



Physique et Instrumentation à SPIRAL2

Conseil Scientifique IN2P3

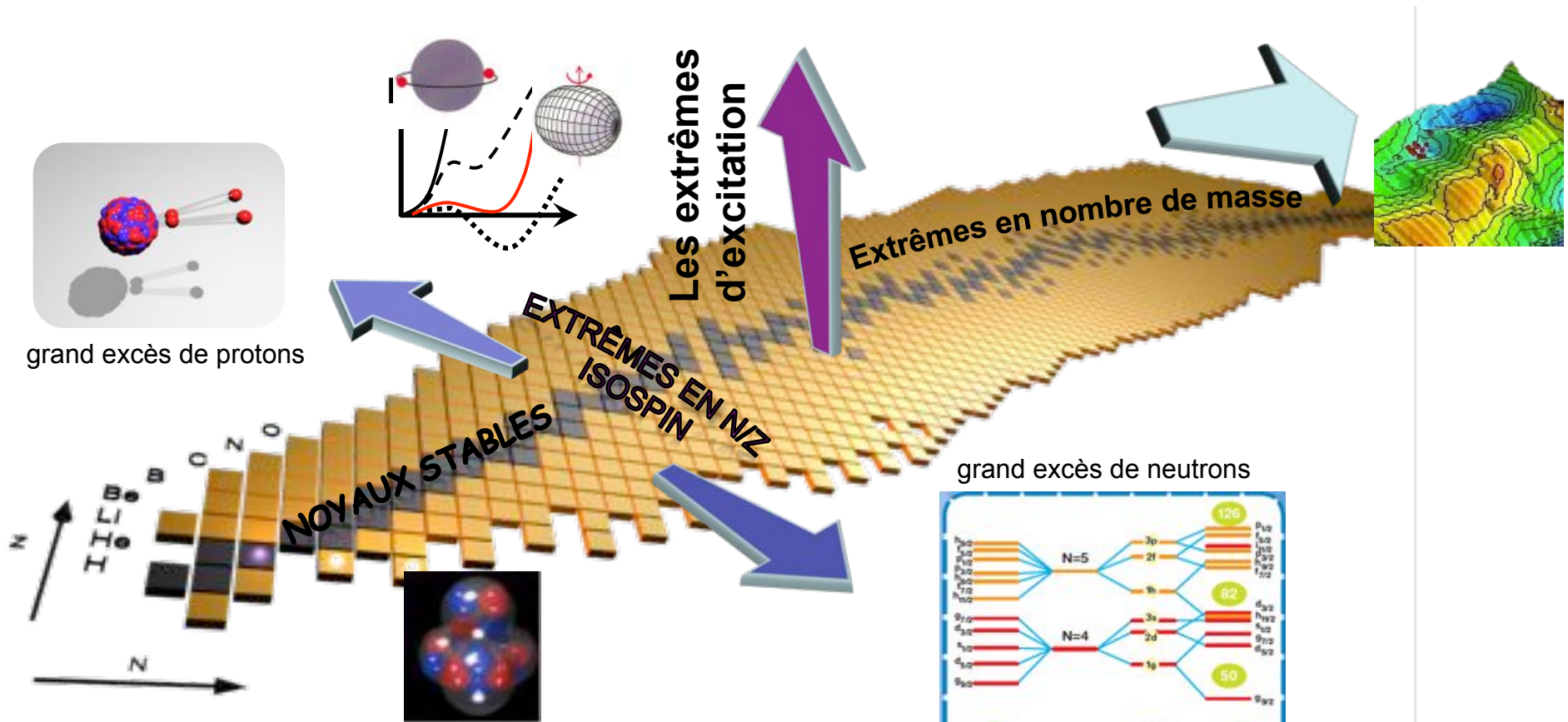


Hervé Savajols (GANIL)
on behalf of the SPIRAL2 Project Group
&
Physics Collaborations

www.ganil-spiral2.eu

Noyaux Atomiques

Comportement aux extrêmes



Identifier la meilleure démarche :

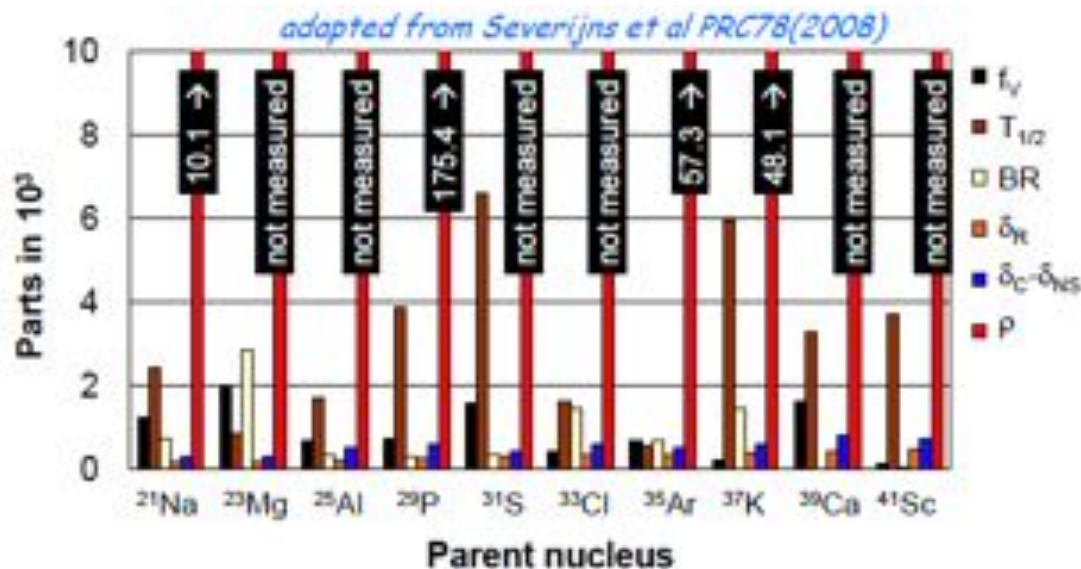
- **Noyaux clefs** (de – en – stables)
- **Accélérateurs** (intensité, énergie)
- **Méthodes expérimentales** (Réactions, Détecteurs)



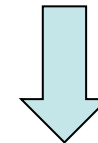
Les Questions Fondamentales

Interactions fondamentales → Quelles sont les limites du Model Standard ?

Mesures très précises de la décroissance des transitions miroirs pour tester l'hypothèse de conservation du courant vectoriel (CVC) et l'unitarité de la matrice CKM



$$V_{ud}^2 = \frac{K'}{(f_V T_{1/2} / BR)(1 + C\rho^2)}$$

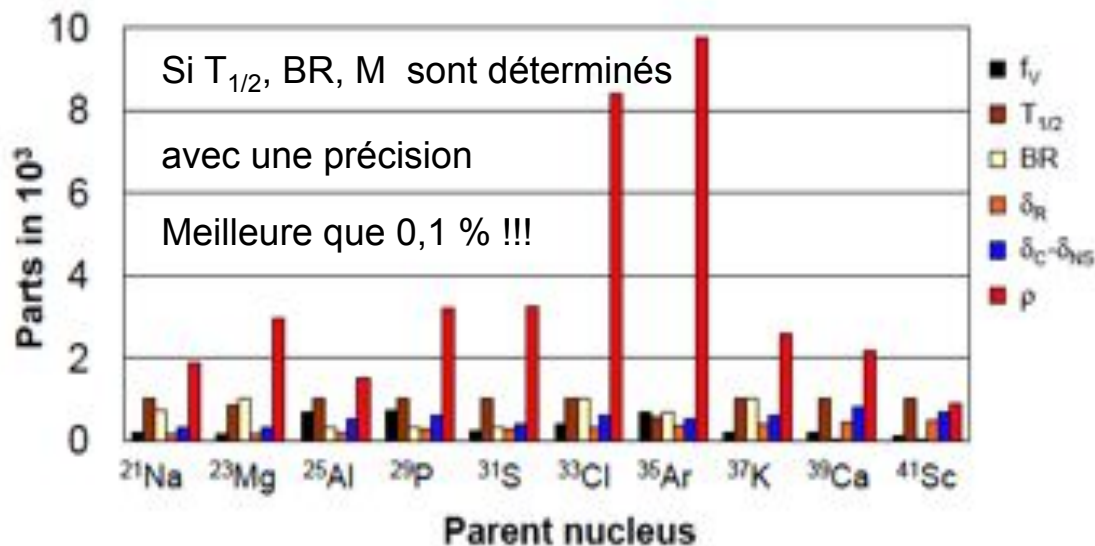


M (f_V), $T_{1/2}$, BR, ρ

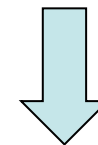
Les Questions Fondamentales

Interactions fondamentales → Quelles sont les limites du Model Standard ?

Mesures très précises de la décroissance des transitions miroirs pour tester l'hypothèse de conservation du courant vectoriel (CVC) et l'unitarité de la matrice CKM



$$V_{ud}^2 = \frac{K'}{(f_V T_{1/2} / BR)(1 + C\rho^2)}$$



M (f_V), $T_{1/2}$, BR, ρ

Dispositifs expérimentaux :

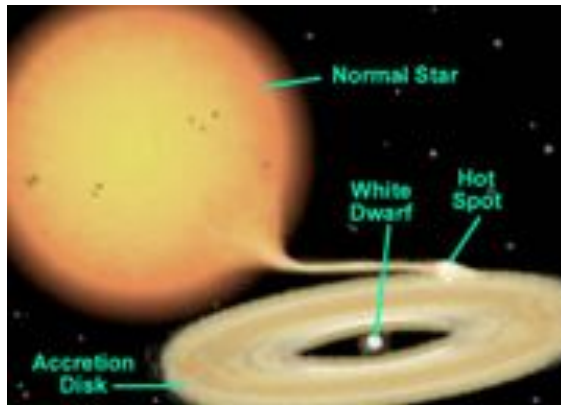
- Piège de Penning (MLLTRAP) → Masse
- Piège de Paul (LPCTRAP) → β - ν corrélation → ρ
- Station de décroissance β (BESTIOL) → $T_{1/2}$ et BR



Les Questions Fondamentales

Astrophysique nucléaire → Comment sont synthétisés les éléments chimiques dans l'Univers ?
→ Quels sont les mécanismes d'explosion des étoiles en Supernovae?

SPIRAL2 est particulièrement bien adapté à l'étude des nucléosynthèses explosives



Novae classique:

Astronomie γ est sensible aux abondances isotopiques

→ Flux γ à 1,809 MeV dépend de la réaction $^{25}\text{Al}(p,\gamma)^{26}\text{Si}$

Sursauts X :

Mesures directes des sections efficaces :

→ $^{14}\text{O}(\alpha,p)$, $^{18}\text{Ne}(\alpha,p)$ et $^{30}\text{S}(\alpha,p)$

Etude de la nucléosynthèse (p, γ)

$^{60}\text{Zn}(p,\gamma)^{61}\text{Ga}$ [waiting point] & $^{102}\text{In}(p,\gamma)^{103}\text{Sn}$ [end-point]

Processus r:

Etudes de structure nucléaire.

→ spectroscopie, décroissance, masse, $t_{1/2}$, Pn

→ après post-accélération en vue d'effectuer des réactions secondaires, ex: $^{130}\text{Cd}(d,p)^{131}\text{Cd}$, et $^{134}\text{Sn}(d,p)^{135}\text{Sn}$

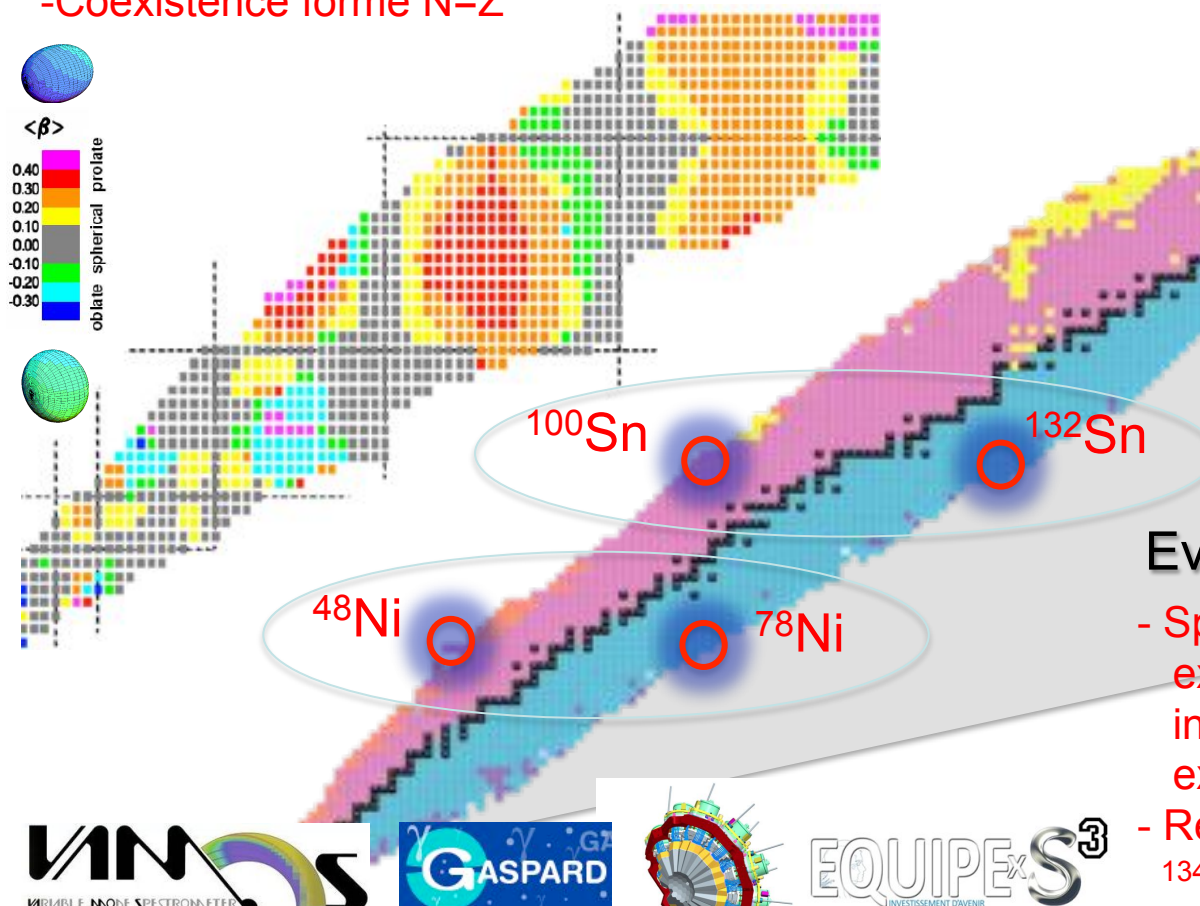


Les Questions Fondamentales

Structure → Comment évoluent les effets de couches (nombres magiques, formes) ?

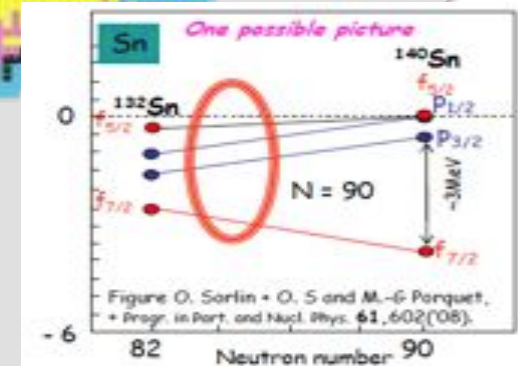
Variation rapides des déformations

- Transition de forme $^{94-96}\text{Kr}$
- Développement de la collectivité autour de ^{132}Sn
- Coexistence forme $N=Z$



Corrélation d'appariement p-n

- Spectroscopie des noyaux $N=Z$
ex : ^{100}Sn , ^{96}Cd , ^{92}Pd , ...



Evolution des effets de couches

- Spectroscopie complète (E^* , $J\pi$, C^2S)
ex : Energie des niveaux de particules indépendantes $f_{7/2}$ et $p_{3/2}$
ex : Magicité ^{100}Sn
- Réactions de transfert d'un neutron
 $^{134}\text{Sn}(d,p)^{135}\text{Sn}$

■ Connexion forte avec la théorie pour le développement des modèles

Les Questions Fondamentales

Noyaux Super Lourds → Quelles sont les limites d'existence en masse ?

Spectroscopie combiné ($\alpha, \gamma, e^-, \text{fission}$)

- Gap déformés **N=152 et 162** (No, Rf, Sg, Hs)
- Gap sphérique **Z=114** ?

Ex : $^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am} \rightarrow ^{289-287}115^*$ (2000evt/3mois)

α - γ , α -EC, α -Xrays coincidences

→ **Structure nucléaire**

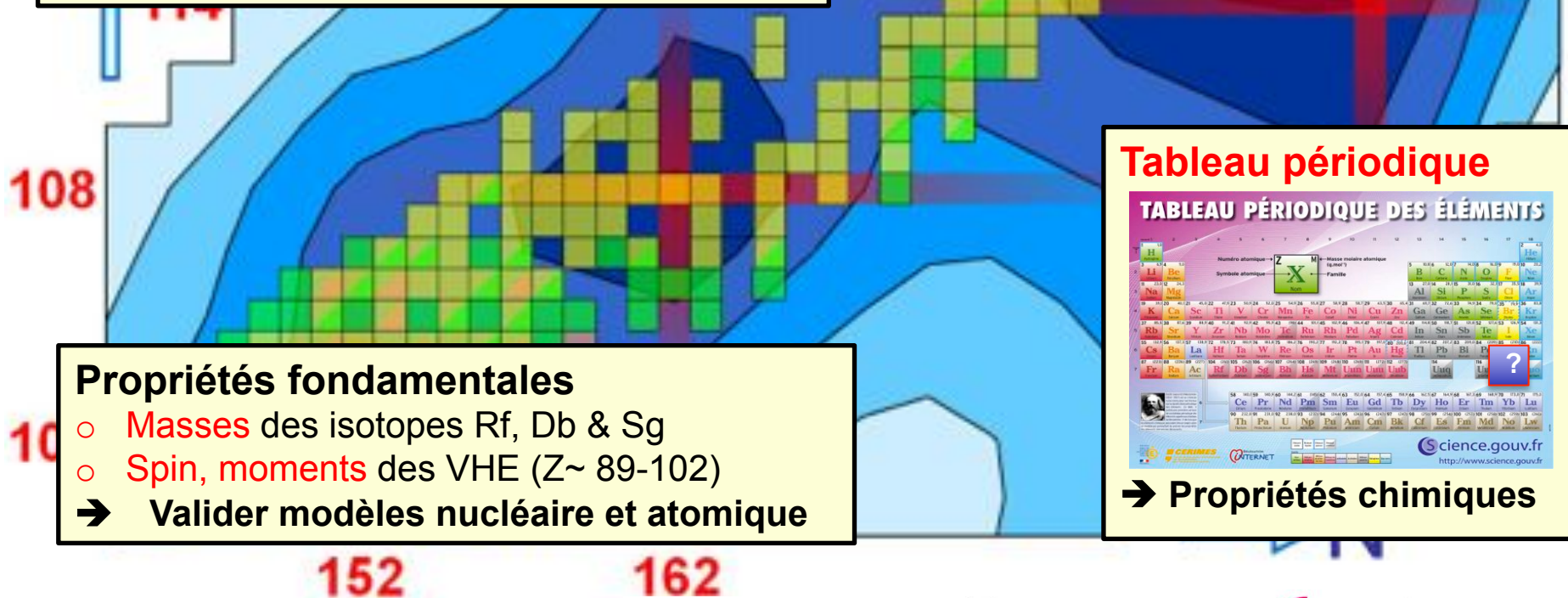
Synthèse de **nouveaux éléments**

XS predictions $\approx 10\text{fb}$ (1evt/mois)

- $^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{302}120^*$
- $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Cf} \rightarrow ^{299}120^*$

→ **Limite de stabilité**

→ **Mécanisme de réaction**



Propriétés fondamentales

- **Masses** des isotopes Rf, Db & Sg
- **Spin, moments** des VHE (Z~ 89-102)

→ **Valider modèles nucléaire et atomique**

Tableau périodique

TABEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

→ **Propriétés chimiques**

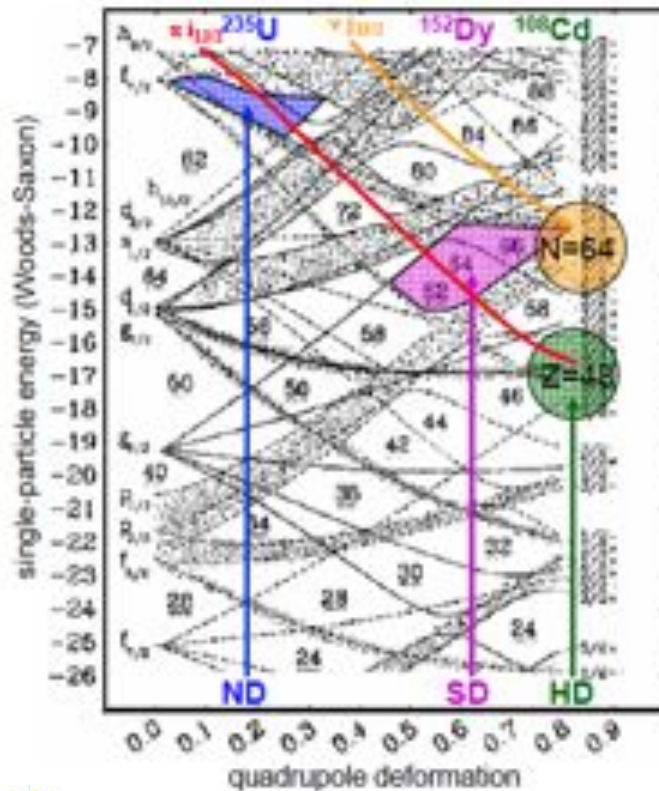
→ Intensités exceptionnelles

→ Mesures de la masse en vol

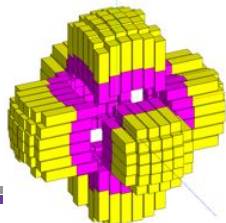
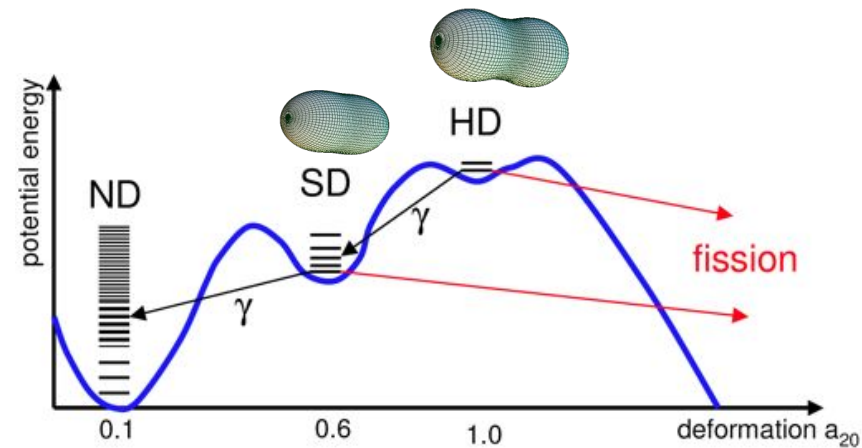
Les Questions Fondamentales

Mécanismes de réaction → Comment parvenir à une description microscopique des processus de fusion, fission et collisions nucléaires rapprochées ?

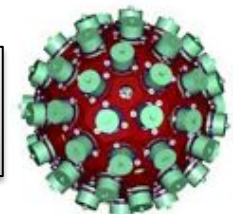
Physique dans des conditions extrêmes de spin et isospin



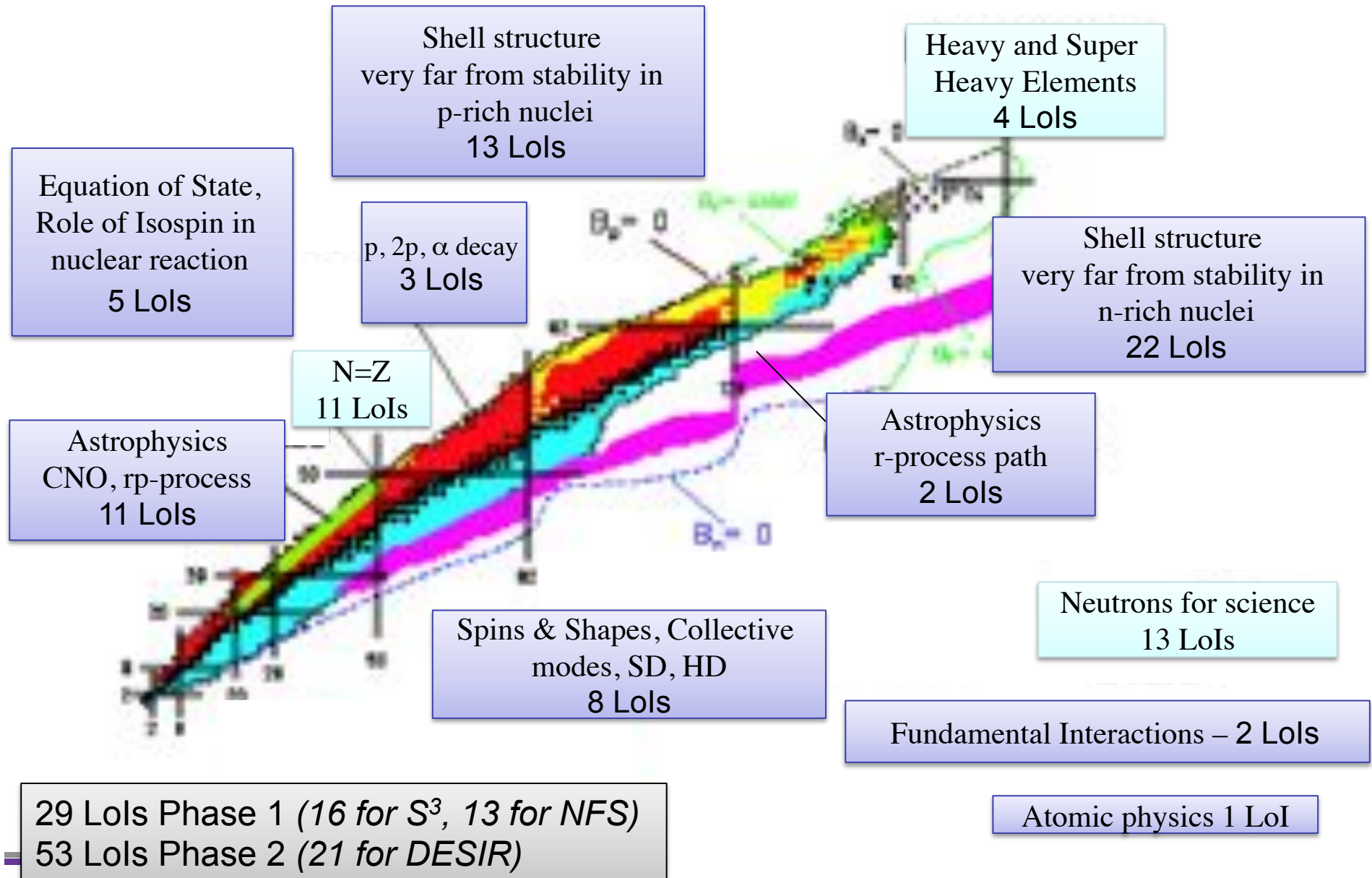
- Hyper-déformation existe-elle ?
- Recherche des transitions de Jacobi ?



Faisceaux radioactifs riches en neutrons très intenses ($> 10^9$ /s)
ex: $^{92}\text{Kr} + ^{26}\text{Mg} > ^{118}\text{Cd}^*$



82 Lettres d'Intensions (>1000 auteurs) Expériences Day 1 @ SPIRAL2





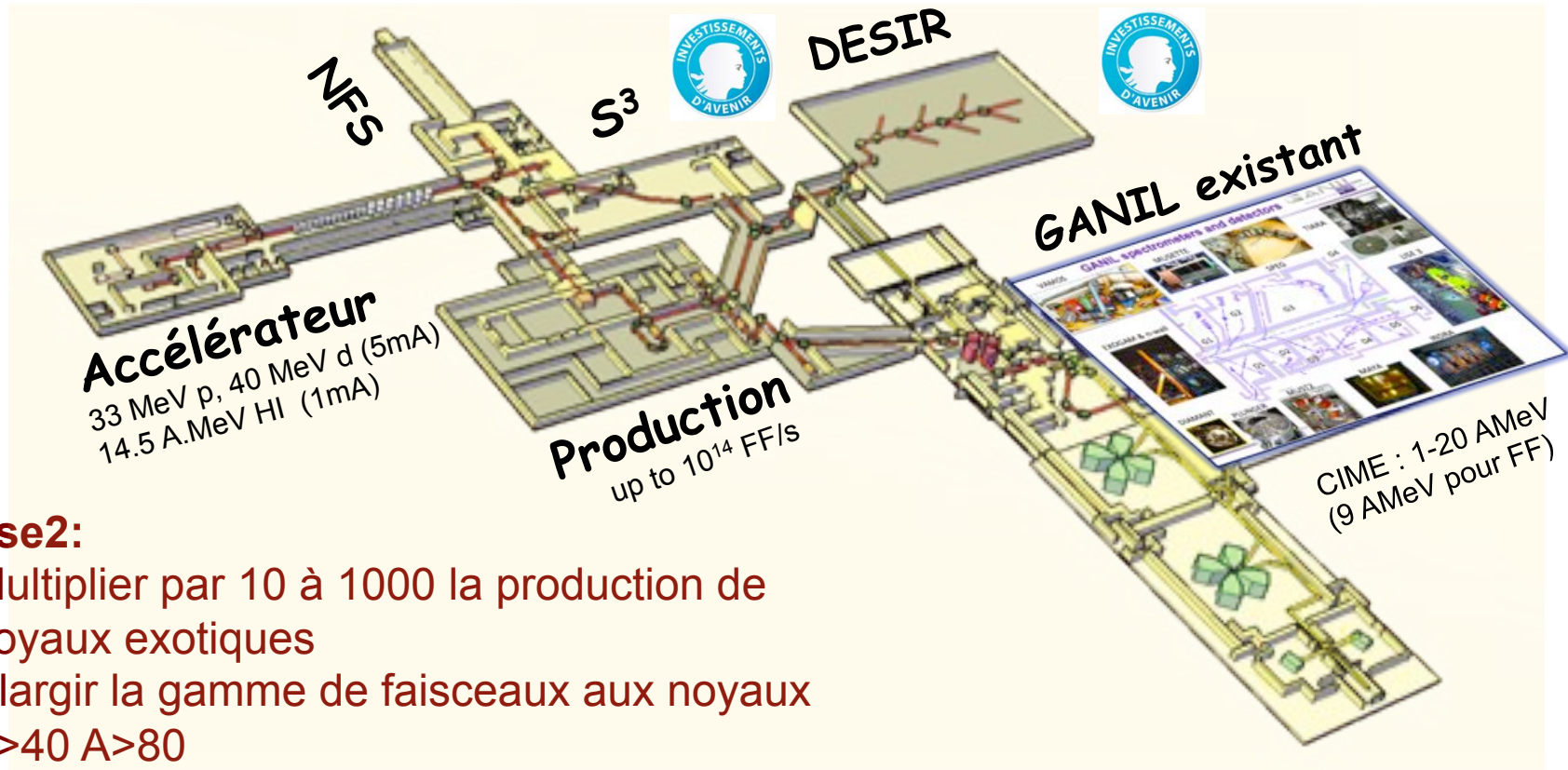
Objectifs de SPIRAL2

« Extension des capacités de production de faisceaux stables et exotiques du GANIL »

Phase1:

Accroître la puissance des faisceaux stables d'un facteur 10 à 100

DESIR (étude à très basse énergie)



Phase2:

- Multiplier par 10 à 1000 la production de noyaux exotiques
- Elargir la gamme de faisceaux aux noyaux $Z > 40$ $A > 80$

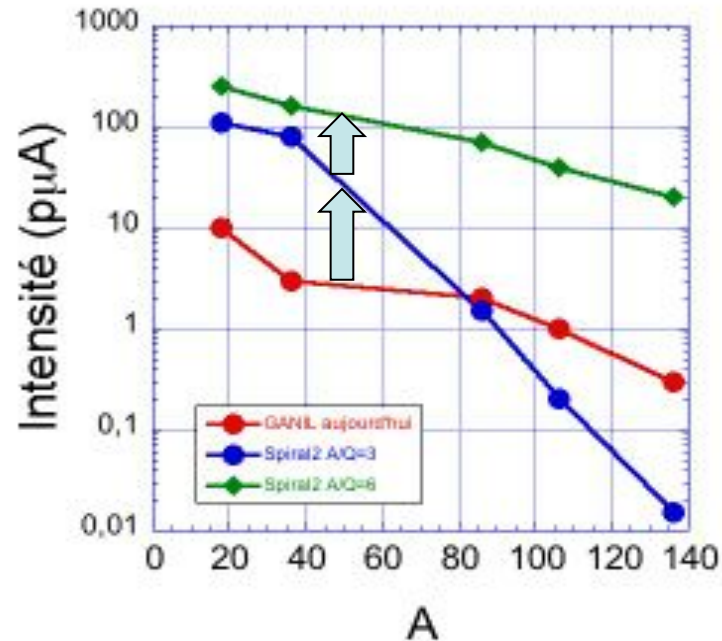
Investissement :
Cout: 151,7 M€ & >23 M€ détecteurs

Ces faisceaux peuvent être **post accélérés** par SPIRAL1 et conduits vers les salles du GANIL existant.

— **SPIRAL2 a été retenu par l'European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI)**

Faisceaux stables de SPIRAL2 – P1

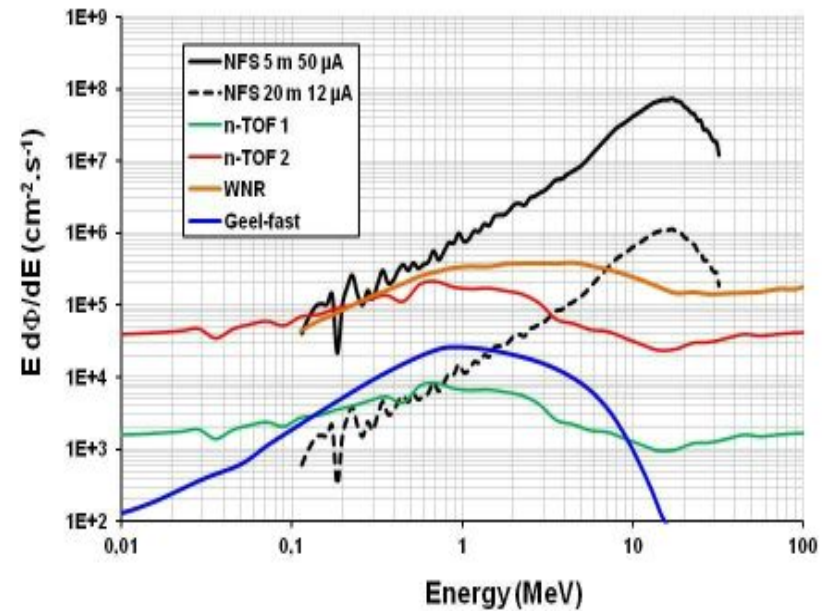
Energie HI = 0.75-15 A.MeV



Intensités exceptionnelles uniques au monde
Intensités $\approx 10\text{p}\mu\text{A}$ ($6 \cdot 10^{13}\text{pps}$) pour $A < 50$
Faisceaux continus ou pulsés

Etape ultérieure Injecteur $A/q=6$
→ Noyaux lourds $A > 50$

$I < 50 \mu\text{A}$ $P < 2 \text{ kW}$
En: 1MeV – 40 MeV



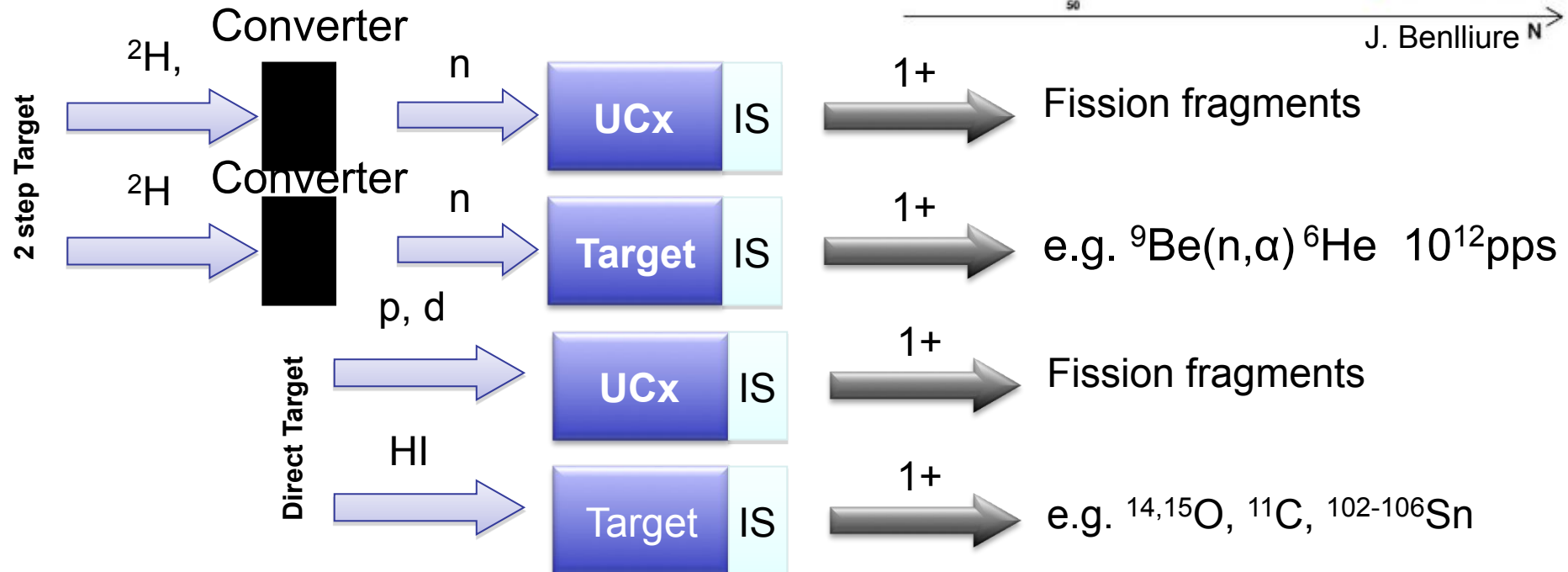
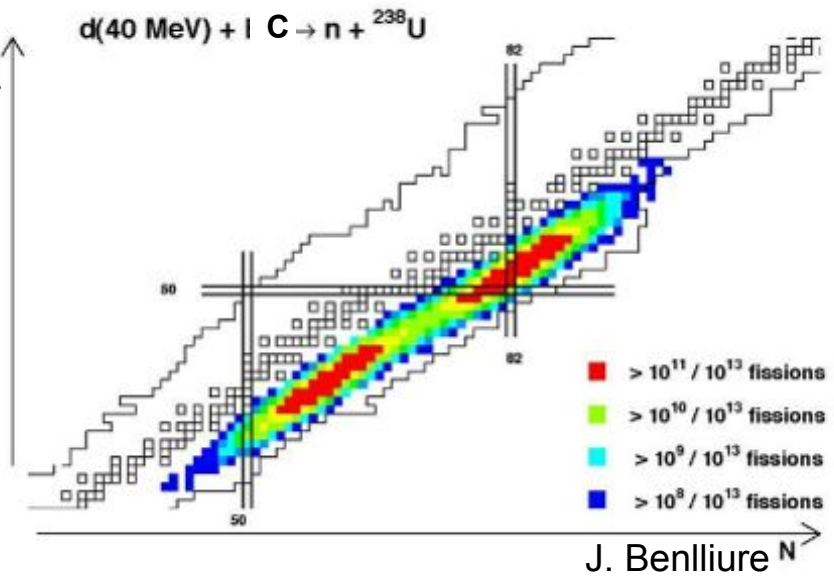
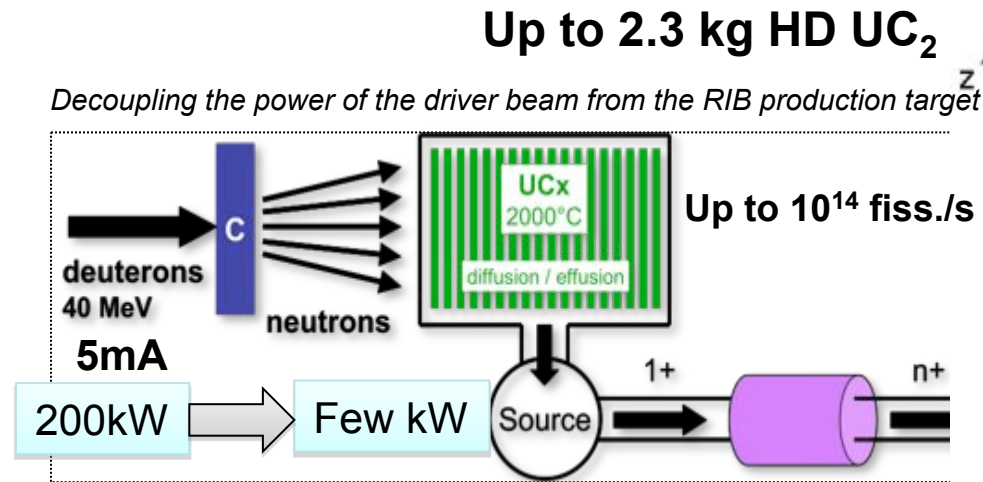
Flux de neutrons très intense

- $\Phi > 1,5 \cdot 10^{13} \text{ n/s}$ dans 4π
- $\Phi > 6 \cdot 10^{11} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ à 5 cm

Spectre continu ou quasi-monocinétique

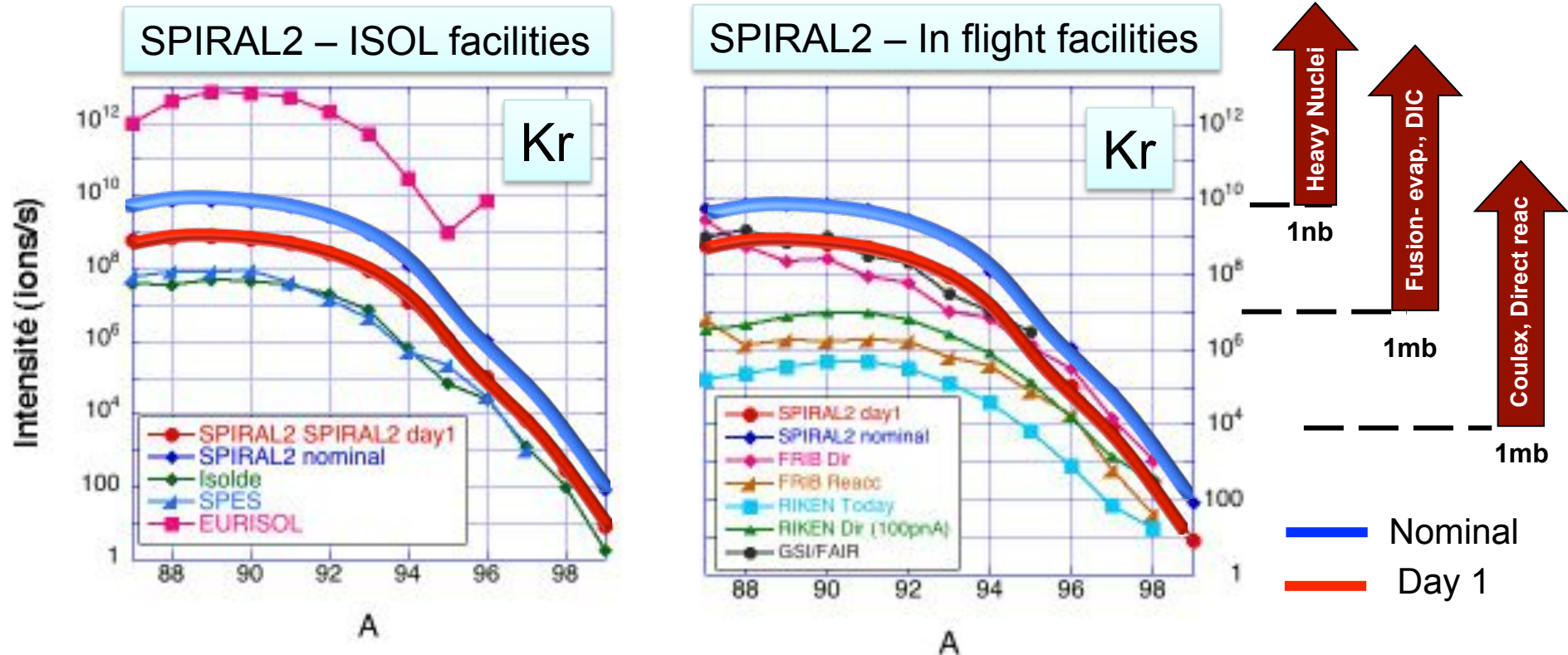
Faisceau de neutrons parfaitement collimaté

Faisceaux radioactifs de SPIRAL2



SPIRAL 2: Nouvelle Génération RIB

- Des faisceaux radioactifs de grande qualité, pureté et intensité
- Gamme d'énergie parfaitement adaptée à des mesures de précision
- Grande quantité d'observables et sur une large gamme de noyaux



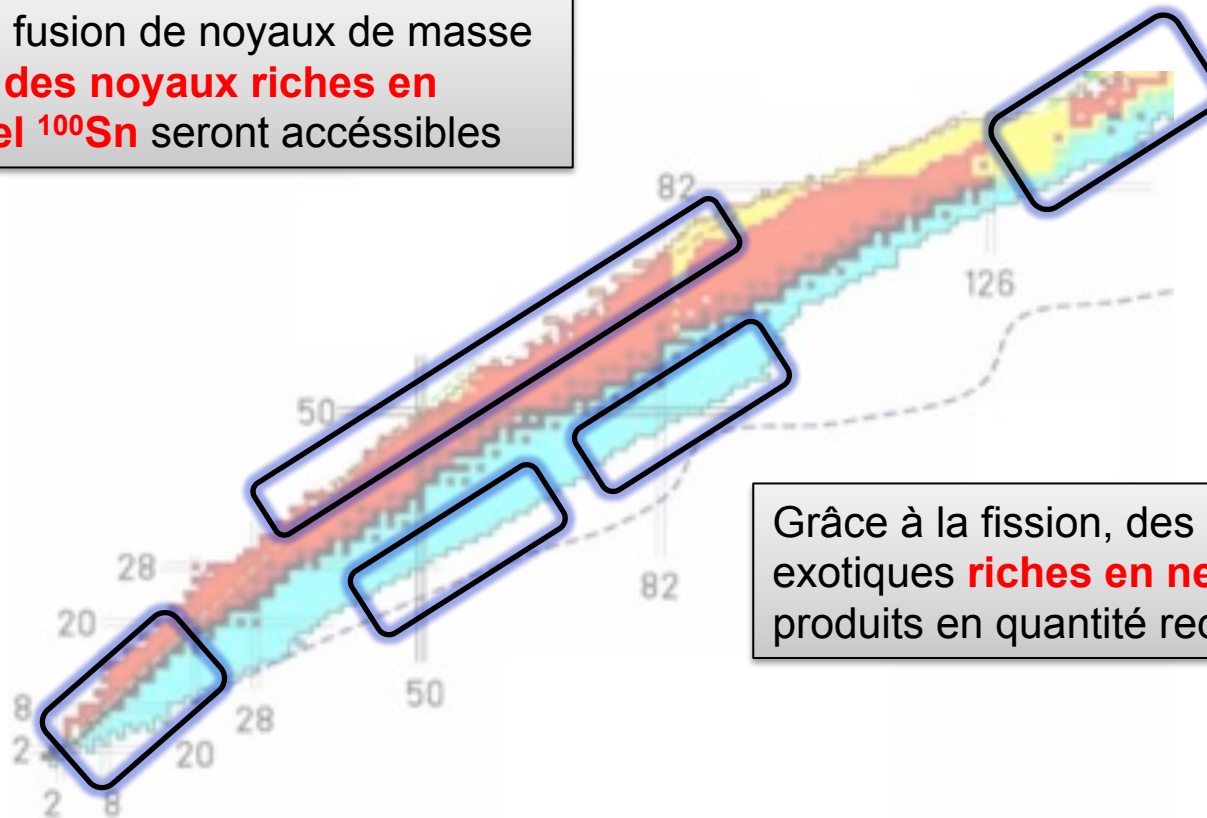
Spectroscopie complète
 Estimation des facteurs de forme
 Sections efficaces des réactions nucléaires

Propriétés des états fondamentaux
 Facteurs spectroscopiques
 Synthèse noyaux lourds

Domaines d'excellence de SPIRAL2

Les intensités des faisceaux primaires permettent au GANIL de devenir compétitif dans la course aux **noyaux super lourds**.

Grâce à la fusion de noyaux de masse moyenne, **des noyaux riches en protons tel ^{100}Sn** seront accessibles



Grâce à la fission, des noyaux exotiques **riches en neutrons** seront produits en quantité record

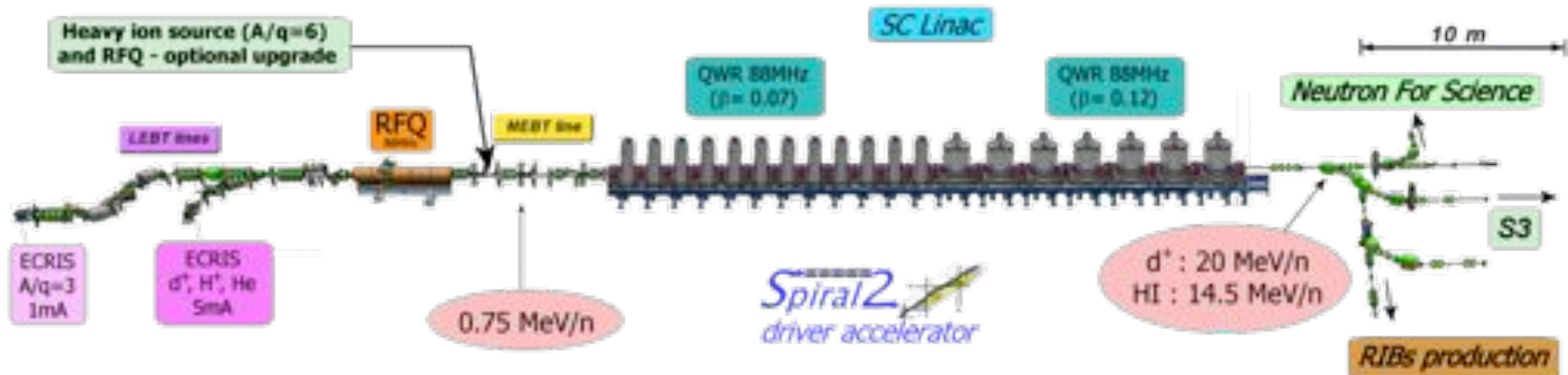
Avec les ions légers de hautes intensités accélérées par LINAC : **des noyaux exotiques de petite masse** produits avec des intensités comparables à celles des faisceaux stables actuels.



L'installation SPIRAL2 (PHASE 1 & PHASE 2)

Accélérateur linéaire SC

Phase 1



Particles	H ⁺	³ He ²⁺	D ⁺	Ions	
Q/A	1	2/3	1/2	1/3	1/6
I (mA) max.	5	5	5	1	1
W ₀ max. (Mev/A)	33	24	20	15	9
CW max. beam power (KW)	165	180	200	44	48

Total length: 65 m (without HE lines)

Slow (LEBT) and Fast Chopper (MEBT)
RFQ (1/1, 1/2, 1/3) & 3 re-bunchers

12 QWR beta 0.07 (12 cryomodules)
14 (+2) QWR beta 0.12 (7+1 cryomodules)
1.1 kW Helium Liquifier (4.5 K)
Room Temperature Quadrupoles
Solid State RF amplifiers (10 & 20 KW)
6.5 MV/m max $E_{acc} = V_{acc}/(\beta_{opt}\lambda)$ with $V_{acc} = \int E_z(z)e^{i\omega z/c} dz$.

Post-accélérateur de EURISOL Basé sur le design de SPIRAL2

SPIRAL2 phase 1 Génie Civil



Construction SPIRAL2 phase 1



Oct 2011



Mars 2012



Oct 2012



Fin Génie Civil : 2013

Second œuvre et lots techniques



HI beam line

Move to GANIL



Phase 1



All cavities qualified
2 cryomodules tested
All delivered before
end 2013



- ✓ Décret de SPIRAL2 Phase 1 signé par le premier ministre le 8 Mai 2012
- ✓ Permis d'exploitation attendu en 2014

SPIRAL2 Phase1 planning :

- | | |
|---|-------------------------|
| ✓ Installation des premiers équipements | → Décembre 2012 |
| ✓ Début installation du RFQ | → Mars 2013 |
| ✓ Début installation cryomodule | → Juillet 2013 |
| ✓ Mise en froid du LINAC | → Mai 2014 |
| ✓ RFQ/BTI premiers faisceaux | → Avril 2014 |
| ✓ Premier faisceau LINAC | → Septembre 2014 |

Move to

d & p

T4+T5 a
@ Saclay



RFQ

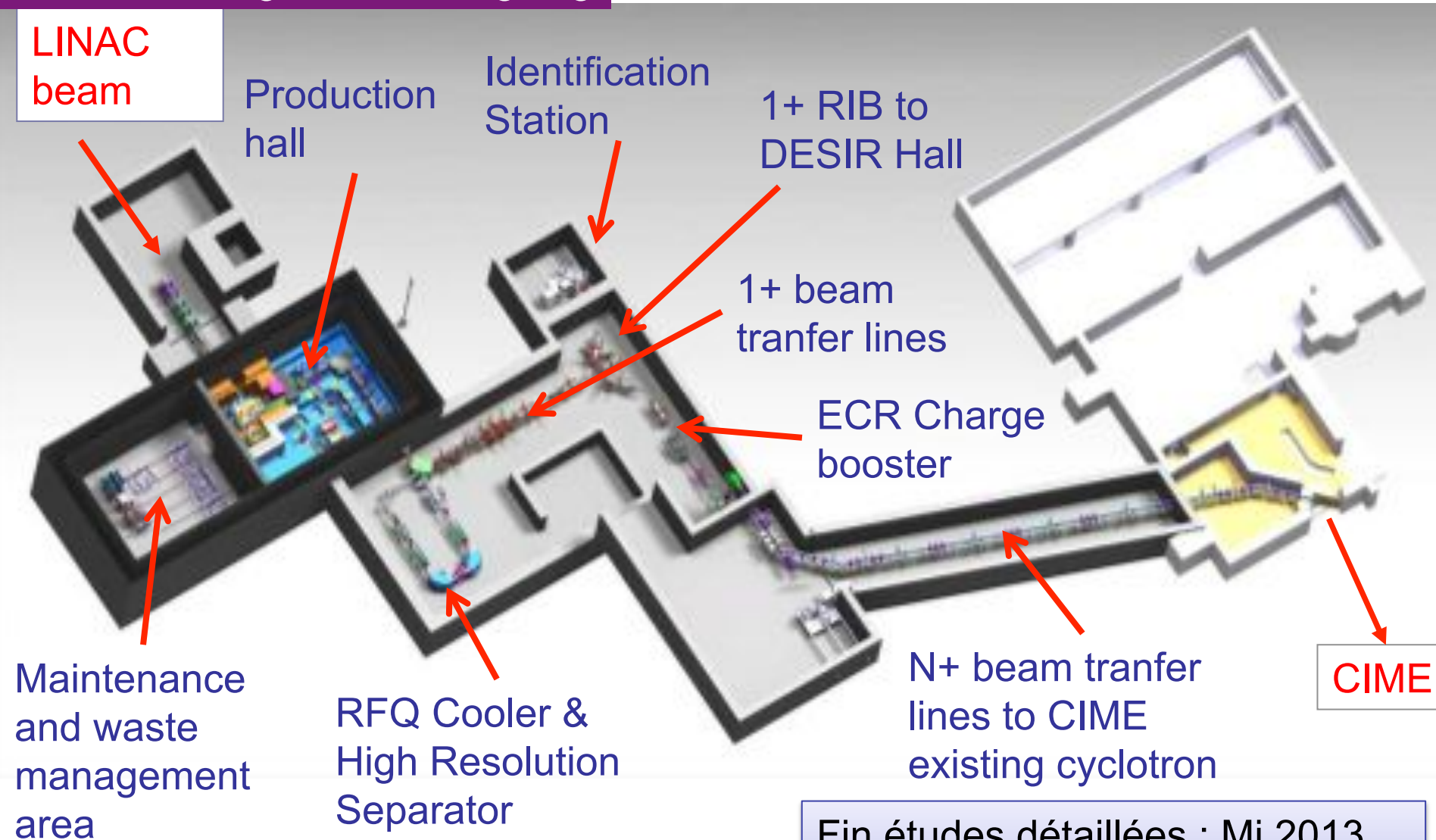


All cavities qualified
5 cryomodules tested
All delivered before
end 2013

Bâtiment de production

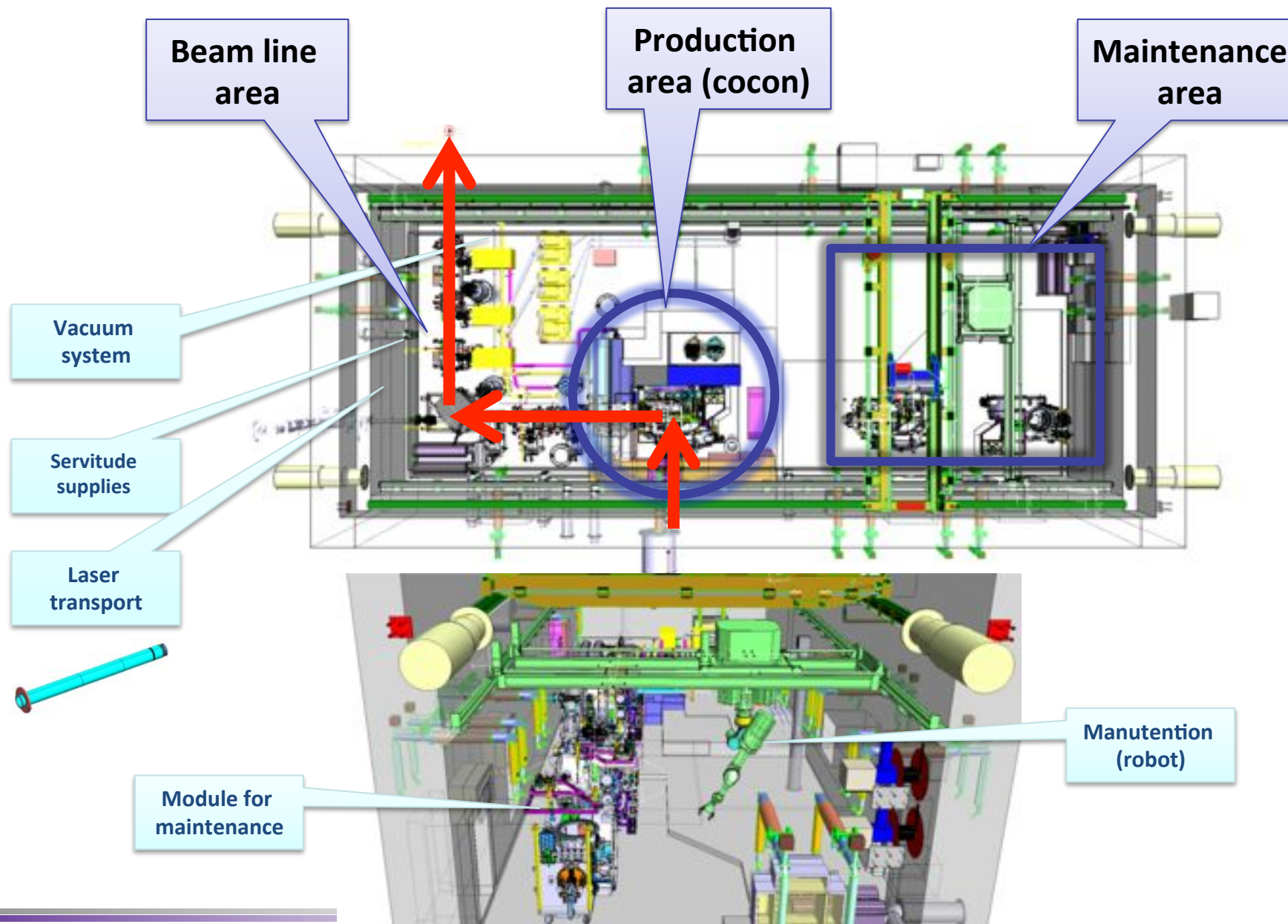
Phase 2

Intensive design work is ongoing

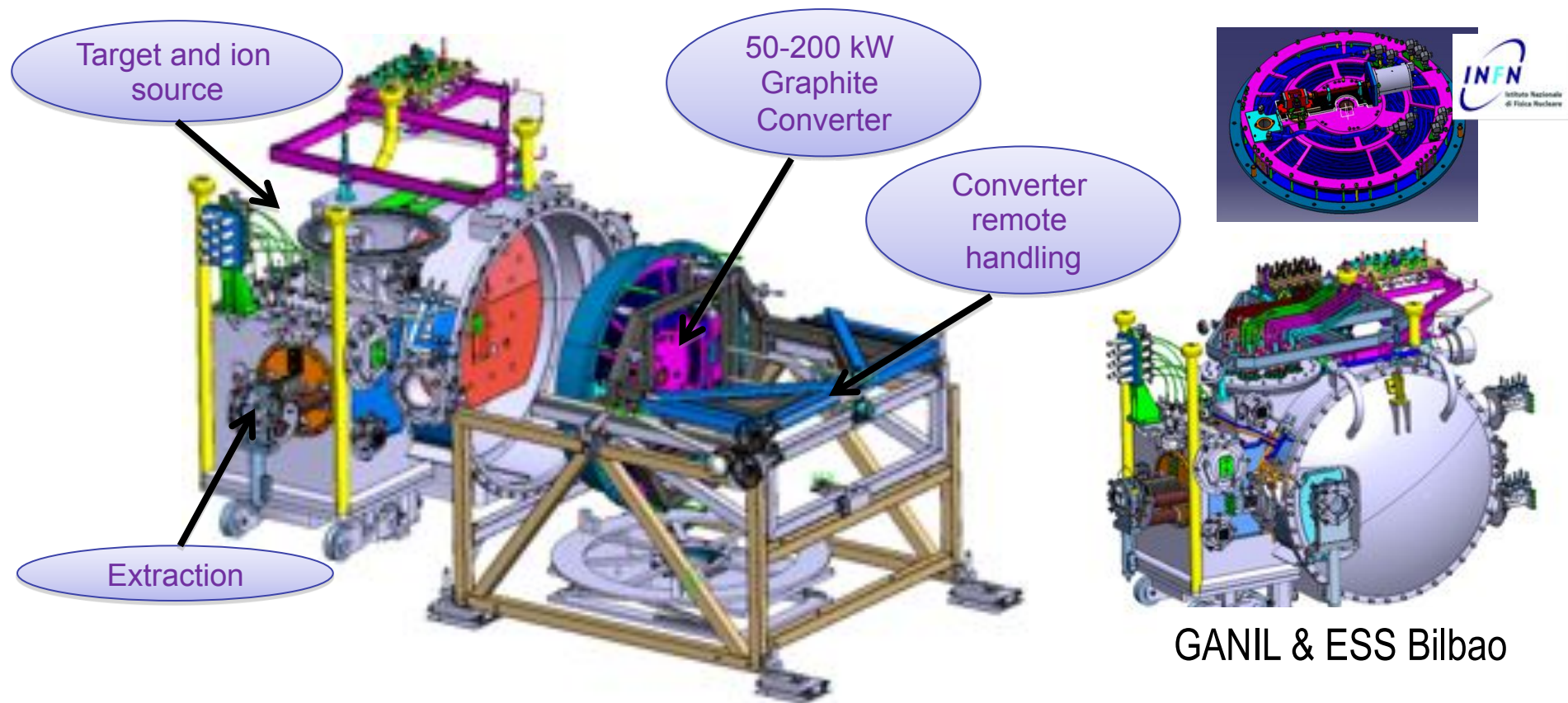


Fin études détaillées : Mi 2013
Démarrage construction en 2015

Casemate Module de Production



Module de Production

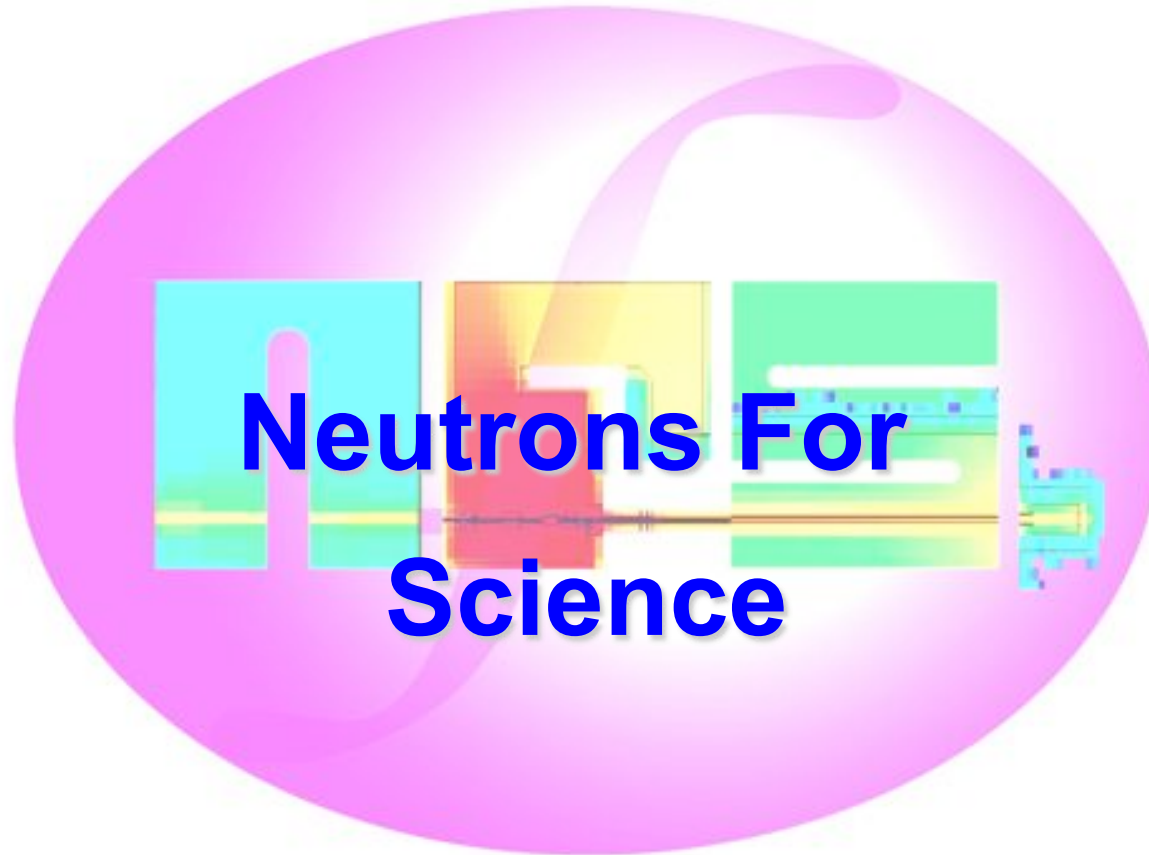
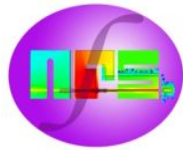


This equipment is very ambitious :

- Dimensions : 3,1x2,2x2 m and 9 T,
- Mounting and dismounting by robot every 3 month,
- High neutron and gamma integrate dose (until 10^6 grey in 3 month),
- Positioning in all directions at +/-0,5 mm,
- Many servitudes (water, HV, HF, 1000A, command control, diagnostics information,...).



Instrumentation autour de SPIRAL2 PHASE1 Aire Expérimentale Linac (NFS et S³)



Neutrons For Science : Objectifs

Mesure de données nucléaires :

- Les réacteurs de fission de nouvelle génération
- La technologie de la fusion
- Transmutation des déchets nucléaires

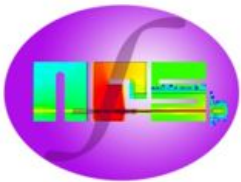
La médecine (production de radioéléments), Biologie (irradiation de cellule)

Le développement et la caractérisation de nouveaux détecteurs

- dosimètres, débitmètres, détecteurs pour la sûreté et sécurité

Irradiation de puces et de composants électroniques (SEU Programmes de physique)

Analyse d'échantillons par irradiations neutrons (C dans le sol, concentration d'oxygène,...)





Mesures de section efficace par activation ou irradiations

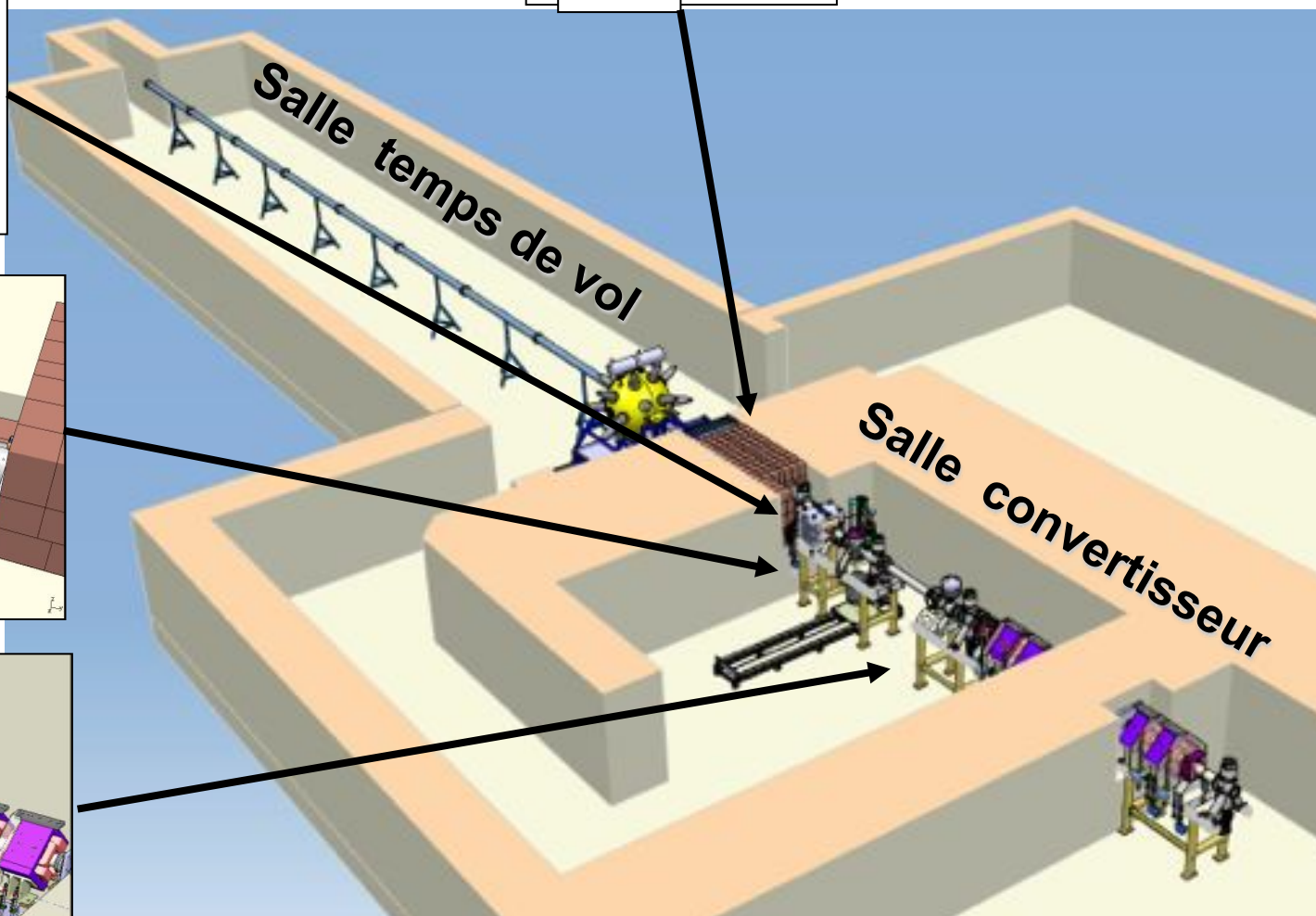
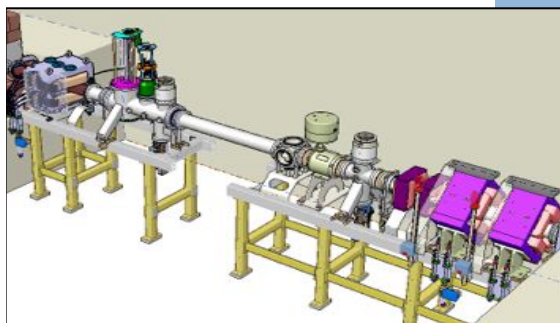
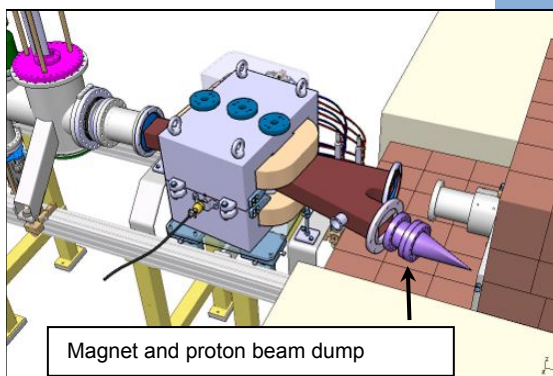
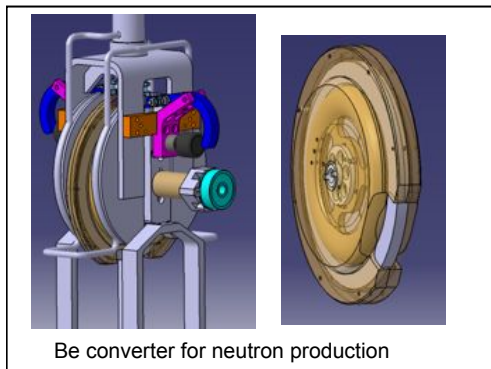
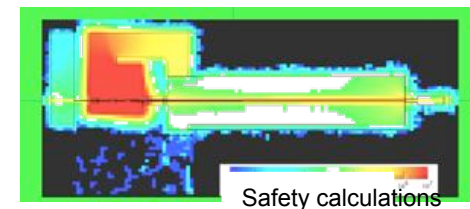
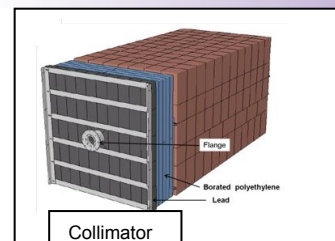
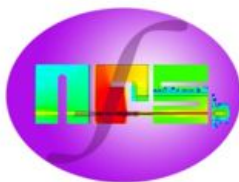
(matériau, biologie, électronique...)

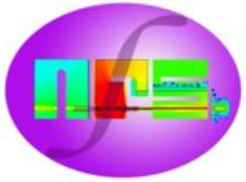
- Lol_16 : Proton and deuteron induced activation reactions, *P. Bem*
- Lol_24 : Neutron-induced activations reactions, *A. Klix*
 - *Detection setup under construction*
- Lol_23 : Response of Mammalian cells to neutron exposure, *C. Hellweg*
 - *Detection setup already available*

Mesures par temps de vol

- Lol_14 : Comparison between activation and prompt spectroscopy as means of (n,xn) cross section measurements, *M. Kerveno (IPHC)*
- Lol_21 : Light-ion production studies with Medley, *S. Pomp (Uppsala university)*
- Lol_22 : Fission fragment angular distribution and fission cross section measurements relative to elastic np scattering with Medley, *S. Pomp*
- Lol_13 : Study of the pre-equilibrium process in the (n,xn) reaction, *X. Ledoux*
 - *Detection setup already running (Geel, Uppsala, Bruyères le Châtel)*

Neutrons For Science : Descriptif



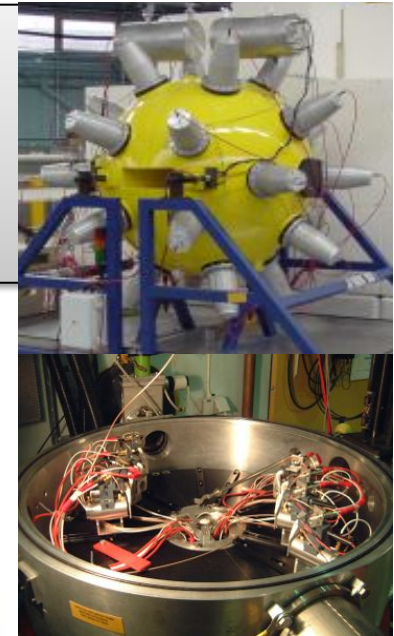


Techniques Expérimentales

Differential XS ($n, n'\gamma$)
High Energy resolution measurement
→ GAIN setup (Ge array)
(Nuclear Data)



Differential XS: (n, Xn), (n, LCP)
($n, fission$) measurement
→ Medley
→ Carmen
(Reaction models, Nuclear Data)



Time-of-flight area

Collimateur

Salle
convertisseur

XS measurement by activation
→ p, d, n, H1
(Fusion & Fission technologies)

Première expérience fin 2014

Additional topics :

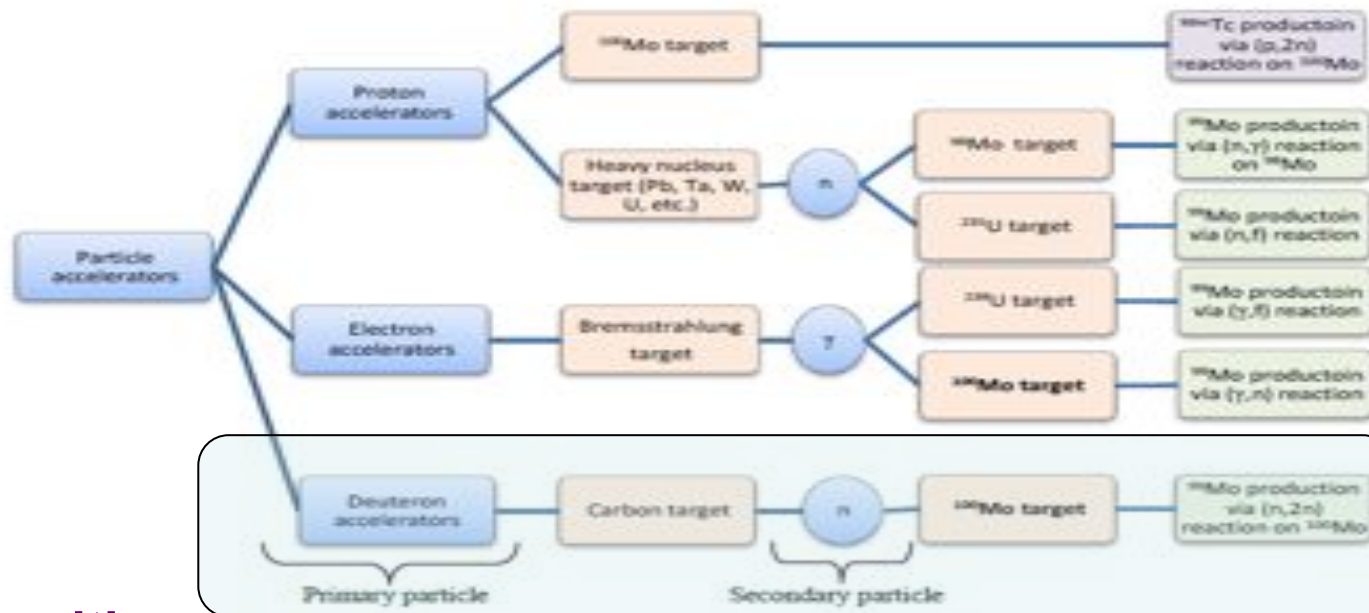
- Irradiation of electronic components, cells, ...
- Detector characterization

Production of radio éléments (Mo 99)

- 80% des radiotraceurs en imagerie médicale nucléaire contiennent du technétium-99m (30 million investigations/an)
- Production dans les réacteurs (NRU,HFR,SAFAR-1,BR2 et OSIRIS)

Motivation

- Recherche de nouvelle alternative de production Mo-99 (AEN-OCDE)



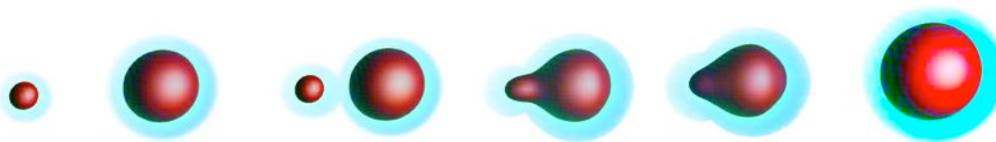
Proposition

- Utiliser les neutrons rapide de NFS (Démonstration-faisabilité) et SPIRAL2 (production?) $100\text{Mo} + n \rightarrow 99\text{Mo} + 2n$

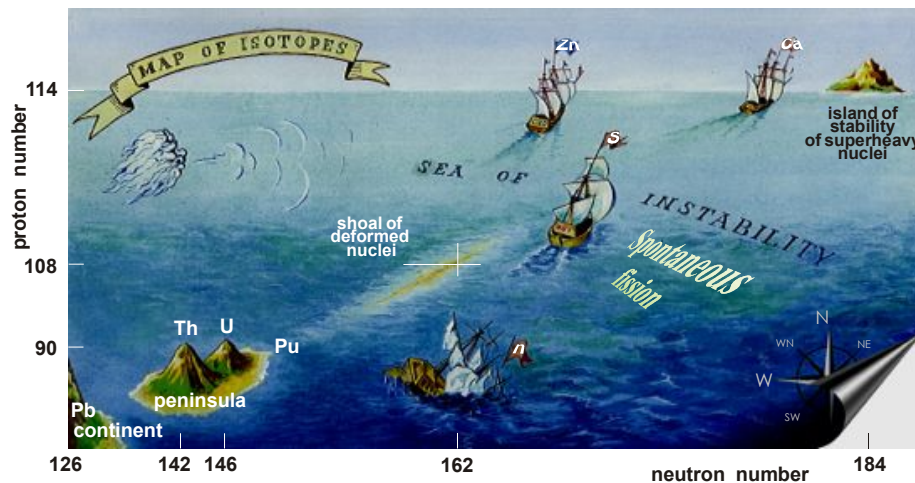
40MeV; 5mA deuterons; 250g cible \rightarrow ~200Ci en 2 jours; ~50% de la production OSIRIS

S³ Super Séparateur Spectromètre

A la recherche de nouveaux atomes !



Quelle est la limite de stabilité des noyaux ?
Quelles sont leurs propriétés chimiques ?



Phénomènes rares en
→ physique nucléaire
→ physique atomique



EQUIPEX S³

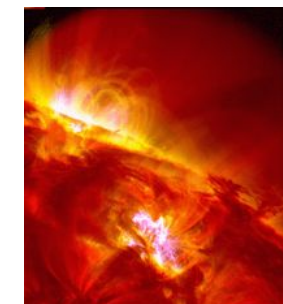
Porteur: GANIL (H. Savajols)
Dotation: 8 000 000 €

Collaboration



170 physiciens du monde entier

Comment les ions en mouvement interagissent-ils entre eux ?
Quel est le comportement de la matière en conditions extrêmes ?



S³: Objectifs Scientifiques

$^{58}\text{Ni} + ^{46}\text{Ti} \rightarrow ^{100}\text{Sn} + 4n$
 (I=10pμA) → 1evt/s @ $\sigma_{\text{th}}=5\text{nb}$
 RIKEN ≈ 2,2 evt/h

FISIC project
 LoI_Day1_1

Proton Dripline & N=Z nuclei

LoI_Day1_6, LoI_Day1_8, LoI_Day1_9

LoI_Day1_11, LoI_Day1_17

- Tests of Shell Model
- Single-Particle structure
- Development of Collectivity
- Shape coexistence

LoI_Day1_3, LoI_Day1_4, LoI_Day1_18

- Ground-State Properties

LoI_Day1_10

- Standard Model

Fusion-evaporation

$^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{283}112 + 3,4n$
 (I=10pμA) → 20evt/week/pb

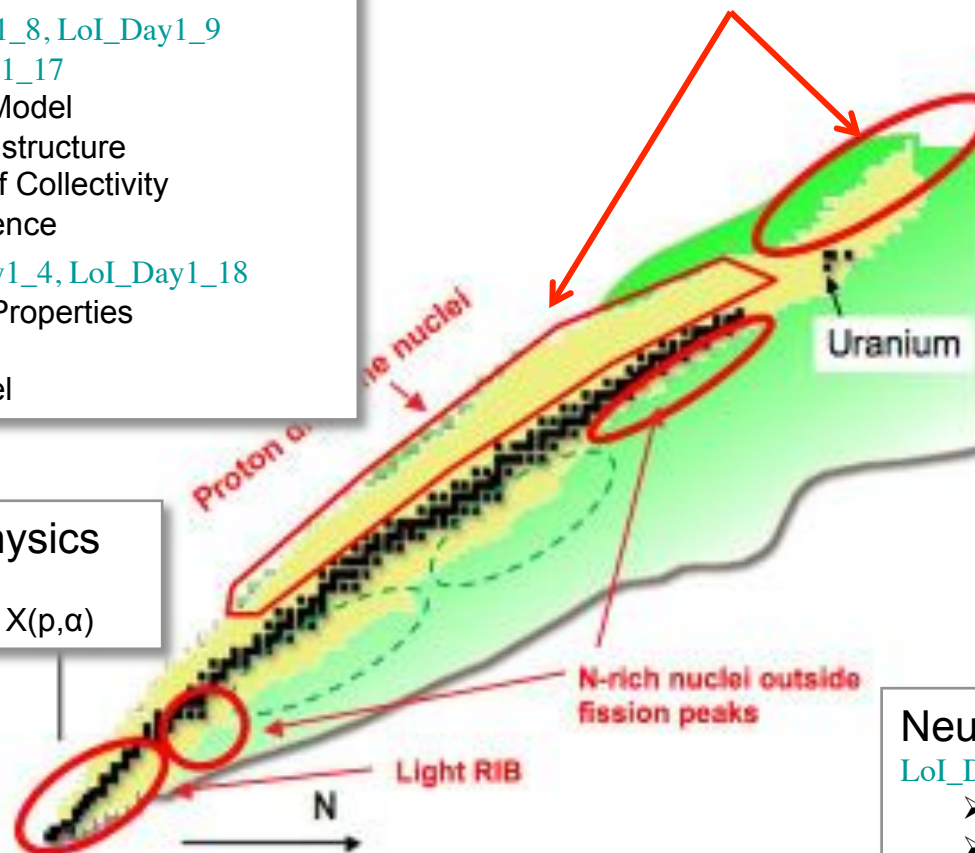
Heavy and Superheavy Elements

LoI_Day1_2, LoI_Day1_25

- Synthesis
- Spectroscopy and Structure

LoI_Day1_5

- Ground-State Properties



Nuclear Astrophysics

LoI_Day1_26

- X(p,p), X(p,γ), X(p,α)

Neutron-Rich Nuclei

LoI_Day1_7

- Single-Particle structure
- Quenching of Shell Gaps

16 Lols submitted + 7 Lols (Phase 2 DESIR)
 Lols signed by 170 physicists

FISIC*: a collider project on SPIRAL2 for Atomic Physics

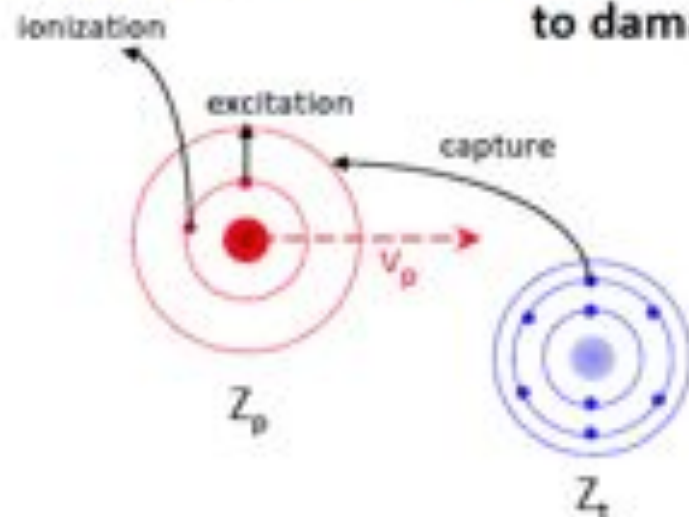
* Fast Ion Slow Ion Collisions

Atomic Physics of ion-ion collisions:

one of the widespread phenomena in the universe and the least studied in laboratory!!
limited knowledge when ion stopping power is maximum

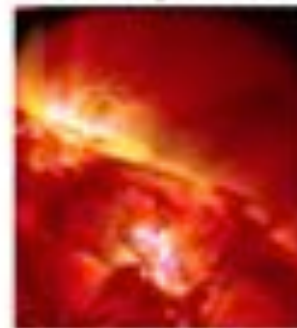
From the study of elementary processes

to damage in materials and ion energy transfer in plasmas



stopping power and ion-plasmas interaction

Stellar plasmas



inertial confinement fusion plasmas



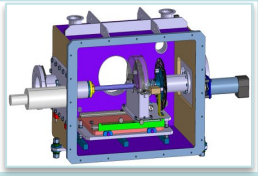
Mesures des sections efficaces en régime
Intermédiaire sur une grande gamme de système

S³ Baseline

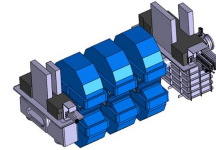
NIM B 266, 4162 (2008), IJMPE-Nuclear Physics, Vol. 18, (2009)
Nuclear Physics A 834 (2010) 747

Haute sélectivité et transmission – Sensibilité 1 événement/mois pour 10 fb
Technologies : Aimants supraconducteurs - Interaction faisceau-faisceau

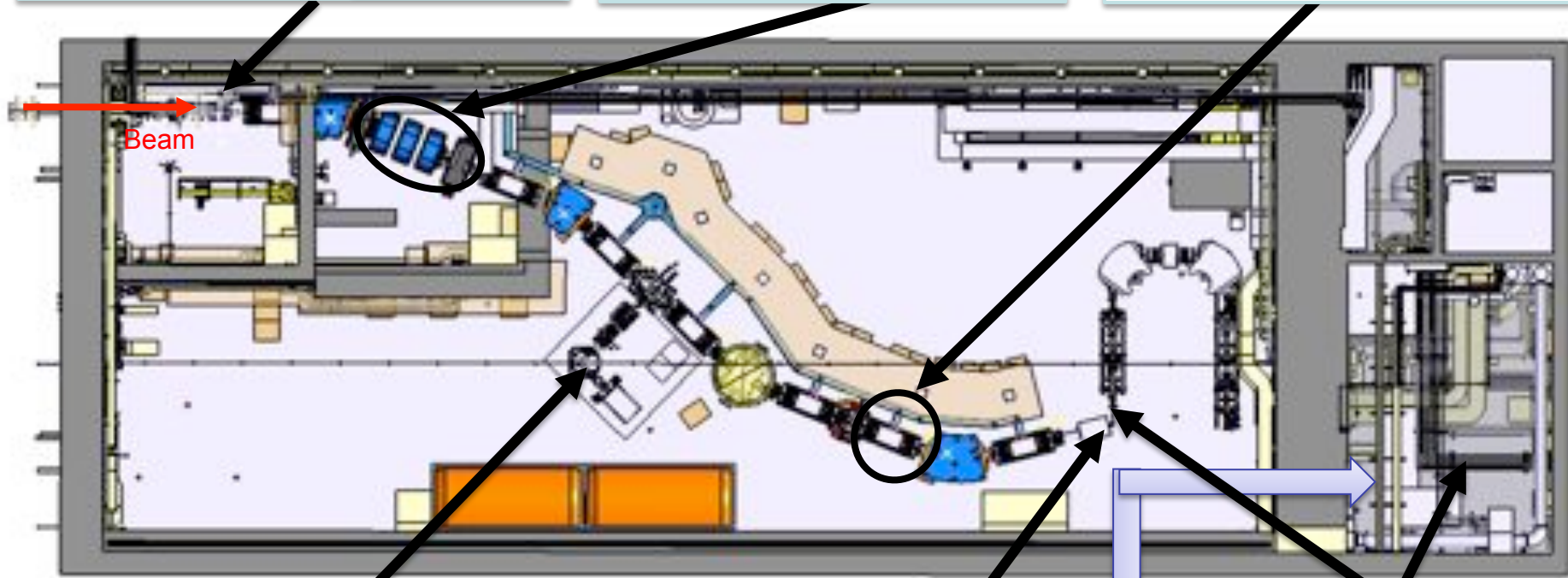
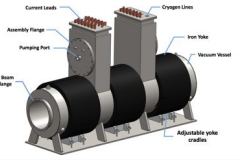
Cibles rotatives
Hautes puissances
Incluant actinides



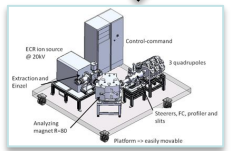
Zone dispersive
beam dump



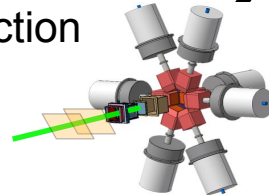
Multipoles SC
Grande
acceptance



FISIC setup
Fast Ion Slow
Ion Collisions

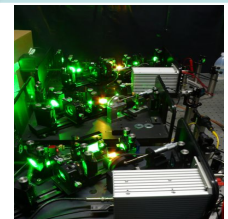


Station de détection
SIRIUS
Spectroscopie



DESIR

Ligne
Basse
Energie
REGLIS³



S³: Techniques Expérimentales

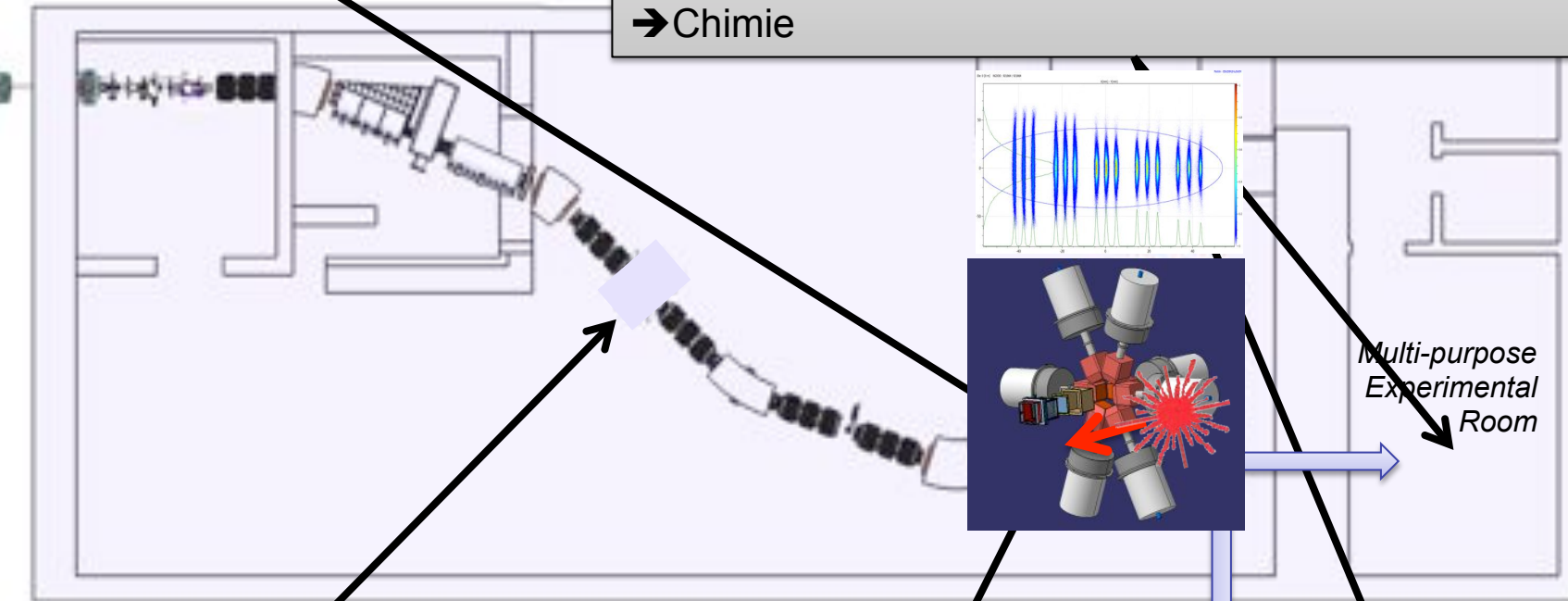
Selection & Identification

- Energy + Temps de vol
- Mesure de la masse en vol

Mesures propriétés fondamentales

Ligne basse énergie (REGLIS)

- B retardés
- Spectroscopie laser (Spin, moment, rayon de charge)
- Mesure de masse
- Chimie



Réactions en deux étapes

- Transfer+Fusion (transfer)

Modes spécifiques

- Collisions Ion-ion

Spectroscopie retardée SIRIUS stup

- p, α , γ , e- décroissance

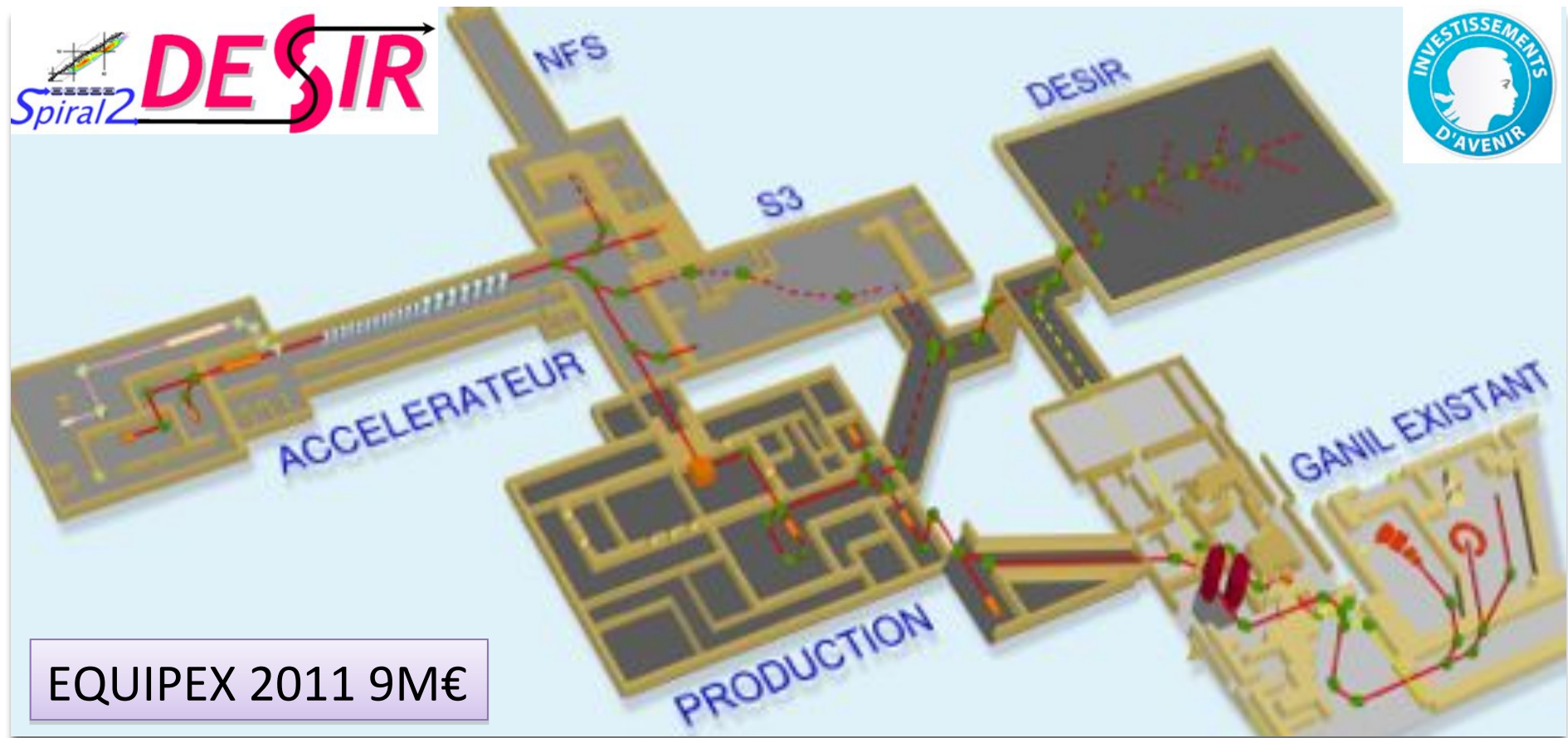
DESIR

Première expérience fin 2015



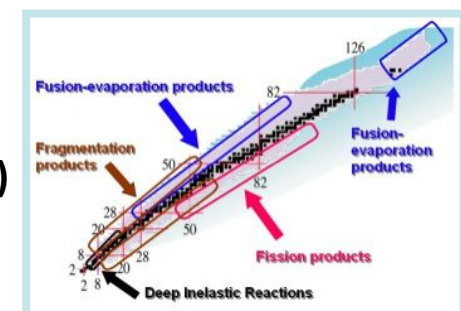
Instrumentation autour de SPIRAL2 PHASE2 Installation DESIR

Installation DESIR auprès de SPIRAL2



Faisceaux radioactifs basses énergies : 10 to 60 kV

- SPIRAL1 (light n-deficient nuclei from beam/target fragmentation)
- SPIRAL2 (n-rich fission fragments, transfer and fusion-evaporation products)
- S³ (fusion-evaporation products, refractory elements)



Collinear laser spectroscopy

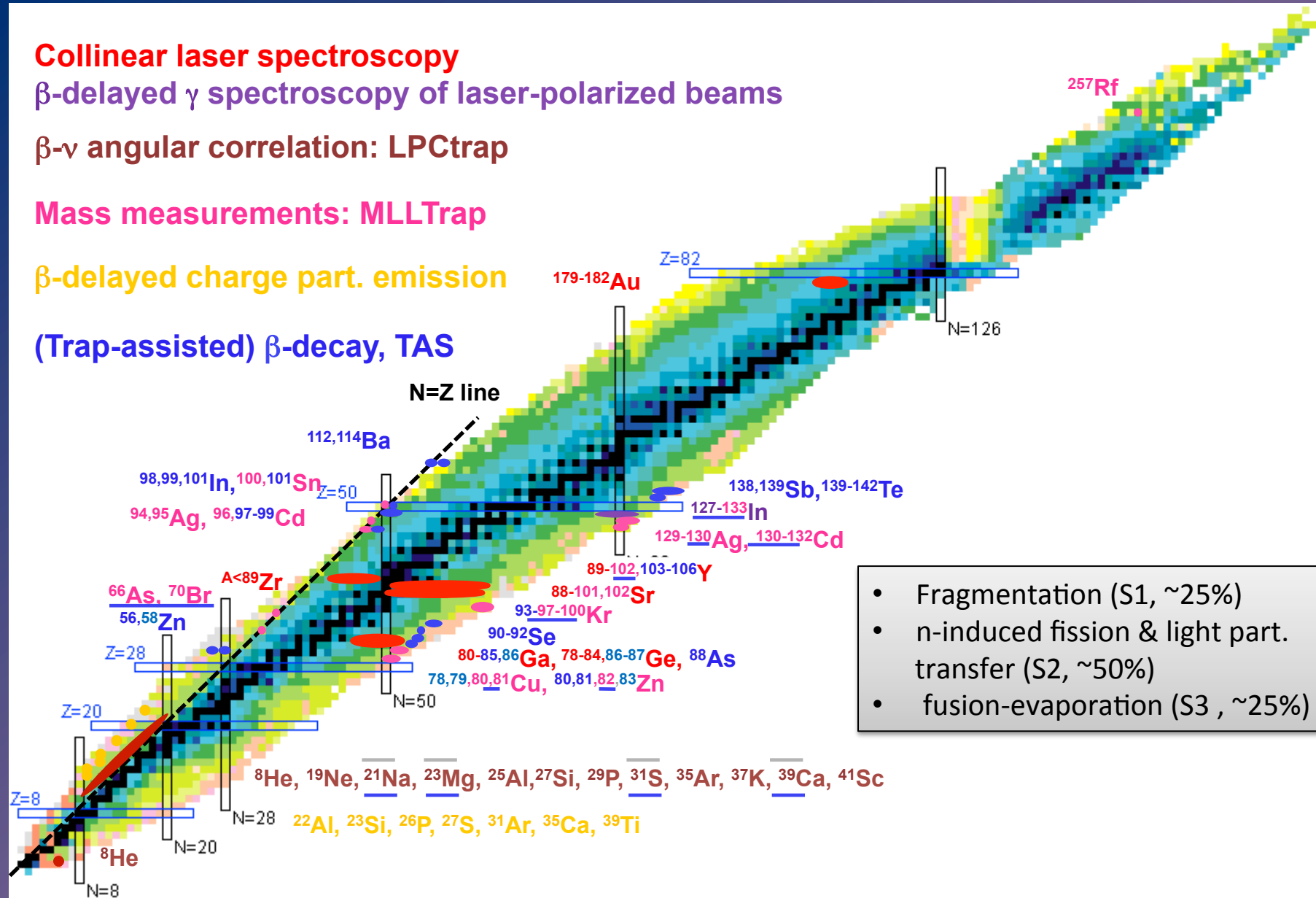
β -delayed γ spectroscopy of laser-polarized beams

β - ν angular correlation: LPCtrap

Mass measurements: MLLTrap

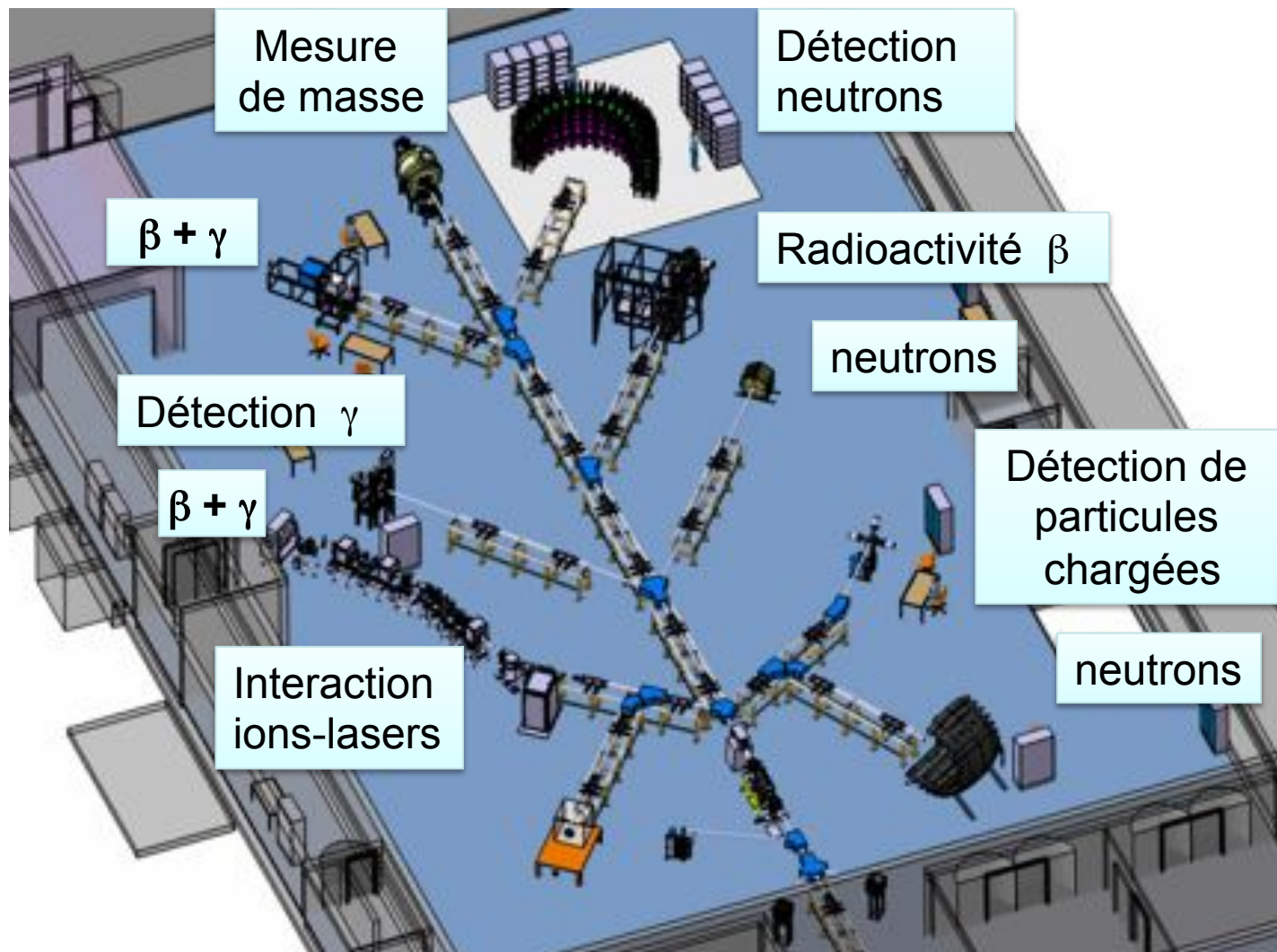
β -delayed charge part. emission

(Trap-assisted) β -decay, TAS



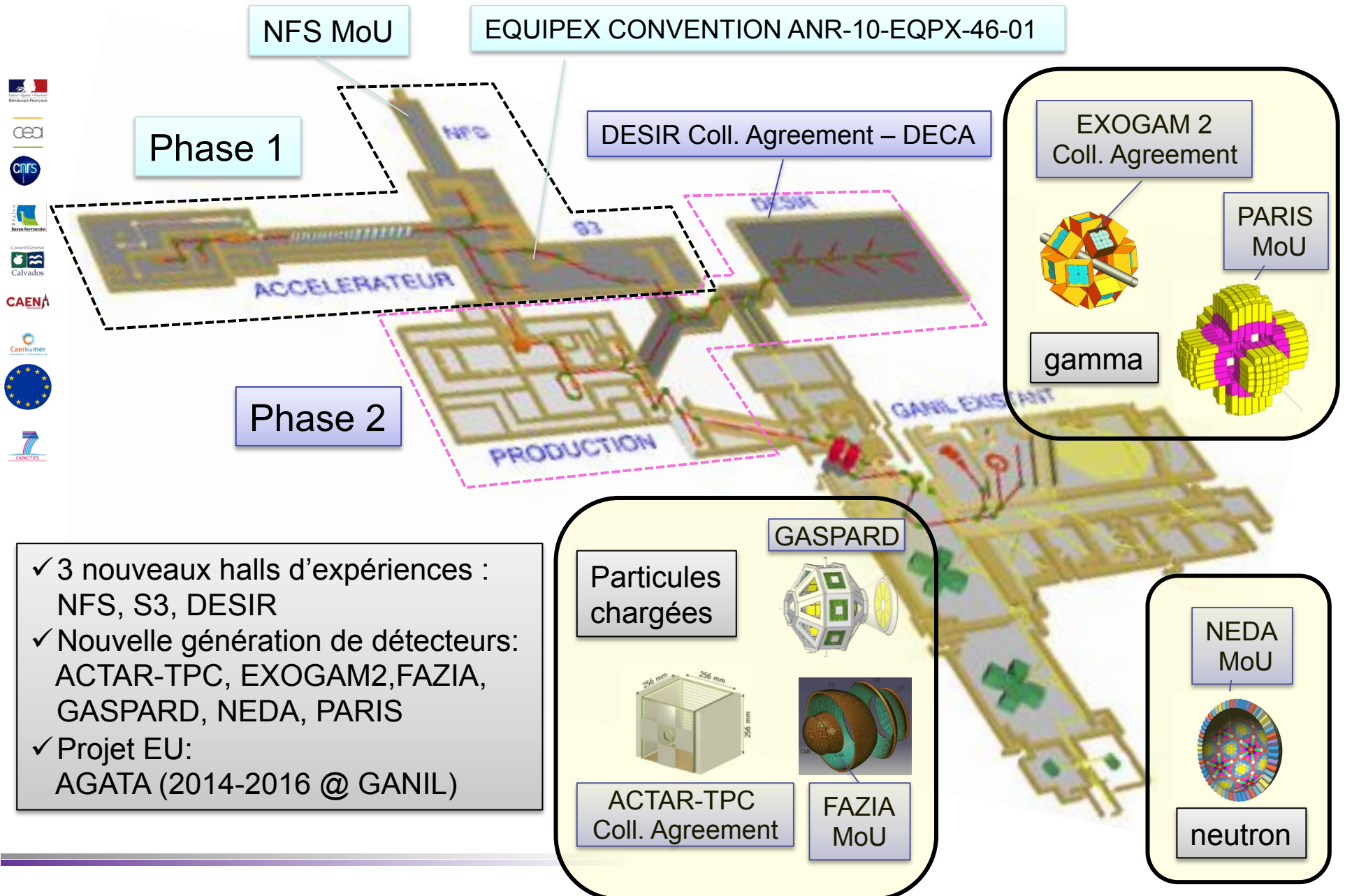
Expériences à basse énergie, permettant d'élargir les connaissances sur les **principales propriétés de l'état fondamental** de certains noyaux radioactifs, comme le mode de désintégration, la demi-vie, la masse, la charge, son rayon de charge et sa forme.

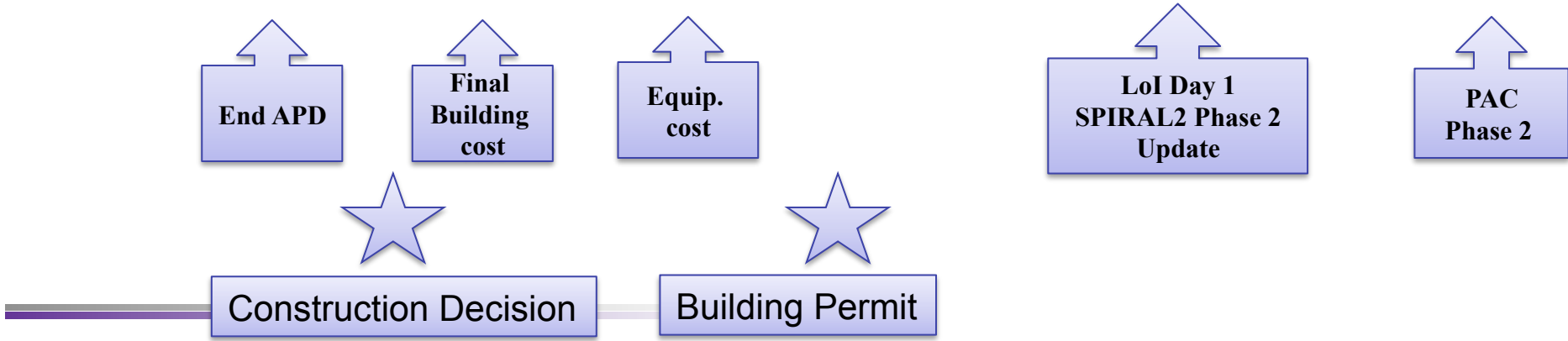
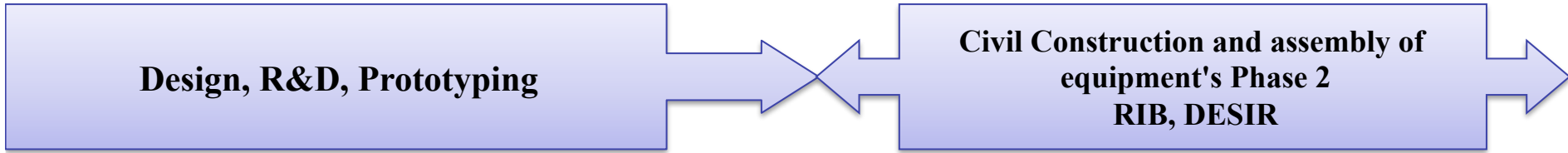
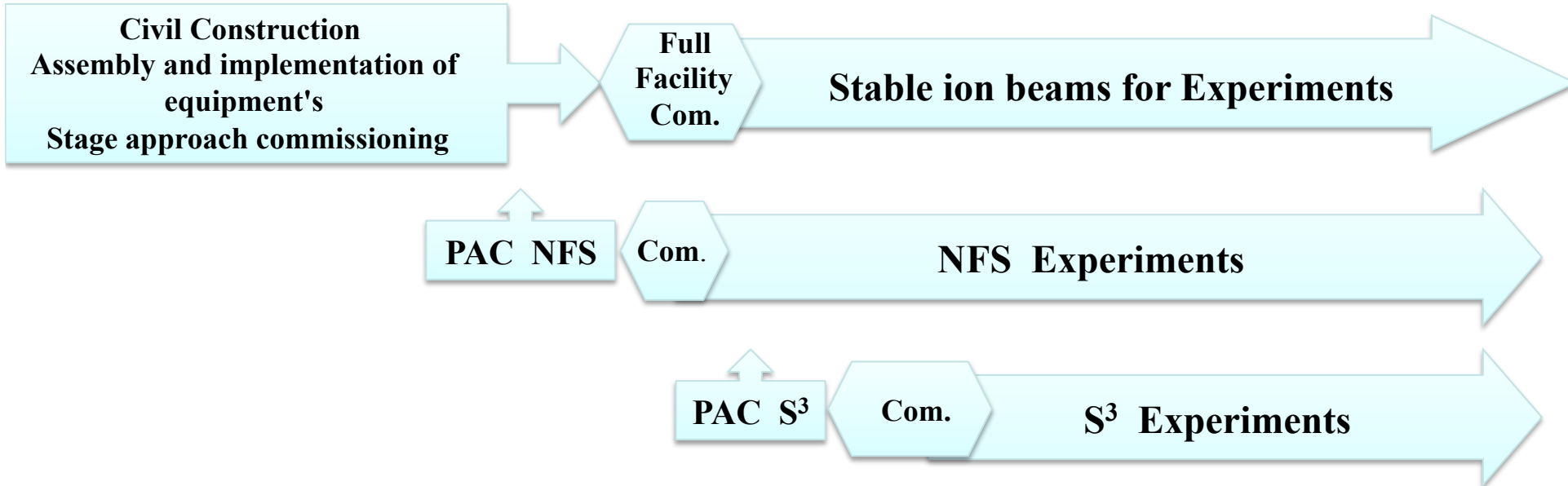
Plateforme d'Expériences DESIR



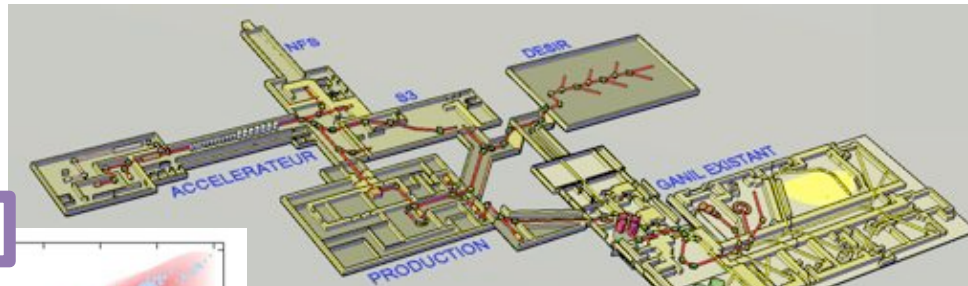
- Disponibilité d'un grand nombre de dispositifs expérimentaux permettant de **manipuler** et de **caractériser** en détail **les propriétés du noyau atomique** : masse, forme, propriétés de décroissances, structure du noyau...

Instrumentation autour de SPIRAL 2

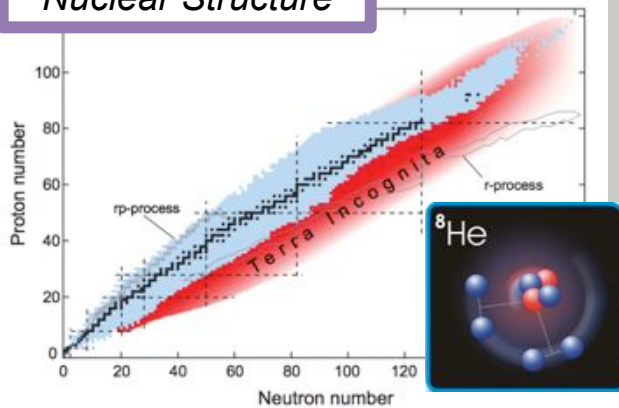




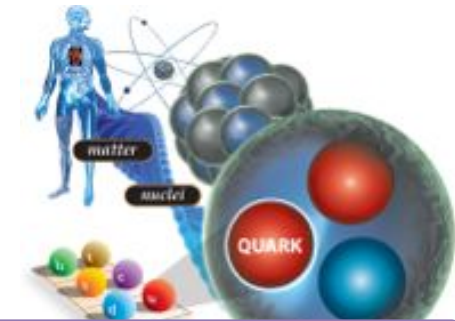
Science et Applications @ SPIRAL2



Nuclear Structure

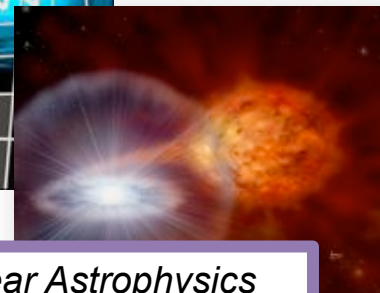
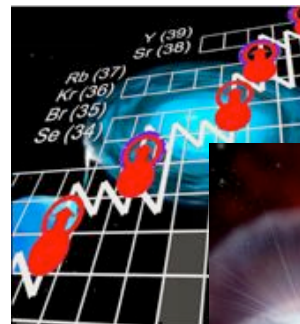


Radioactive ion beams
High intense stable ion beams
Neutrons for Science



Fundamental Interactions

Accelerator Science & Technology



Nuclear Astrophysics

Applications



Conclusions

- SPIRAL2 Phase 1 (LINAC, S3, NFS) en construction; génie civil terminé en 2013
 - Premier faisceau SPIRAL2 Phase 1 → Septembre 2014
 - NFS & première phase de S³ (8 M€ from EQUIPEX) financés et en construction
 - Premier faisceau NFS fin 2014
 - Premier faisceau S³ fin 2015
 - SPIRAL 2 Phase 2 (RIB, DESIR) Fin études détaillées en 2013, Décision de construction fin 2013, Génie civil démarre en 2015
 - DESIR: bâtiment et une partie des lignes de faisceau financés (9 M€ EQUIPEX)
 - Nouvelle génération détecteurs pour GANIL/SPIRAL2 en construction (ACTAR-TPC, FAZIA, NEDA, EXOGAM2, PARIS)
-

GANIL/SPIRAL2 by 2015

