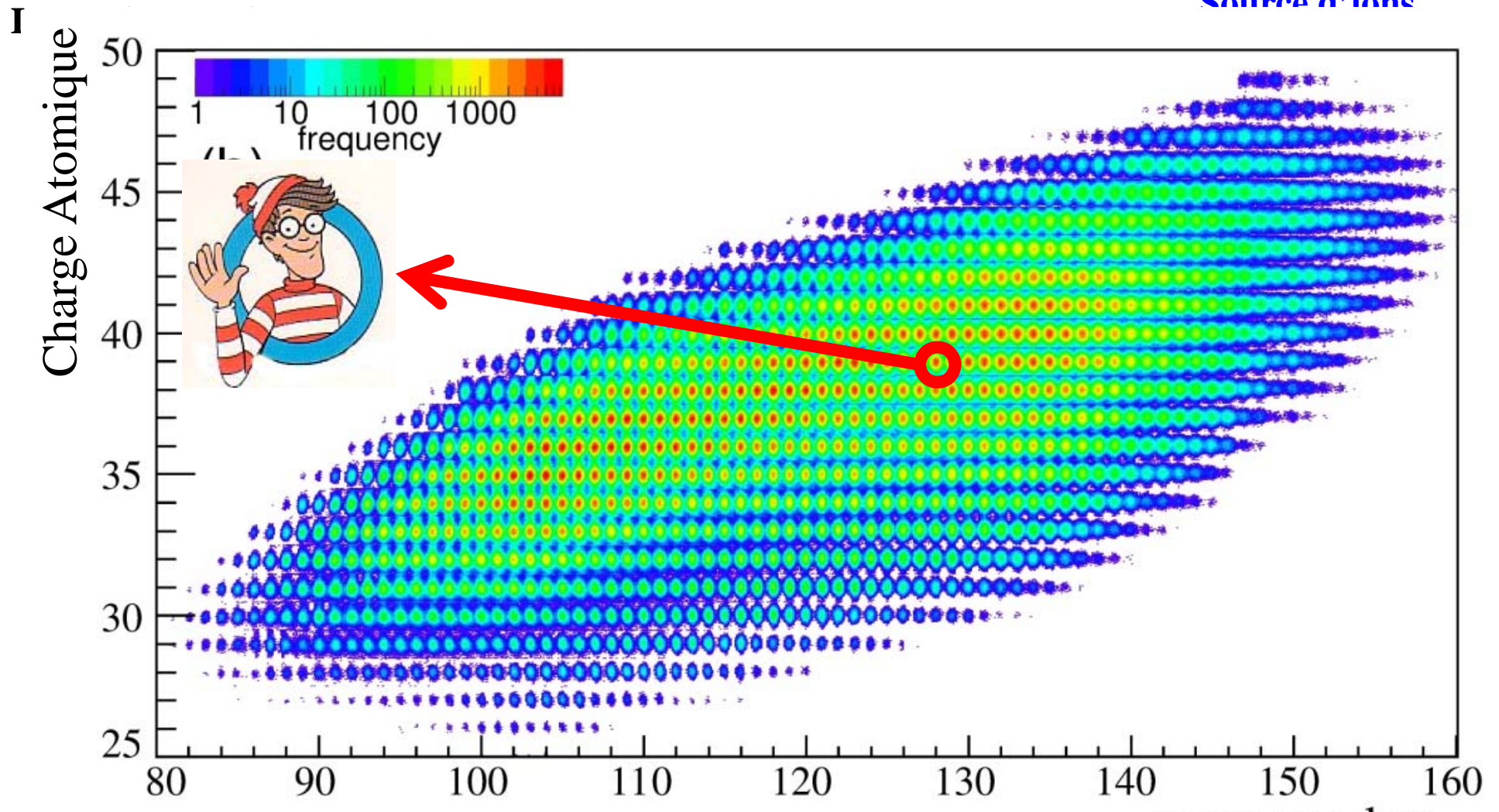


# Le terrain de jeu du physicien nucléaire en 1980 (des accélérateurs toujours plus puissants)



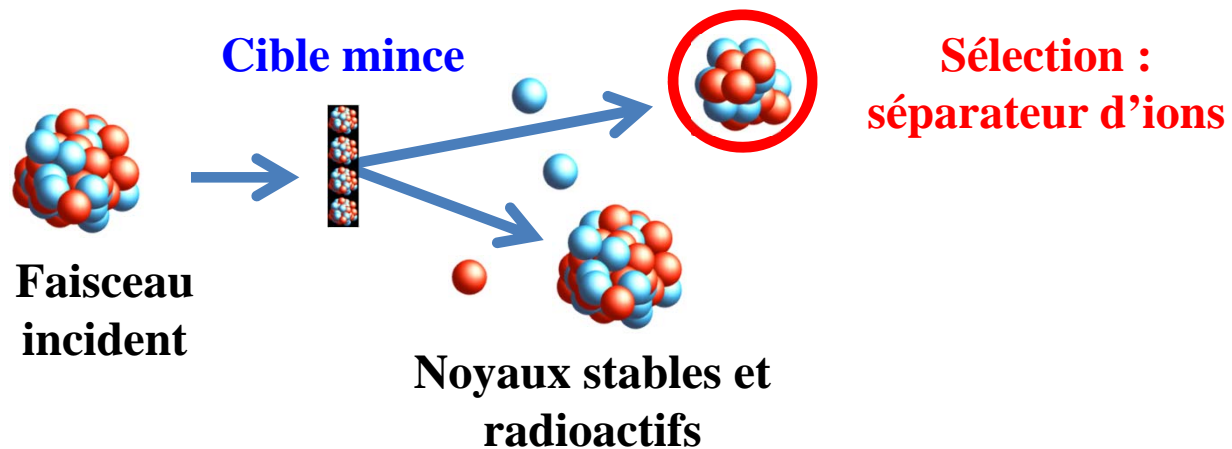
# La production de noyaux radioactifs au GANIL

Source d'ions

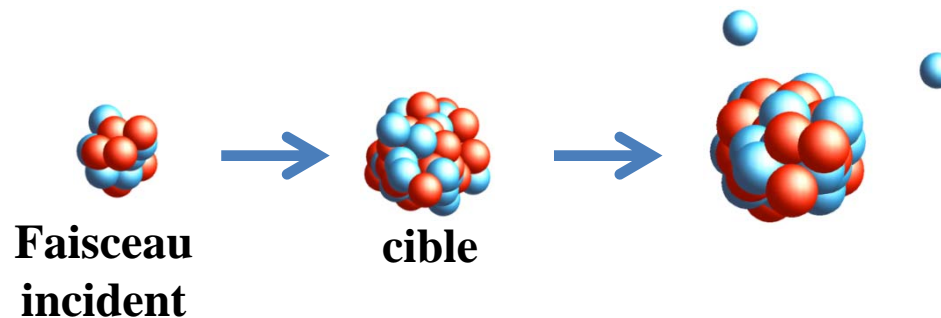


# Les modes de production d'ions radioactifs auprès de GANIL

## \* La fragmentation en vol dans une cible mince



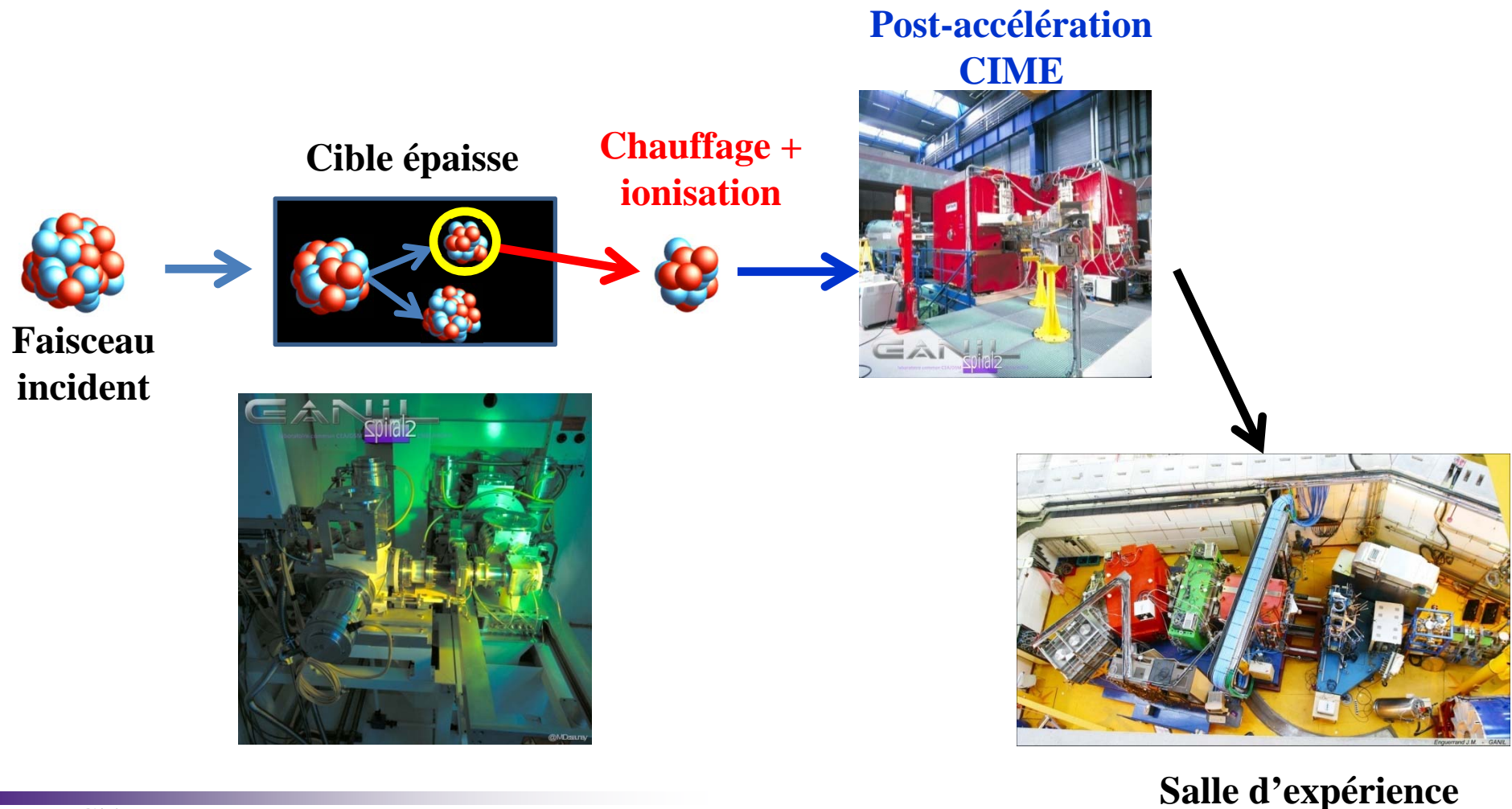
## \* La fusion d'ions lourds stables dans une cible mince





# Les modes de production d'ions radioactifs auprès de SPIRAL1

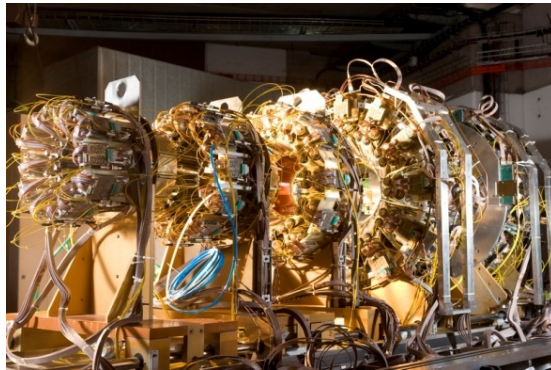
\* La fragmentation dans une cible épaisse



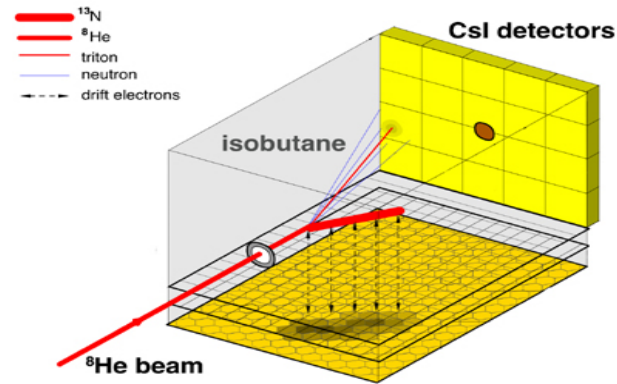
# Exemples de détecteurs utilisés au GANIL

laboratoire commun CNRS/CEA/IN2P3 Université de Caen

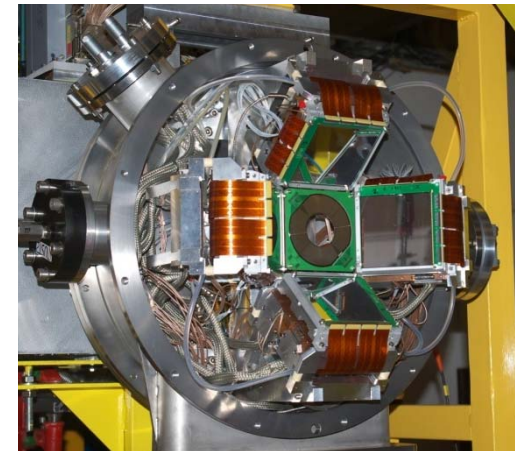
## INDRA



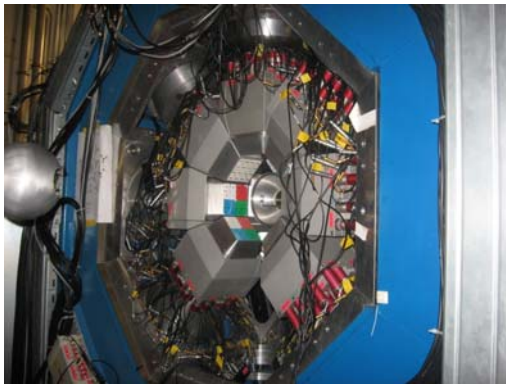
## MAYA



## MUST2



## EXOGRAM



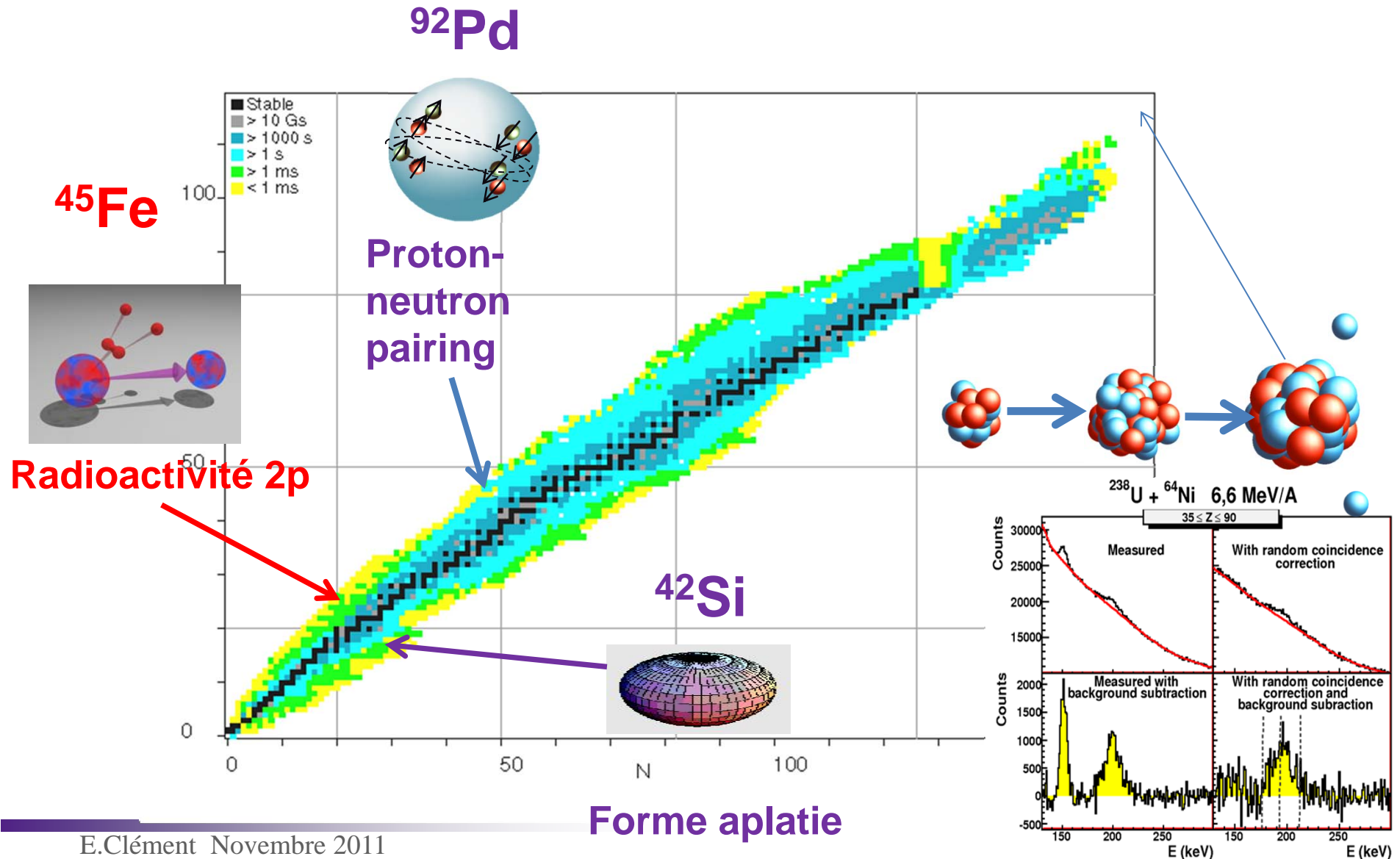
## VAMOS

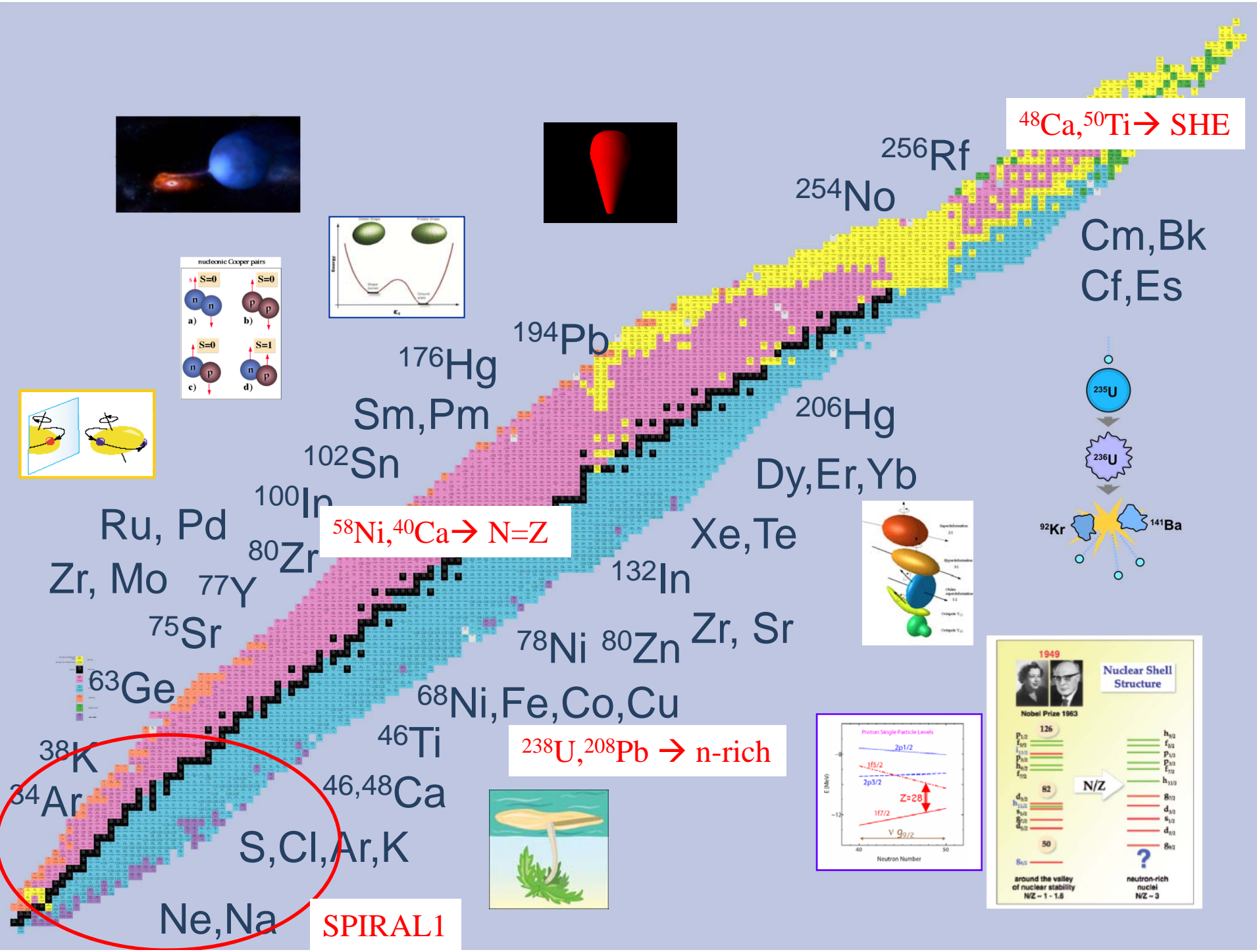


## Nwall



# Exemples de découvertes de propriétés particulières du noyau atomique





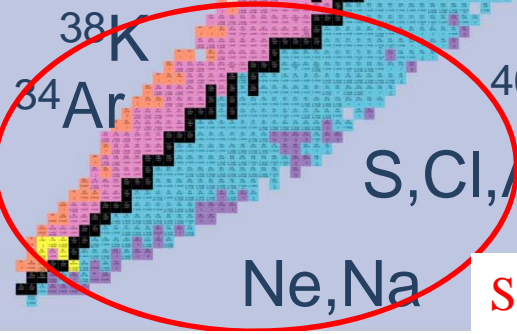
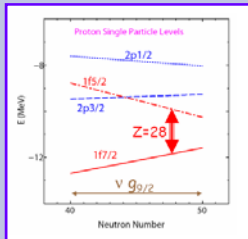
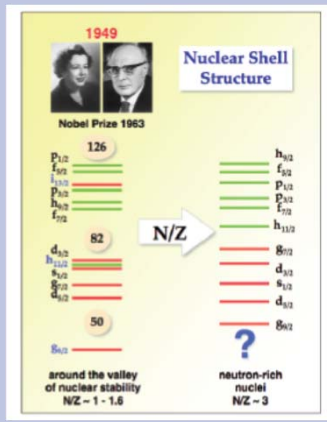
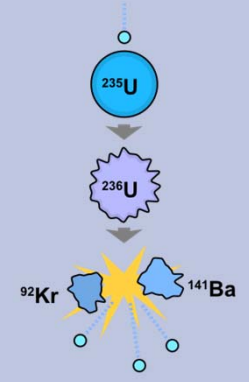
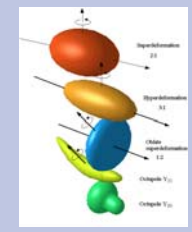
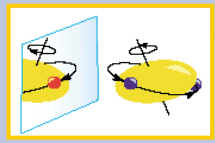
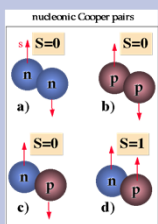
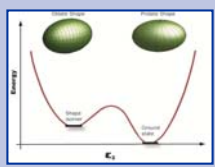
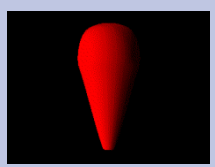
$^{48}\text{Ca}, ^{50}\text{Ti} \rightarrow \text{SHE}$

Cm, Bk  
Cf, Es

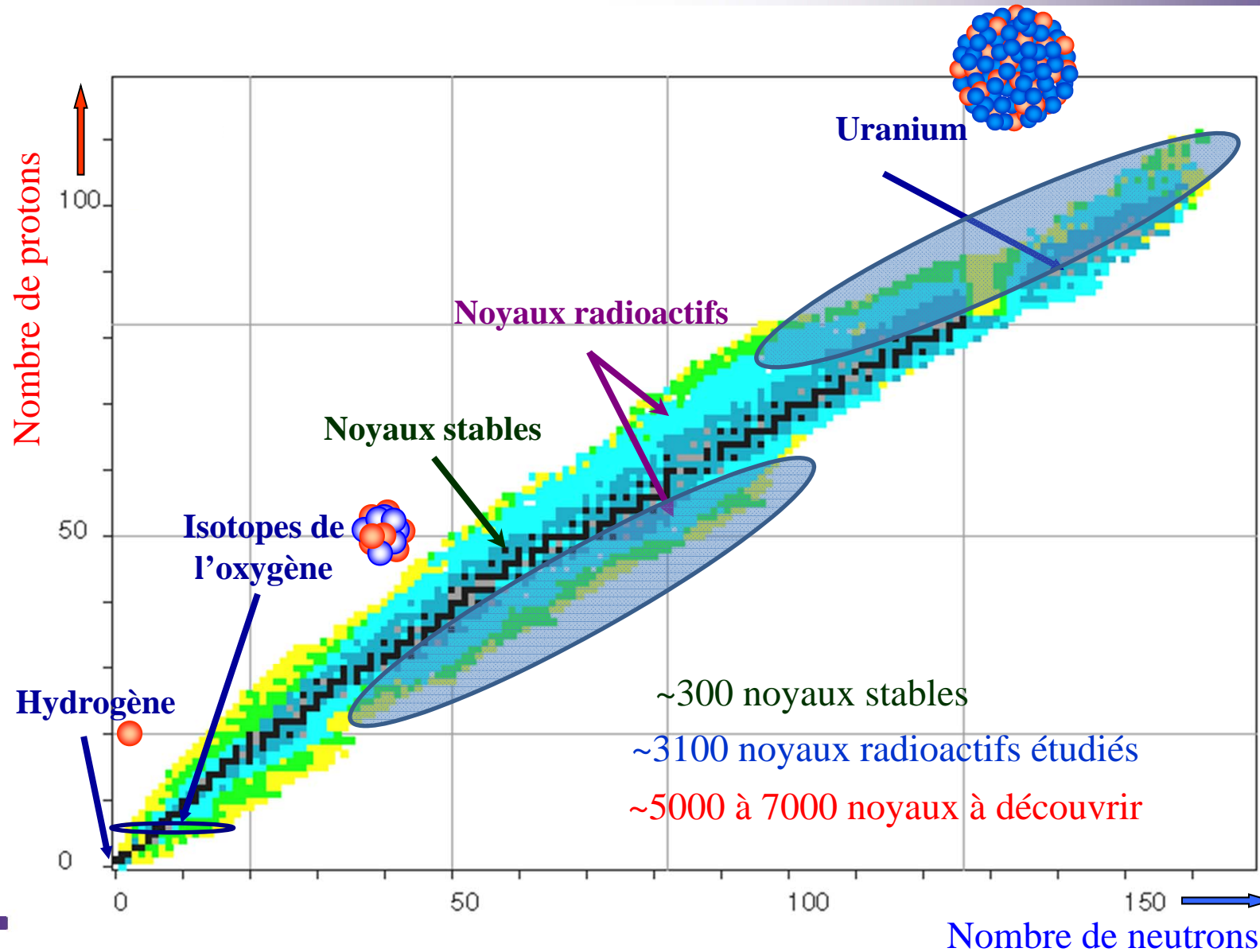
$^{58}\text{Ni}, ^{40}\text{Ca} \rightarrow N=Z$

$^{238}\text{U}, ^{208}\text{Pb} \rightarrow n\text{-rich}$

SPIRAL1

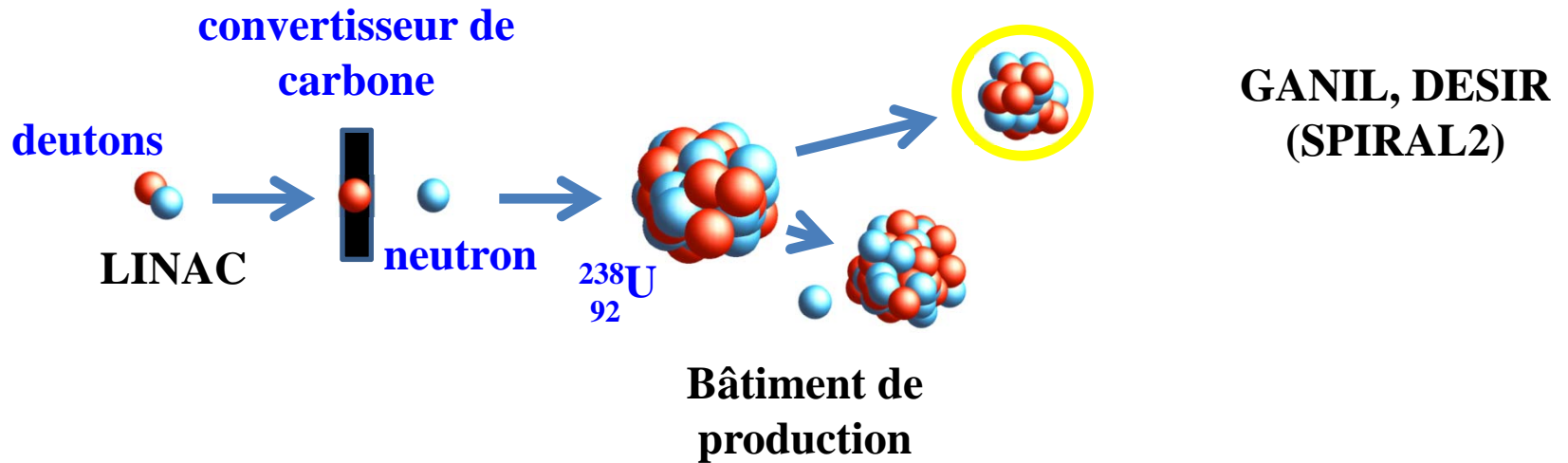


# Le terrain de jeu du physicien nucléaire aujourd'hui : la carte des noyaux

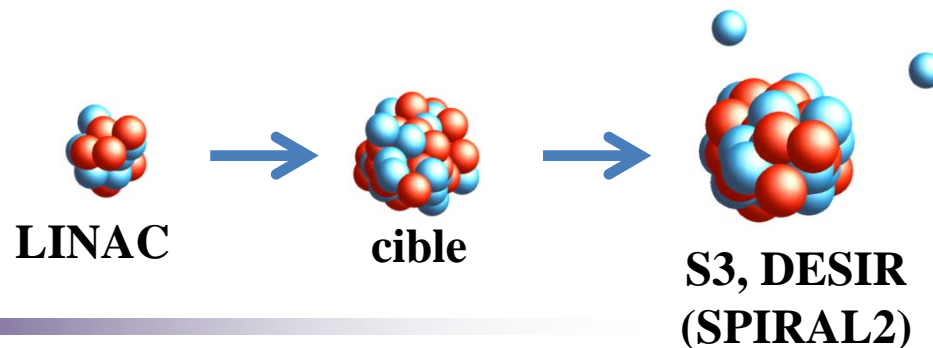


# Les modes de production d'ions radioactifs auprès de SPIRAL2

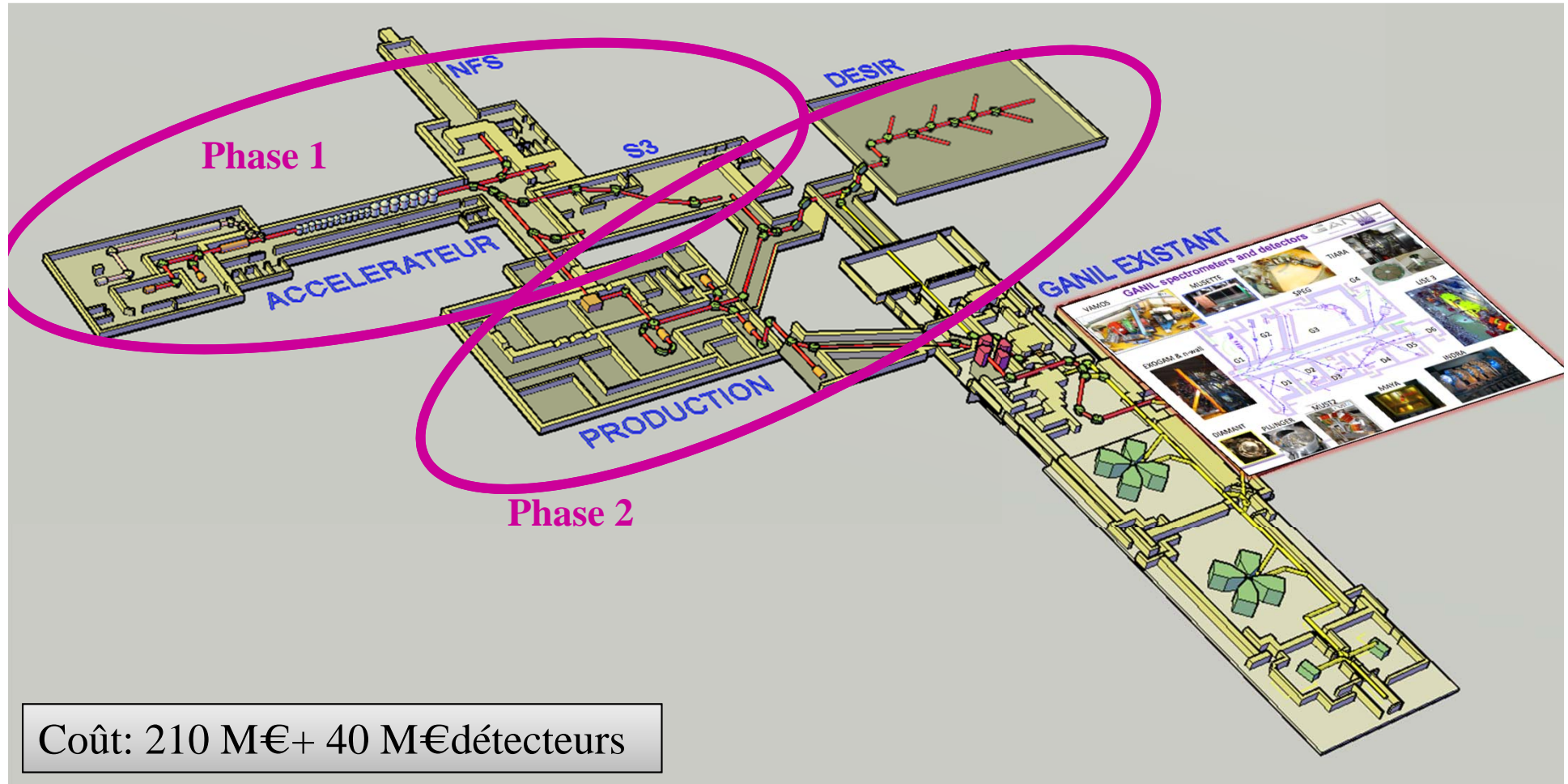
## \* La fission induite de l'uranium naturel avec des neutrons



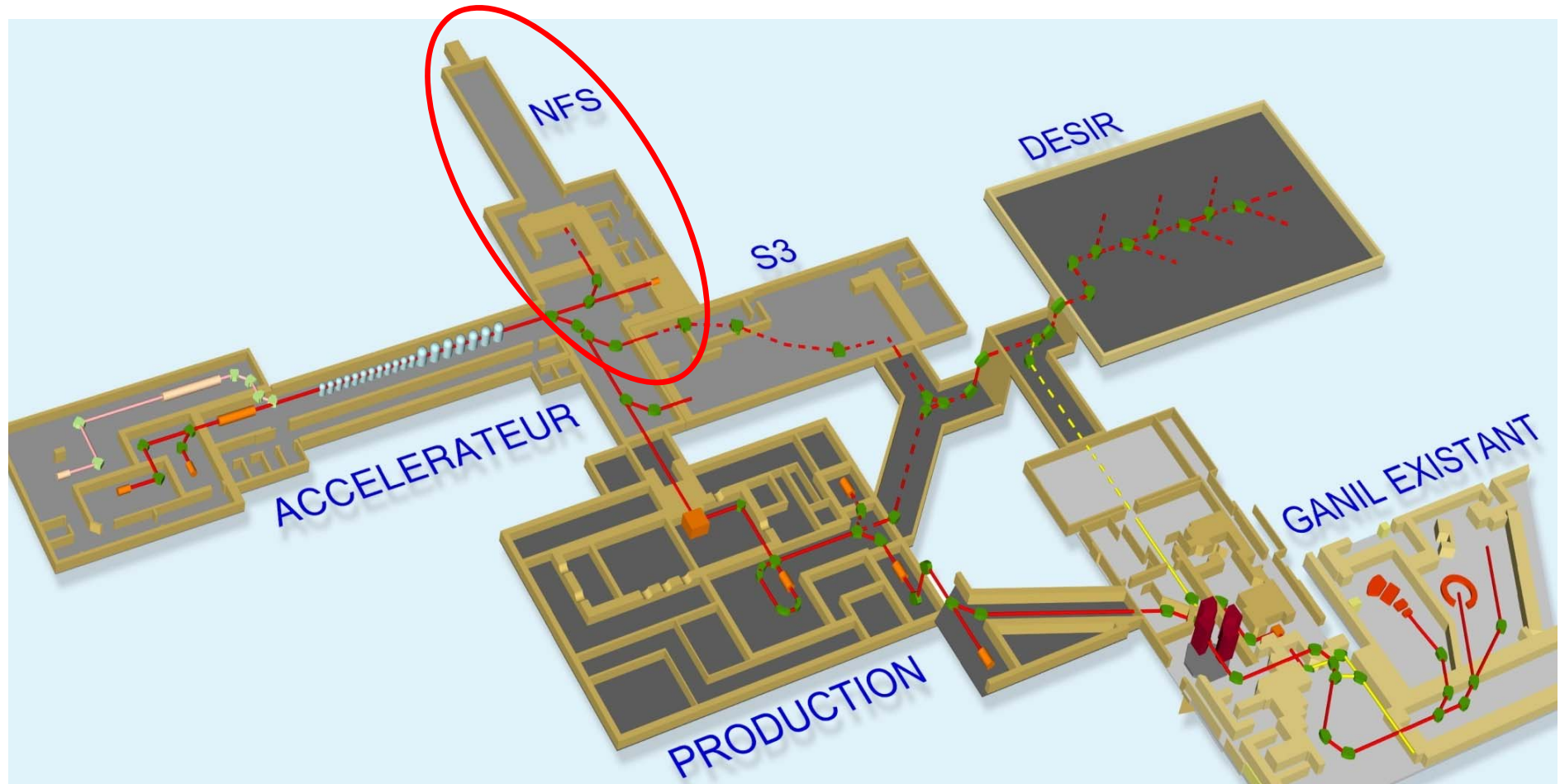
## \* La fusion d'ions lourds stables



# S'ouvrir de nouveaux horizons avec (GANIL-)SPIRAL2



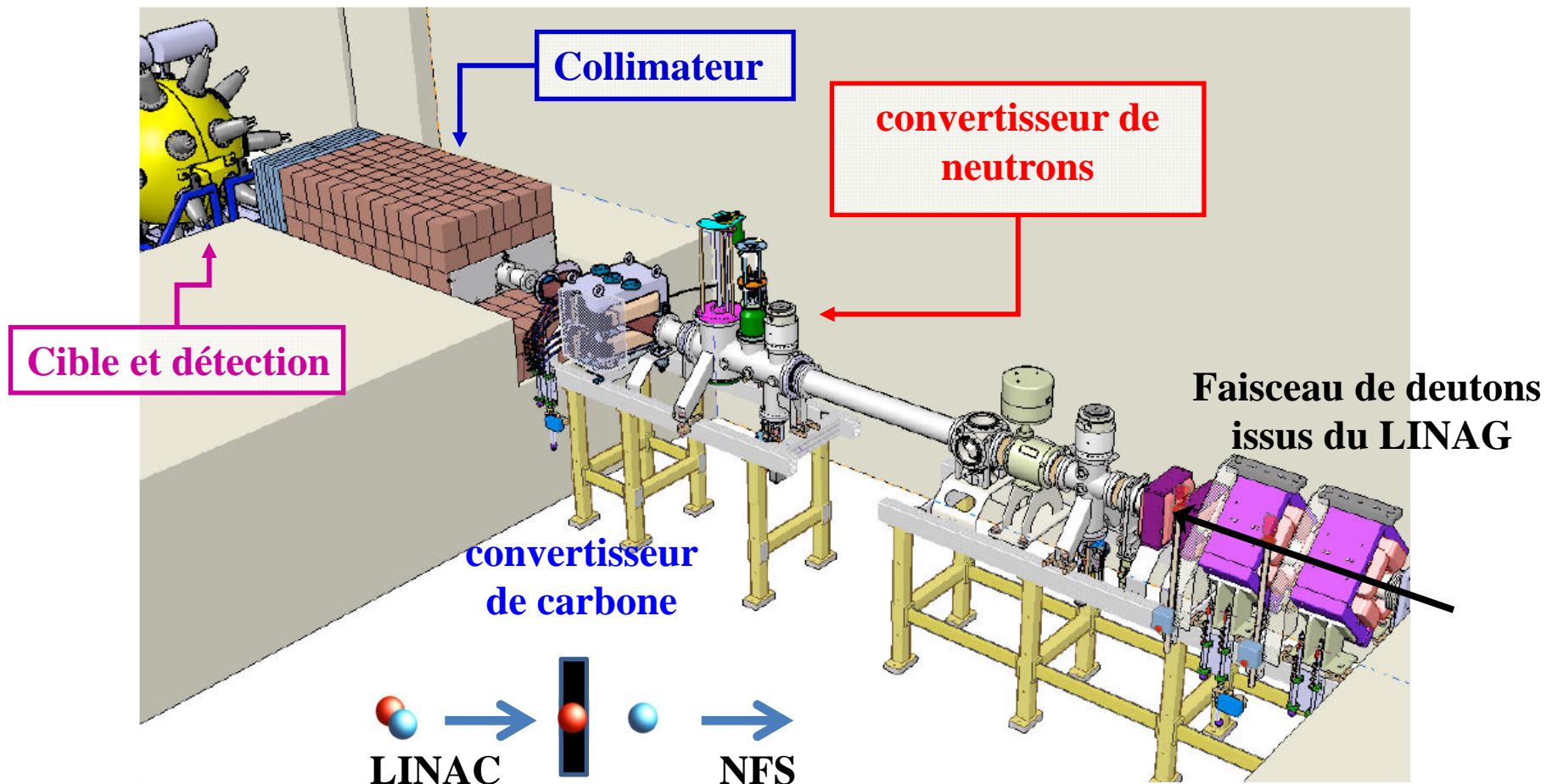
# L'installation (de faisceaux de neutrons) NFS



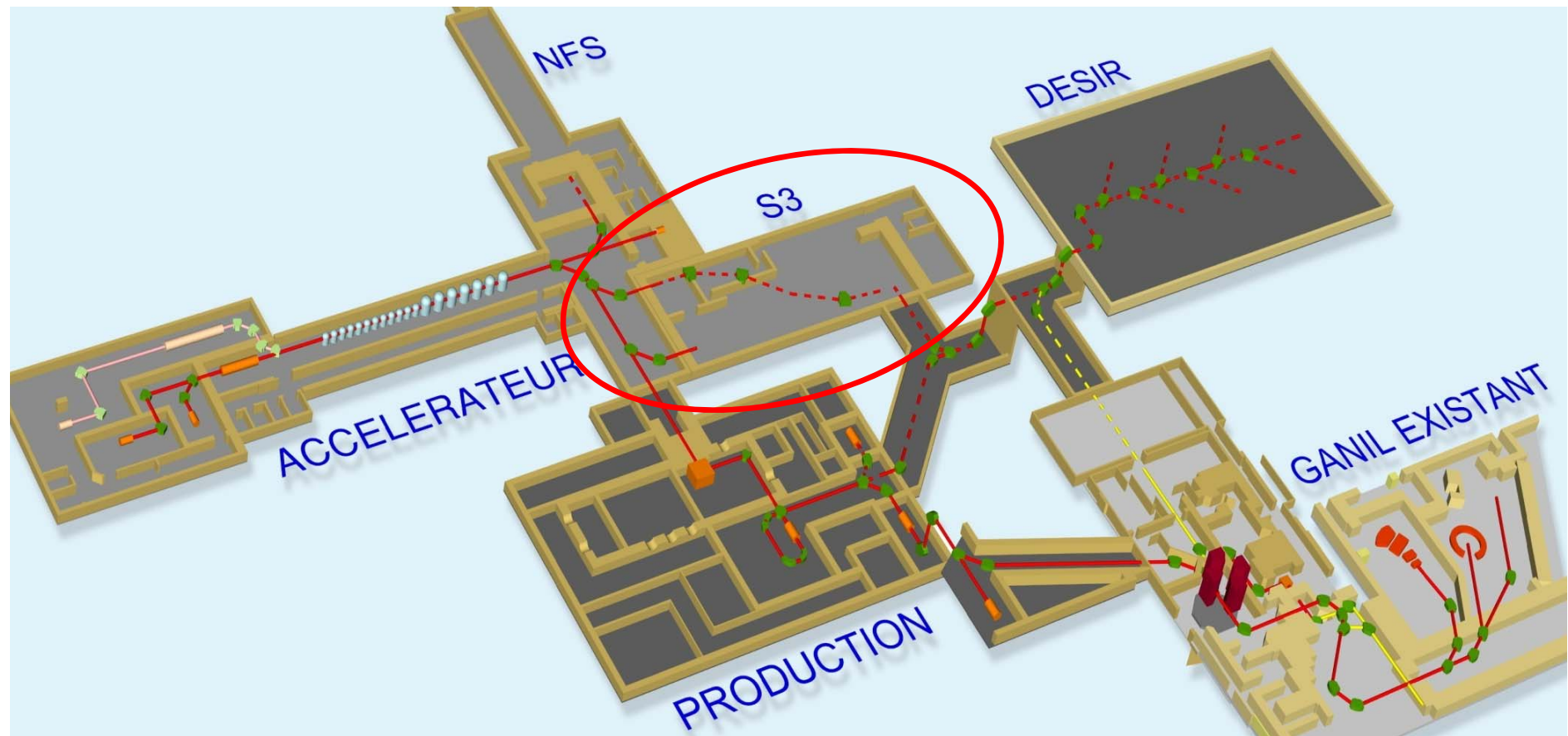


# NFS

Un outil pour étudier les réactions nucléaires induites par neutrons (physique fondamentale) et pour l'étude du vieillissement des matériaux sous flux de neutrons



# L'installation S3

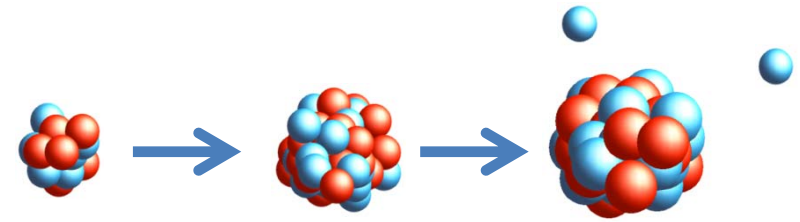


# Le Super-Spectromètre-Séparateur S3

Un outil pour produire et étudier des noyaux très exotiques par fusion de noyaux stables

Faisceau d'ions  
issus du LINAC  
- stables  
- très intense

cible de production  
(fusion)



Purification à  
basse énergie

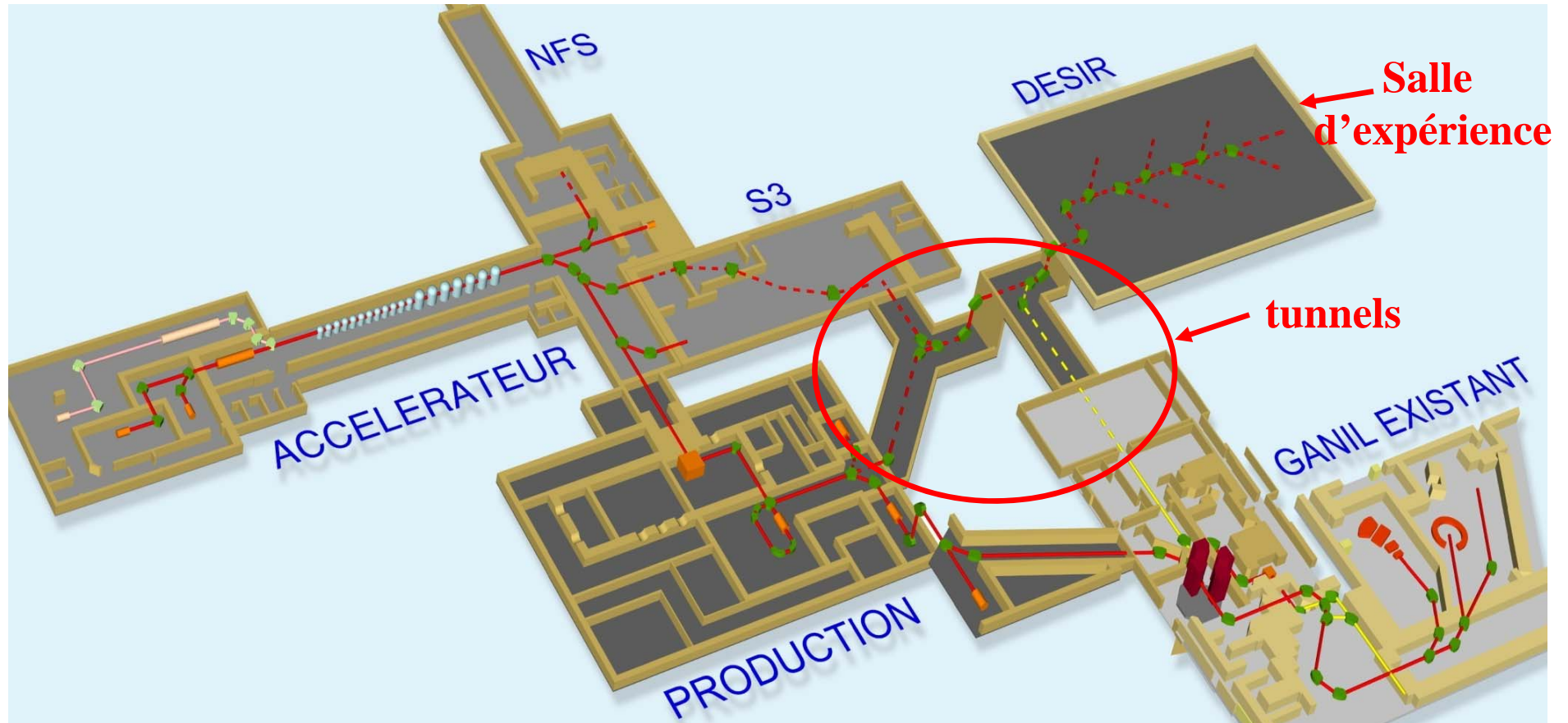
1<sup>ère</sup> sélection

2<sup>ème</sup> sélection

Détection

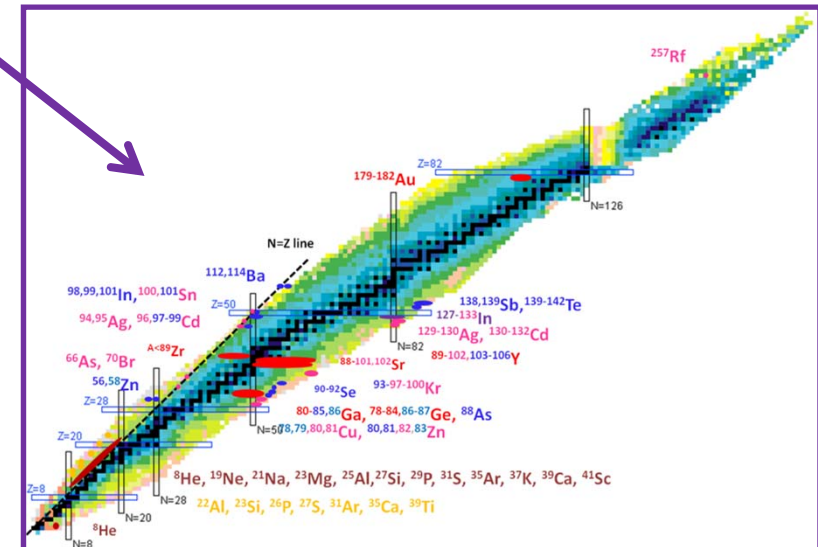
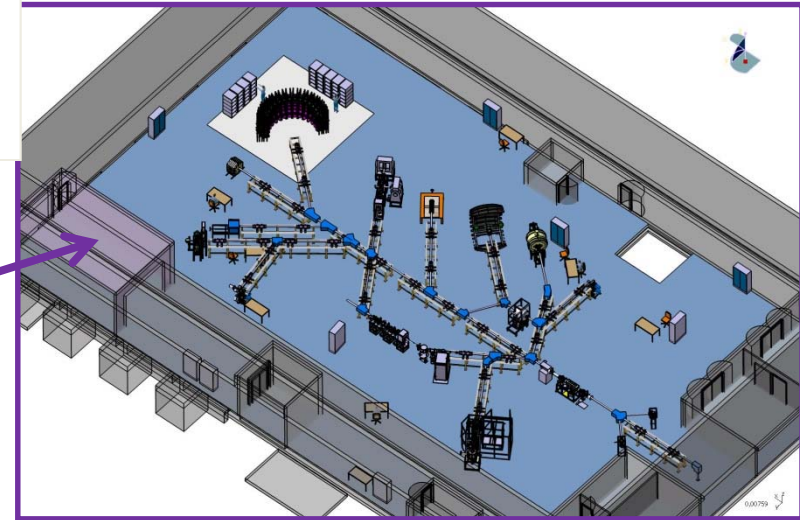
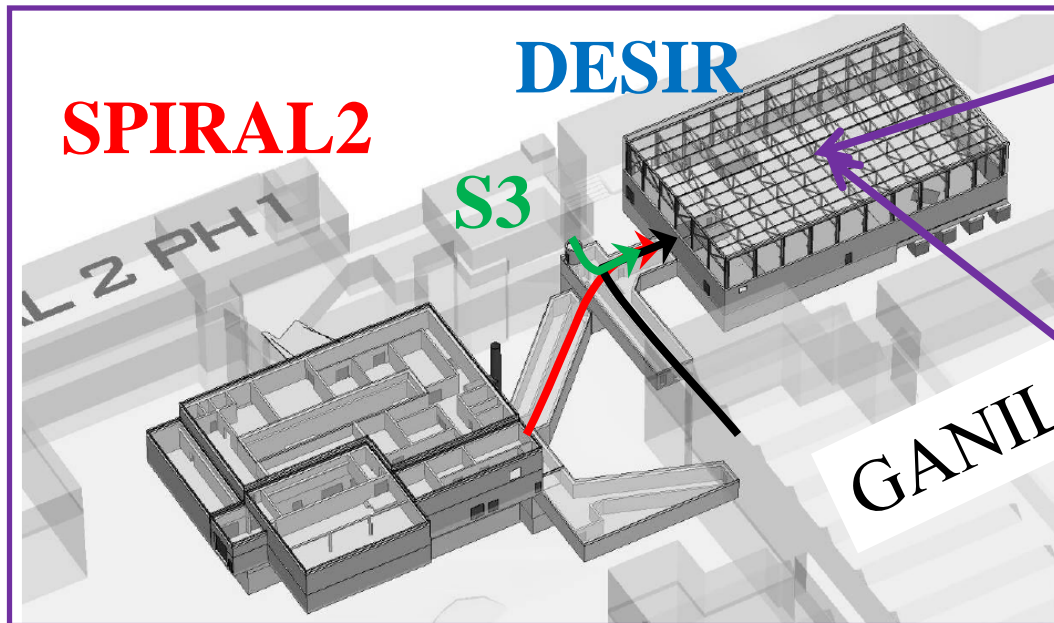
Détection

# L'installation DESIR



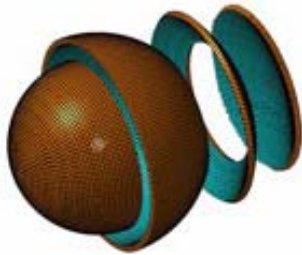
# L'installation DESIR

Une grande salle d'expérience pour étudier les propriétés fondamentales des noyaux exotiques issus de SPIRAL1, SPIRAL2 et S3



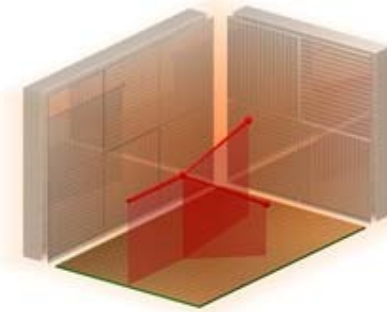
# Développement de détecteurs en lien avec SPIRAL2

## FAZIA



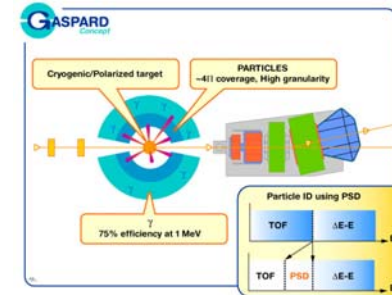
Four-pi A and Z  
Identification Array  
Début 2016

## ACTAR

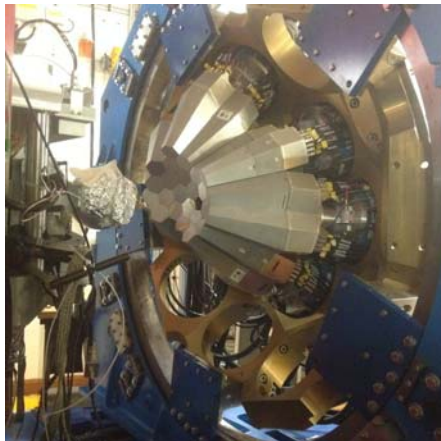


Active TARgets  
Debut 2016

## GASPARD

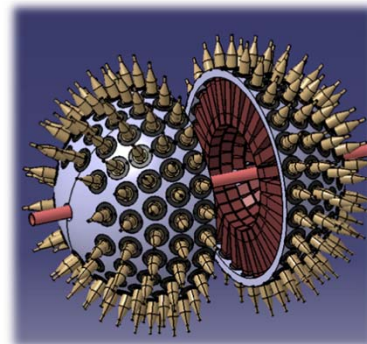


Gamma SPectroscopy  
And PARticle Detection



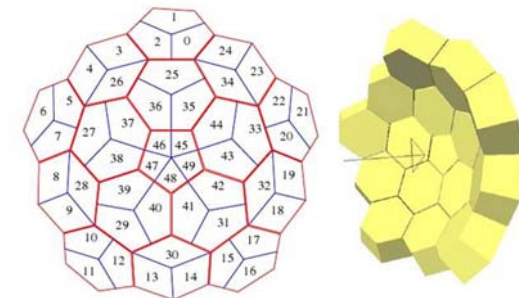
Advanced Gamma Tracking Array  
2014

## PARIS



Photons Array for studies with  
Radioactive Ion and Stable beams  
2016

## NEDA

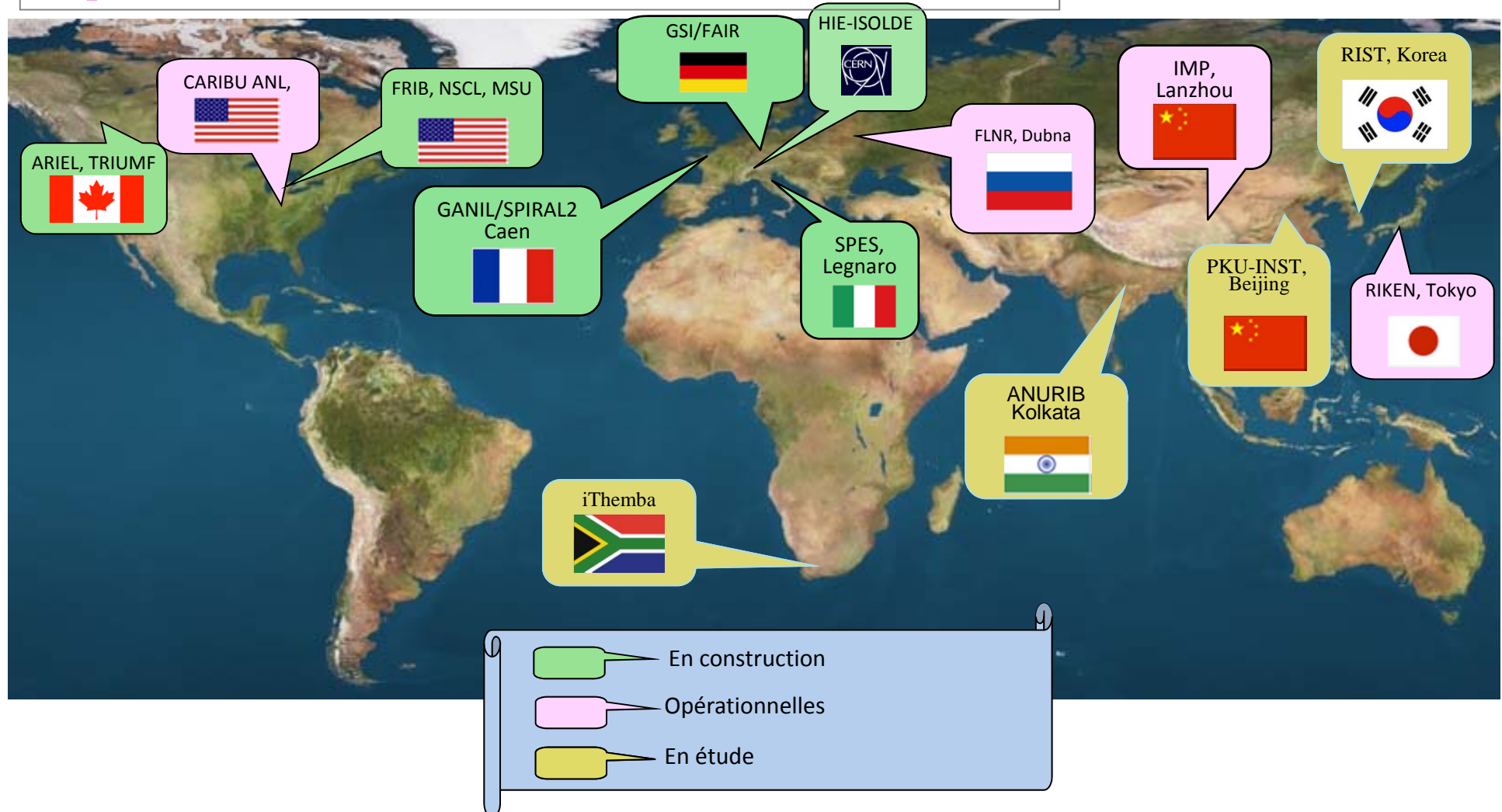


NEutron Detector Array  
2017

# Les compétiteurs

Nouvelles installations de FR:

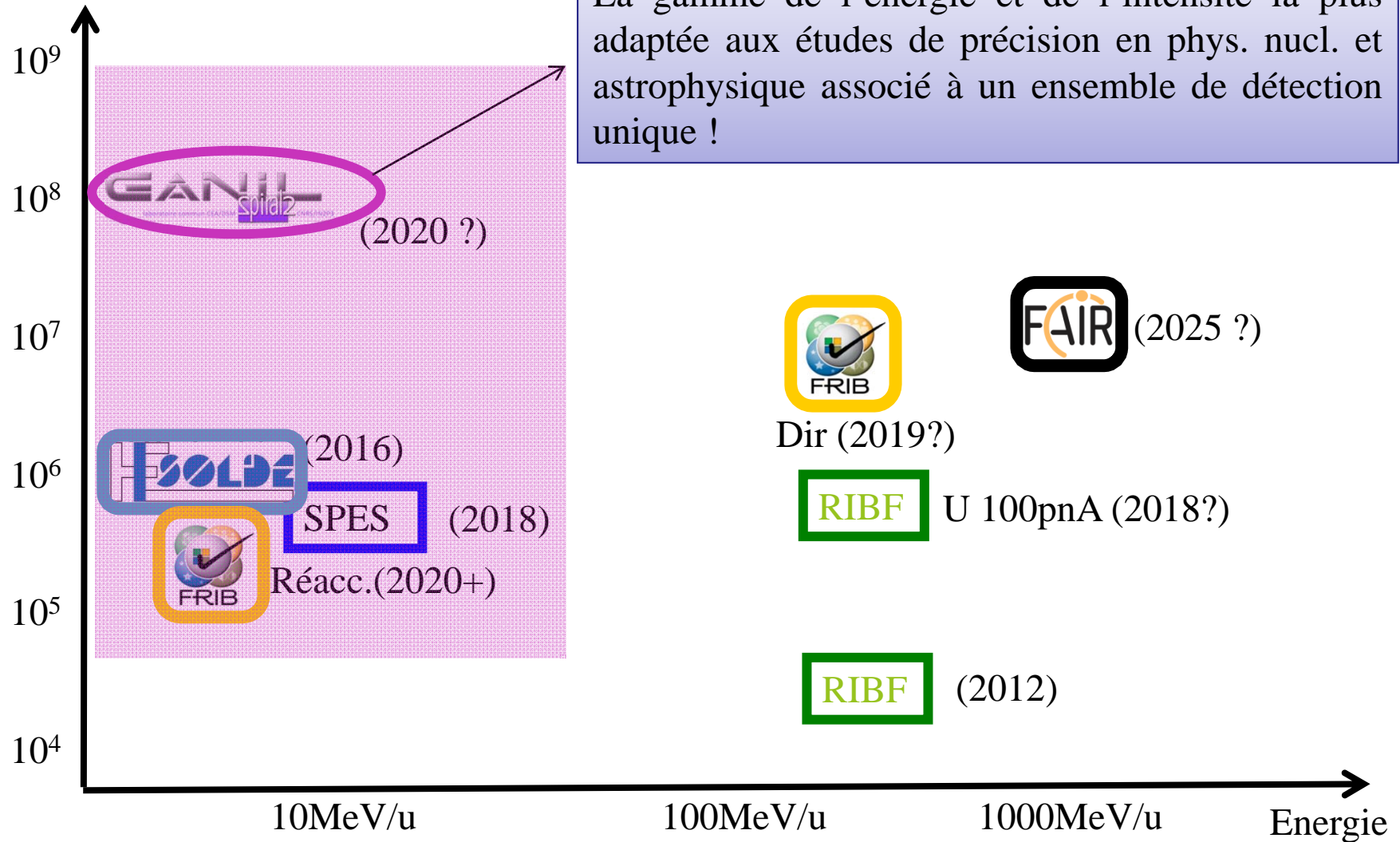
4 opérationnelles, 6 en construction, 4 en étude



# Les compétiteurs

Intensités, pps

<sup>94</sup>Kr





LINAC tunnel



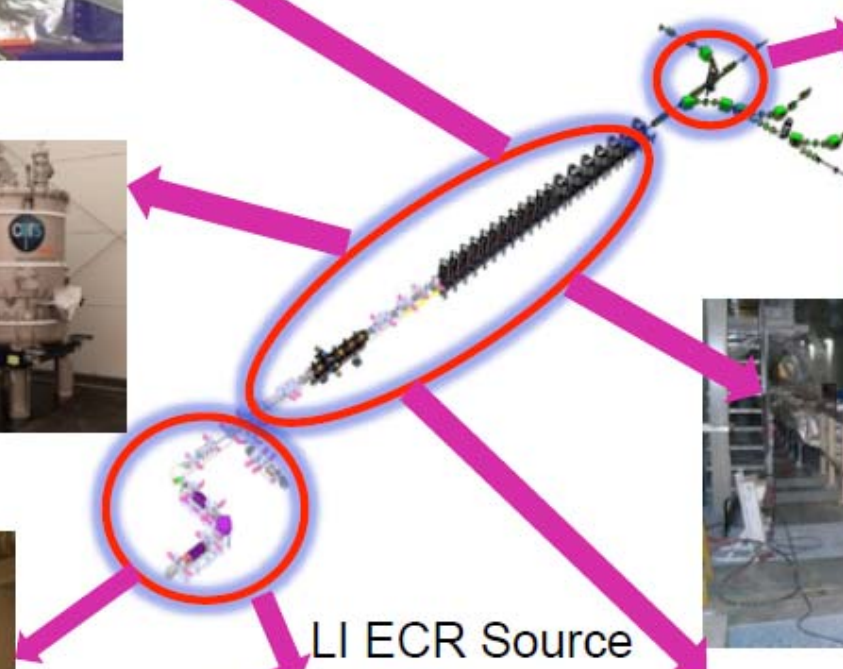
SC Cavities



HI ECR Source



**Installation is going on**



LI ECR Source



Beam lines & support



RFQ



& international partners

First proton beam of few mA from the source in December 2014!

