

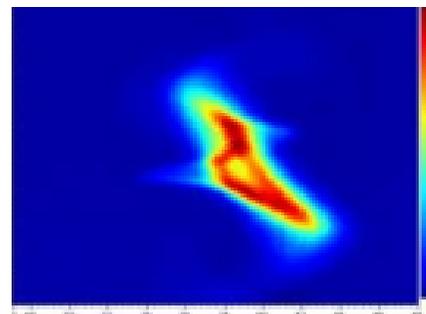
# Les Diagnostics Faisceaux pour Accélérateurs

“An accelerator is as good as its diagnostics”\*

23 juin 2021, Rapporteur: F.Poirier

Avec les membres du réseau instrumentation faisceaux

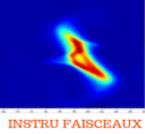
Présentation provenant des prospectives In2P3 et séminaires du RIF



INSTRU FAISCEAUX

\*Unknown author

# Réseau instrumentation Faisceau



- Le Réseau Instrumentation Faisceau (RIF) se donne comme mission première

- de favoriser l'échange d'information et
- le partage de compétences au sein de la communauté des physiciens, ingénieurs et techniciens sur l'instrumentation.

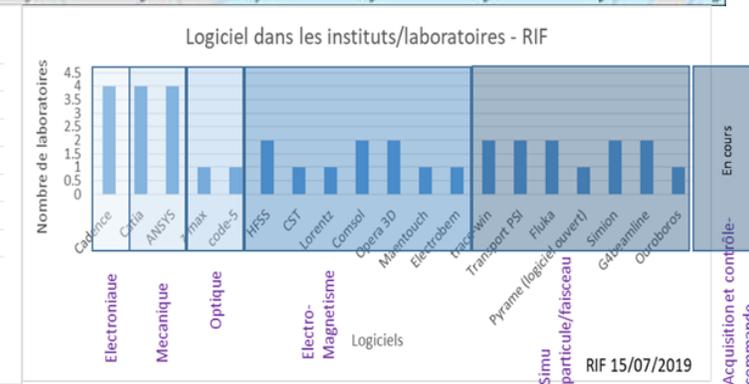
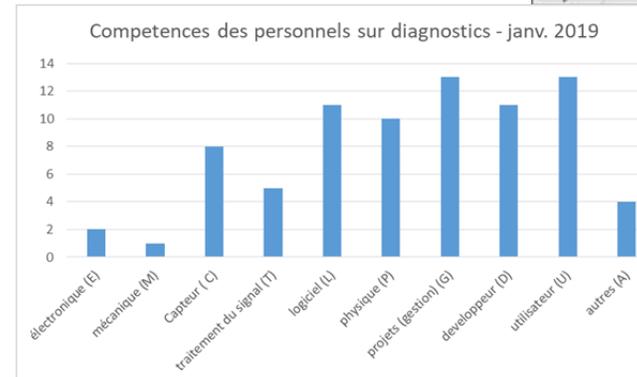
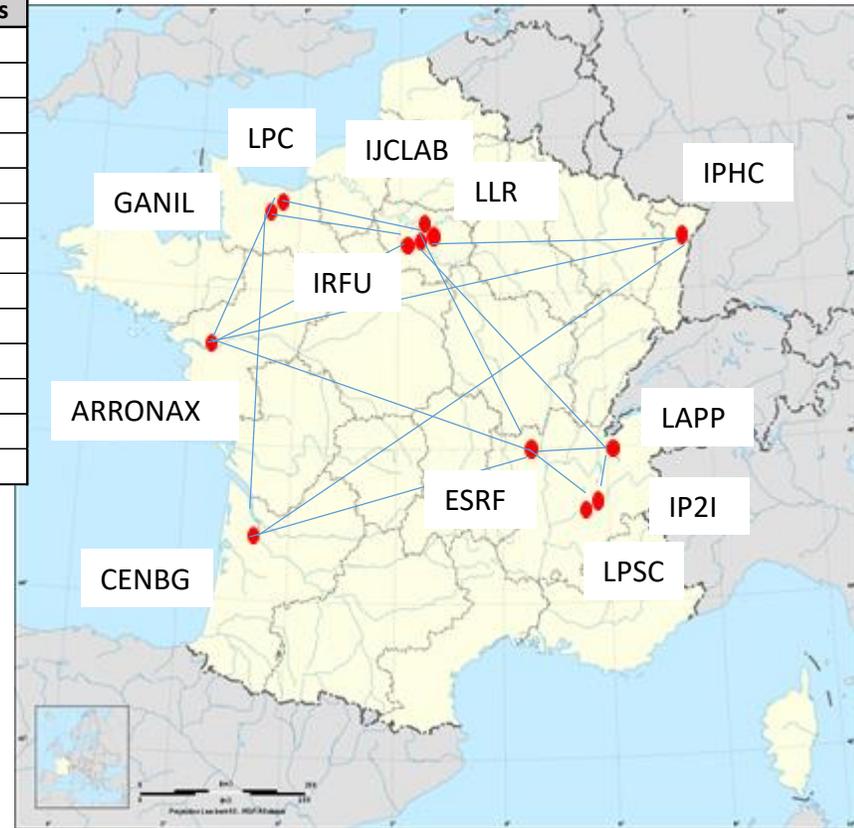
- Echanges:

- Liste de diffusion
- Séminaires/visioconférences spécifiques:
  - Eg: BPM, emittance-metre, Diag@piperade
- Site tech-news (en mise a jour)

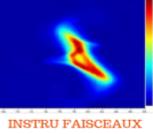
- Chiffres:

- Mise en route fin 2018
- 12 laboratoires et instituts
- 35 membres

Laboratoires
IJCLab
CENBG
LLR
LPC
LPSC
IPHC
IP2I
GANIL
ARRONAX
LAPP
ESRF
CEA/IRFU



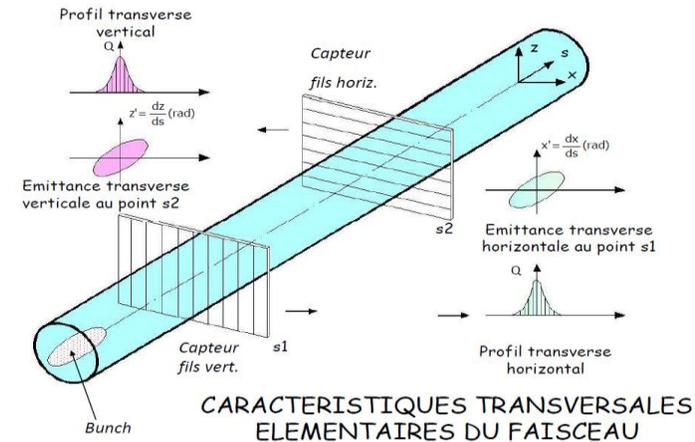
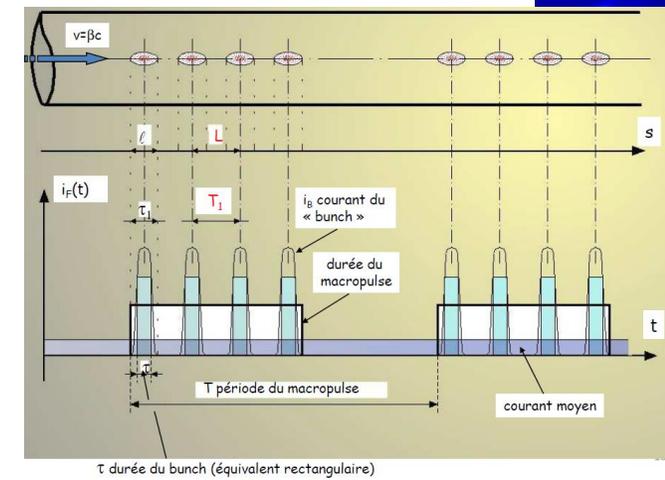
# Introduction: Les diagnostics faisceaux



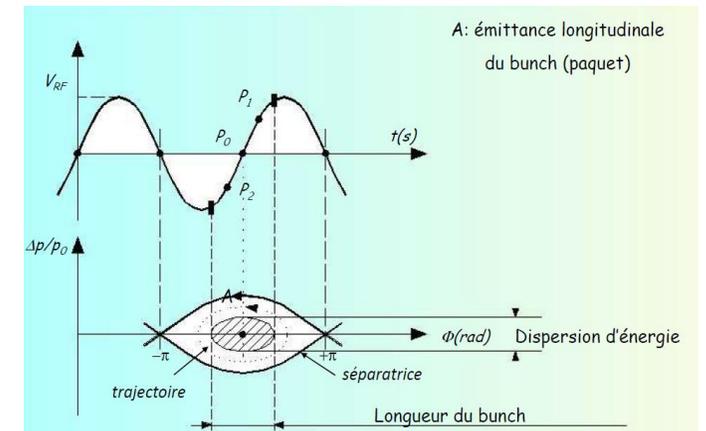
- Les performances des accélérateurs dépendent crucialement de la capacité à mesurer et contrôler les propriétés des faisceaux de particules\*.
  - Une demande de plus en plus exigeante pour des faisceaux hauts courants, des petites émittances, et tolérances strictes qui sont imposées aux paramètres des accélérateurs modernes.
  - Une (très) bonne compréhension des diagnostics est essentielle pour parvenir aux performances attendues
  - L'ensemble des diagnostics n'est pas systématiquement conçu et mis en place avant la mise en route de l'accélérateur et diag. sont souvent aussi rajoutés au cours de la vie de l'accélérateur.
- Les diagnostics rassemblent:
  - Les instruments de mesure
  - Les électroniques associées et matériels de traitement
  - Les applications hauts niveaux (traitements softs et méthodologies d'usage)

# Les diagnostics faisceaux:

- Nous pouvons recenser le besoin de mesurer les grandeurs physiques suivantes:
  - mesures d'intensités,
  - transverses,
  - longitudinales (temporelle et phase),
  - d'énergie,
  - d'émittance,
  - de pertes de particules.



Patrick Ausset & Nicolas Delerue (école accélérateur In2P3)



# Diagnostiques faisceaux

- Pour la communauté française, ces diagnostics doivent pouvoir fonctionner dans une large gamme des caractéristiques des accélérateurs (plusieurs ordres de grandeur):
  - Plusieurs types particules/ions: lepton aux ions lourd
  - $\langle I \rangle$  = Intensité moyenne faisceau (quantité de particules)
  - $\langle E \rangle$  = Energie ( $\beta < 0.1$  à  $\beta \sim 1$ )
  - $\langle f \rangle$  = fréquence (des paquets/trains...)
  - Avec une combinaison de ces paramètres (ex haute puissance =  $\langle E \rangle \cdot \langle I \rangle$ )
- Les technologies et géométries sont variées et peuvent être basées (loin d'être exhaustif):
  - Sur l'électromagnétisme (anneaux de cuivre, cavités, transformateurs, plaques de déviation)
  - Sur l'interaction avec un/des éléments (chambre à fil, à gaz, arrêt faisceau)
  - Avec différents matériaux: cuivre, scintillateur, stripline, combinaisons plus exotiques
- Des points communs a tous les diagnostics faisceaux:
  - Taille réduite/Compacte
  - Capacité a s'insérer dans une ligne d'accélérateur
  - Quelques fois primordial:
    - Etre le moins perturbatif possible
    - Etre le plus rapide possible (rapidité: définition spécifiques au diag/accélérateur)

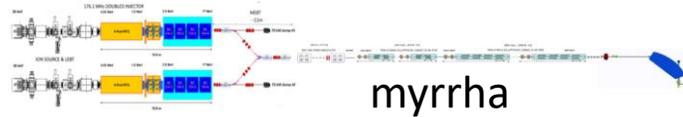
# Accélérateurs et Instruments faisceaux

- A l'IN2P3, les projets répondent à ses besoins présents et futurs à travers plusieurs installations sur le territoire national et des accélérateurs internationaux dans lesquels les personnels experts en instrumentations sont impliqués :

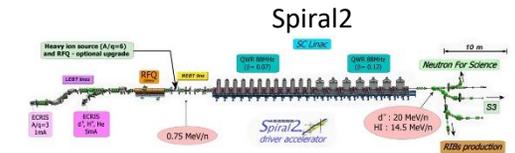
- pour les accélérateurs de recherche tels **qu'AIFIRA, ANAFIRE, CLIO, PHIL, PRECy, ThomX**



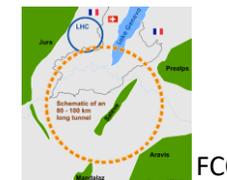
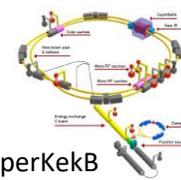
- pour les accélérateurs du domaine sociétal et de santé tels que l'**ESS, Myrrha, Arronax**



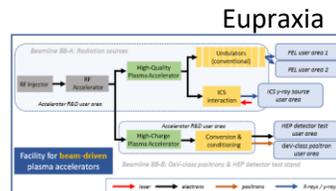
- pour les grands accélérateurs nationaux et internationaux\* : **Spiral2**



- pour les collisionneurs **SuperKEKB, ILC, CLIC, FCC.**



- les nouveaux concepts d'accélérateur basés sur l'accélération dans un plasma par exemple **Apollon, EuPRAXIA.**



\*ESRF, Soleil: non considéré ici, mais important aussi

# Exemples Instru Faisc. en dvt

Heavy ion source (A/q=6) and RFQ - optional upgrade

SC Linac

QWR 88MHz ( $\beta = 0.07$ )

QWR 88MHz ( $\beta = 0.12$ )

Neutron For Science

DESIR

RIPERADE

RIBs production

0.75 MeV/n

Spiral2 driver accelerator

$d^+ : 20 \text{ MeV/n}$   
 $HI : 14.5 \text{ MeV/n}$

10 m

LEBT lines

RFQ

MEBT line

ECRIS A/q=3 1mA

ECRIS  $d^+, H^+, He$  5mA

BPM

Faisceau

TOF

Profileur

100 mm

100 mm

UC Lab

Banc de caractérisation faisceau pour spiral2 dans la ligne moyenne énergie

Banc de test intermédiaire (BTI) IPHC - Strasbourg

Emittance H+V

Profilleurs Ionisation Gaz H+V

Diagnostique Optique

DCCT

Longueur Paquet

Vanne

ACCT

BposM

TOF

Beam Stop

Cage de Faraday Rapide

Pompes

Profilleur Harpes

BLM

BPM

FC

IPHC

THOMX

ICT1

ICT2

ICT3

FC

FC

IPHI (Injecteur de Protons à Haute Intensité)

UC Lab

Irène Joliot-Curie

Laboratoire de Physique des 2 Infinis

R.F.Q.

A.C.C.T.

Pick up

Dipole magnet

Pump

Quadrupoles magnets

Wire scanner

D.C.C.T.

CCD cameras

B.P.M.

Beam stopper

Pumps

B.P.M.

Steerer

Projet Multi-accelerateurs

BPM

MURRHA



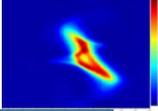
EMITTANCE-METRE

Basse énergie - haute intensité

EMITTANCE-METRE

Basse énergie - haute intensité

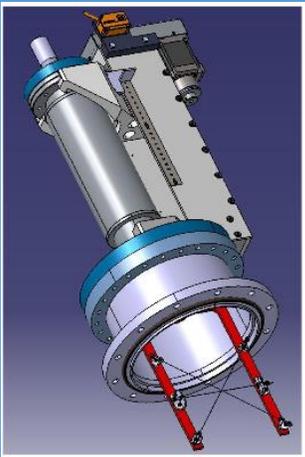
7



AUX

# Exemples Instru Faisc. en dvt

## Sur Banc de source en vue de Myrrha

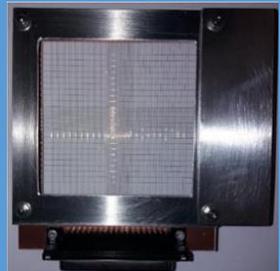


+ activités diag sur accélérateurs ex: ESS, MYRRHA, KEK, LHC, JNIR,...

## Diagnostics a fil pour implanteur 400kV

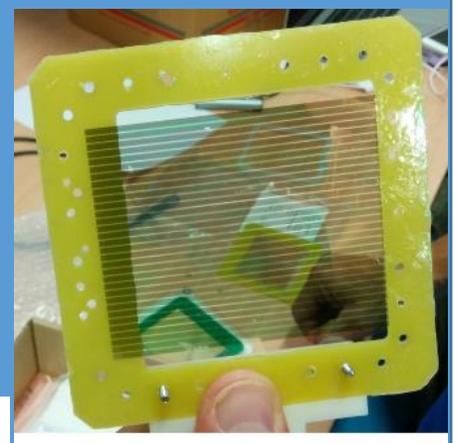
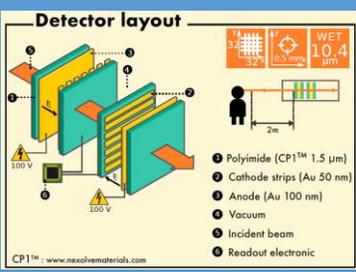


Ensemble AIB/DDC264EVM



CF motorisée

## Diagnostics « transparent »

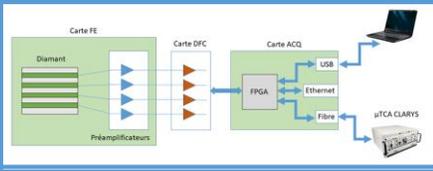


Pistes, CP1™ 1,5 μm + Au 50 nm



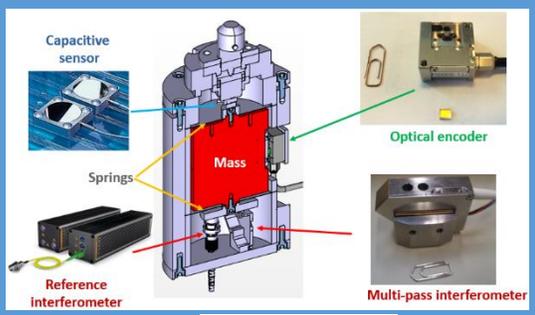
BLM/  
BPM

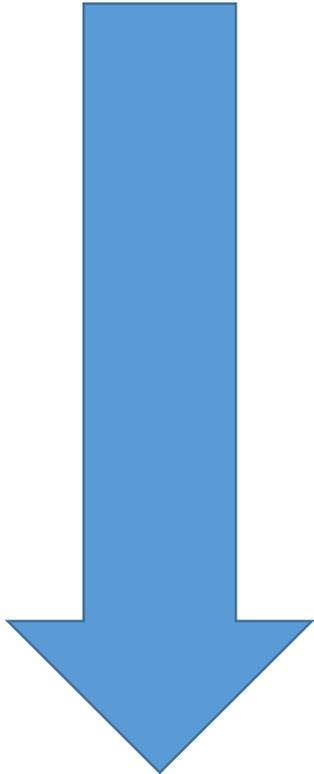
## Technologie diamant



## + thématique « impact vibration et stabilisation faisceau » :

Développement capteur dédié au contrôle dans un milieu accélérateur





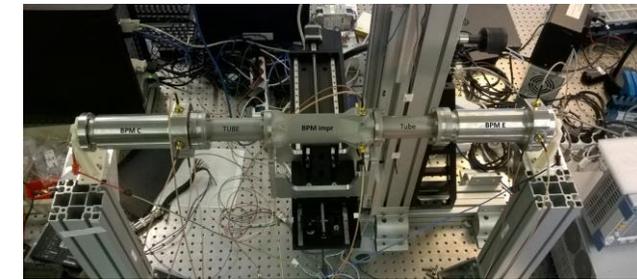
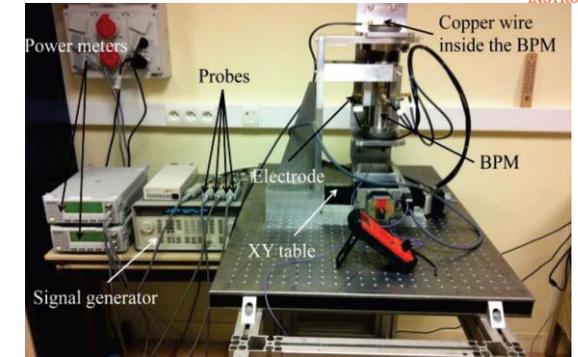
- **Exemples de réflexions et travaux en cours**
  - Banc de test pour diagnostics
  - Exemples de travaux sur diagnostics spiral2
  - Emittance-metres
  - Diagnostics
    - pour machine hadronique
    - pour machine leptonique

# Bancs de test

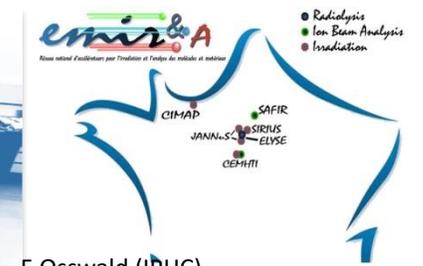
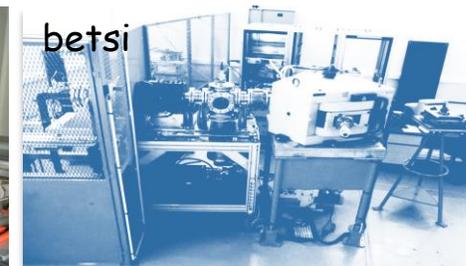
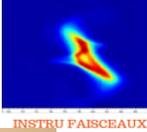
Le **développement** d'un nouveau diagnostic faisceau demande un investissement important en raison de sa technicité et de l'infrastructure nécessaire.

- Besoin de bancs sans faisceau, employé dans les différentes étapes de recherche:
  - permettant de caractériser les éléments constitutifs du diagnostics.
  - Exemples:
    - Caractérisation de l'électronique des diagnostics
    - Caractérisation de la précision BPM (IJCLAB,IPHC)
- Bancs avec faisceau:
  - Faisceau étalons pour qualifier le nouveau prototype, d'un faisceau calibré et réglable et de plusieurs compétences
  - Utilisation d'accélérateur déjà en opération

M.Abdillah (IJCLab)



N.Delerue (IJCLab)



F.Osswald (IPHC)

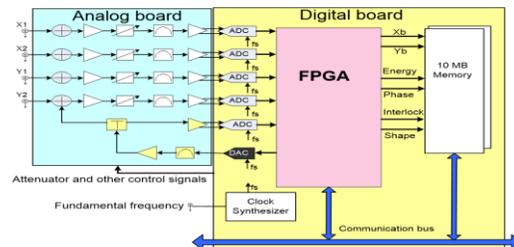
# Besoins associées aux diagnostics sur Spiral-2

C.Jamet (GANIL)

- ✓ Mesures de rendements et de transmissions
  - ✓ Chaines de contrôle et de surveillance à base de transformateur d'intensités. Développement d'une électronique d'acquisition rapide avec traitement du signal en numérique **2022-2025**
- ✓ Mesures de courant non-interceptives (ACCT)
  - ✓ Fournitures de nouveaux diagnostics avec des chaines de mesures optimisées en sensibilité par rapport à l'existant pour répondre aux demandes de S3, NFS et du projet NewGAin **2022-2023**
- ✓ Mesures BPM
  - ✓ Fiabilisation des chaines de mesure et du traitement du signal **2020-2021**
  - ✓ Calculs de la vitesse du faisceau à partir des mesures de phase « absolues » des BPM **2020-2021**
  - ✓ Augmentation de la dynamique de mesure avec une optimisation de la sensibilité **2021-2022**
  - ✓ Automatisation des calibrations **2021-2022**
  - ✓ Reprise et optimisation des codes FPGA et C des interfaces **2022-2023**
  - ✓ Théorie, simulations et qualifications des mesures d'ellipticité **2020-2022**
  - ✓ Rénovation des électroniques pour cause d'obsolescence **2025-2028**



M.Abdillah  
(IJCLAb)



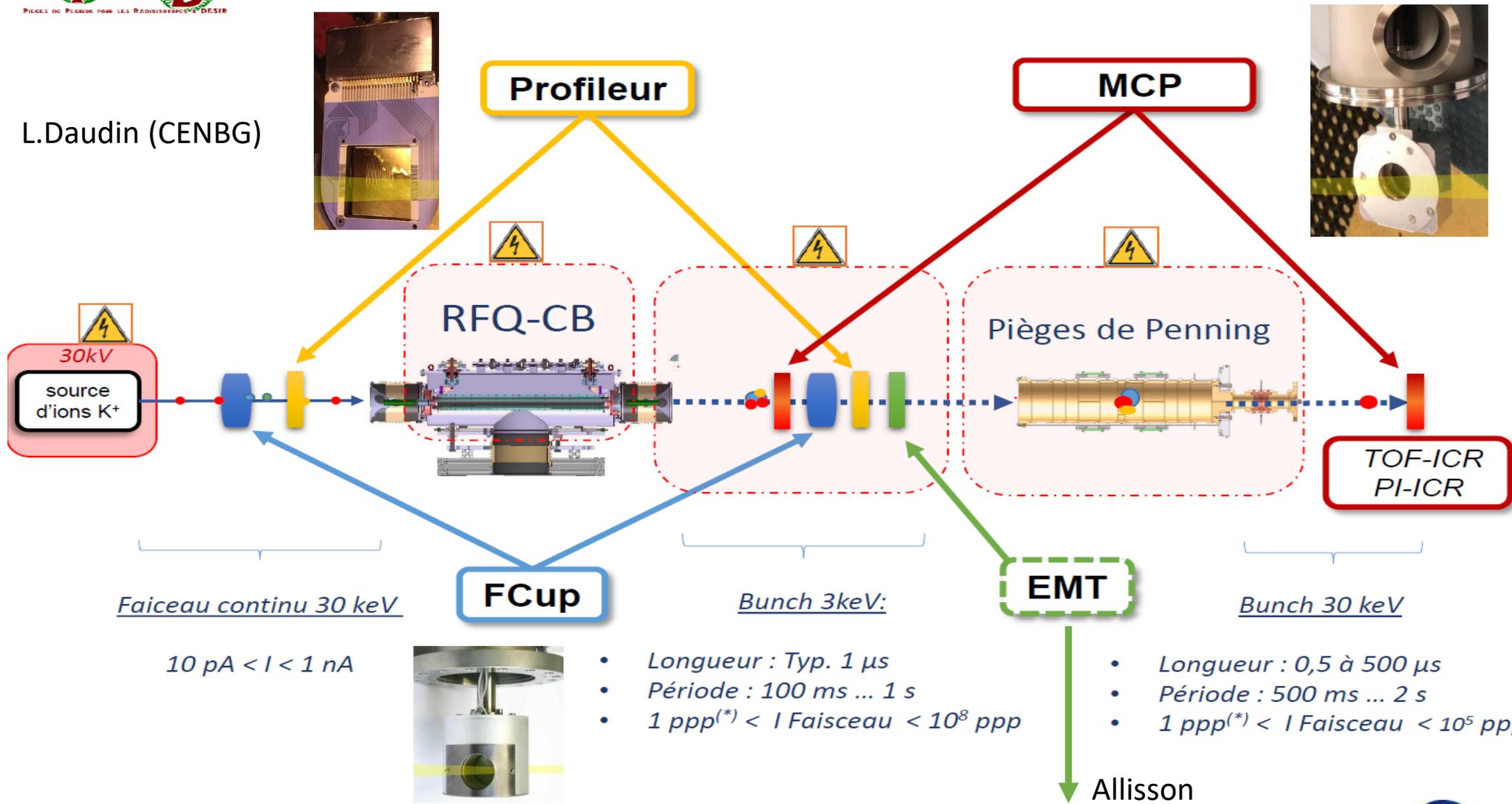
Dates prévisionnelles des actions à engager

# Besoins associées aux diagnostics sur Spiral-2

- ✓ Détecteurs de pertes faisceau
  - ✓ Etude et fiabilisation des détecteurs de pertes (BLM) **2020-2021**
  - ✓ Analyse et évolution du système existant **2021-2025**
  
- ✓ Mesures longitudinales des paquets (BEM: Bunch Extension Monitor)
  - ✓ Développement ou fiabilisation de systèmes de mesures non interceptifs de mesures longitudinales **2020-2021**
  
- ✓ Emittancemètres
  - ✓ Fiabilisation et mise eu point des systèmes existants **2021-2022**
  - ✓ Développement d'émittancemètres pour le projet NewGain (IPHC + GANIL) **2022 -2025**
  
- ✓ Système de synchronisation avec horodatage des mesures diagnostics
  - ✓ Horodatage des différentes mesures diagnostics avec une résolution de 10 $\mu$ s pour du traitement post-mortem après coupures du faisceau **2021-2022**

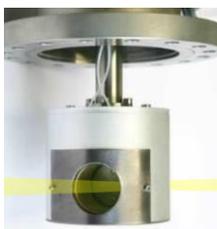


L.Daudin (CENBG)



*Faiceau continu 30 keV*

$10 \text{ pA} < I < 1 \text{ nA}$



**FCup**

*Bunch 3keV:*

- Longueur : Typ.  $1 \mu\text{s}$
- Période : 100 ms ... 1 s
- $1 \text{ ppp}^{(*)} < I \text{ Faiceau} < 10^8 \text{ ppp}$

(\*) ppp : particules par paquet

**EMT**

- Longueur : 0,5 à 500  $\mu\text{s}$
- Période : 500 ms ... 2 s
- $1 \text{ ppp}^{(*)} < I \text{ Faiceau} < 10^5 \text{ ppp}$

Allisson scanner

*Bunch 30 keV*

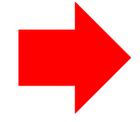
# Projet d'émittance-mètre compact type Alisson-scanner

## Genèse du besoin (quelques exemples) :

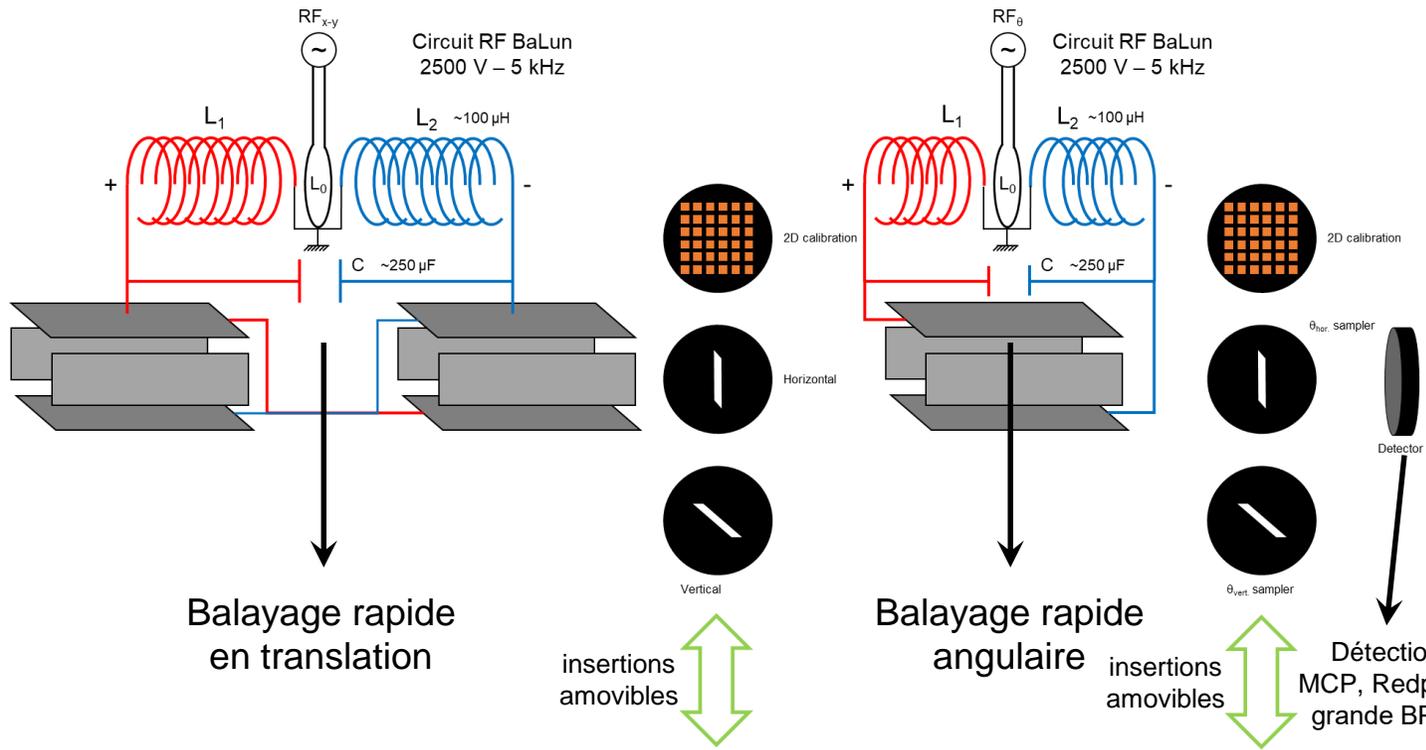
- RFQ-cooler-buncher (GPIB) pour un piège de Penning (PIPERADE) → CENBG
- Séparateur à haute résolution HRS → CENBG
- RFQ-cooler (SHIRaC) pour l'entrée du HRS + SPES (INSM) → LPC-Caen
- Autres?

## Comment qualifier ces équipements ?

- Prêt d'un Alisson-scanner home-made (CSNSM)
- Exemple unique → durée courte pour qualification
- Nécessité d'un update de l'émittance-mètre
- Pepper-pot (Pantechnik) mais systèmes fermés



## Idée de concept



## Rendre disponible pour la communauté un Alisson

- Mesure rapide (5 min.)
- Système compact et simple (30 cm)
- Autonome, calibration, bas coût
- Faible (<1 nA) et fort courant (i.e. 100 nA)
- Construction figure d'émittance maîtrisées (<60 keV)
- Expertise du service Instru. au CENBG
  - contrôle commande, vide, détecteur, RF
  - mécanique, électronique, acquisition



## Collaboration IPHC en cours

- Expertise dans le domaine (EmitM)
- Campagne de mesures prévu au CENBG
- Essais avec F. Osswald sur bancs d'essai HRS et AIFIRA



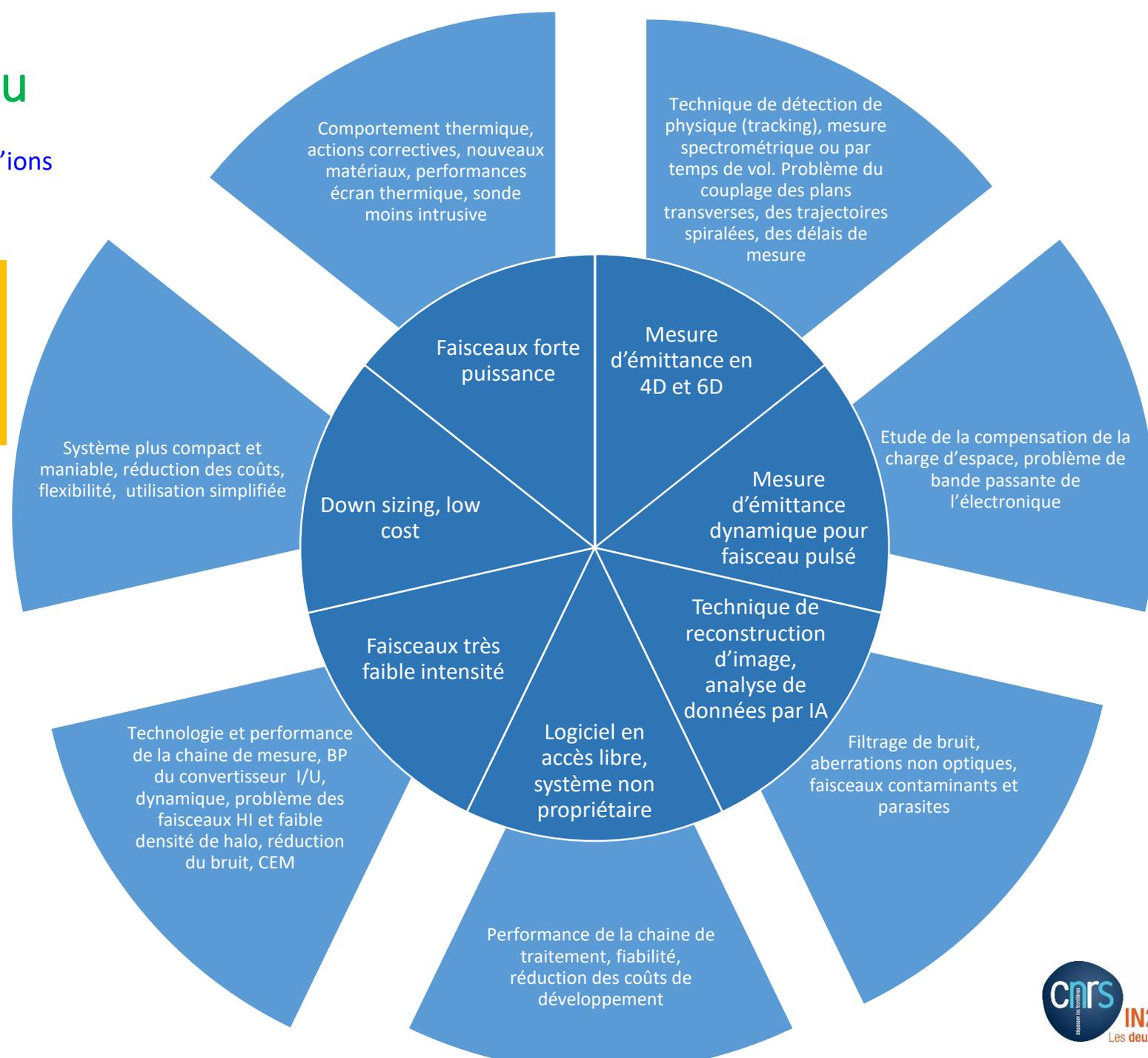
# Tendances pour les émittance-mètres du futur

Faisceaux d'ions

Travail d'identification des tendances et problématiques techniques des émittance-mètres transverse:

F.Osswald (IPHC)

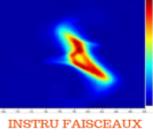
- Revue des émittances-mètre en France
- Reunion speciale émittance-mètres



Tendances

Problématiques techniques

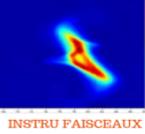
# Les diagnostics pour accélérateur hadronique forte puissance



B.Cheymol (LPSC)

- Quelques spécifications auxquelles devront répondre les diagnostics :
  - Avoir une plage dynamique importante, notamment pour mesurer le halo
    - « Halo matching » pour minimiser les pertes
  - Pouvoir mesurer le faisceau à bas cycle utile et à haut cycle utile (de qq fraction de % à CW)
    - développement d'instrument non invasif
  - Répondre aux demandes de la dynamique faisceau en terme de précision
    - R&D sur mesure longitudinal
    - Développement d'emittance mètre (2D&4D)
  - Répondre aux contraintes d'intégration mécanique (dimensions, environnement cryogénique...)
  - Forte intégration dans le système de contrôle de l'accélérateur
    - Meilleure utilisation des données issues des diagnostics

# Développement d'émittance mètre



- Emittance mètre haute puissance dans le cadre du projet MYRRHA:

- Baser sur le principe fente/grille
- Haute résolution
- Utilisable de 1,5 à 17 MeV
- Fente conçue pour absorber un faisceau  $\geq 1$  ms

- Développement d'émittance mètre 4D:

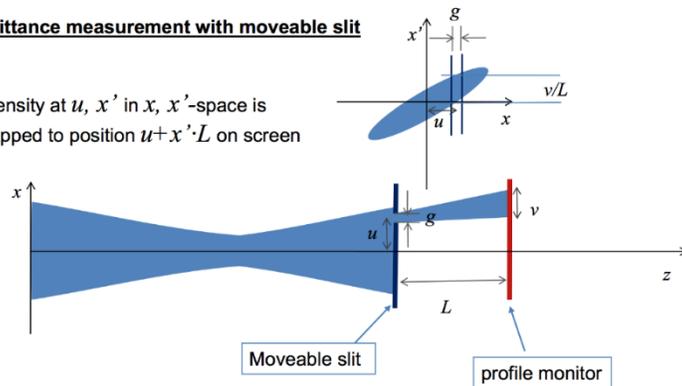
- Upgrade de l'émittance mètre en émittance mètre 4D

- Concept: émittance mètre multi fentes
- Mesure après RFQ (1,5 => 17 MeV)
- Temps de mesure long
- R&D nécessaire pour réduire le temps de mesure

- Nouveau concept à développer pour ligne à basse énergie ( $E = qq$  keV à 200-300 keV)

## Emittance measurement with moveable slit

Intensity at  $u, x'$  in  $x, x'$ -space is mapped to position  $u+x'L$  on screen



From width and position of slit image mean beam angle and divergence of slice at position  $u$  is readily computed.

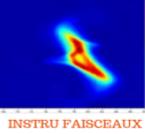
By moving slit across the beam complete distribution in  $x, x'$  space is reconstructed.



## Principe de mesure d'émittance par système fente/grille

Fente développer pour le LINAC4 (CERN BI group)

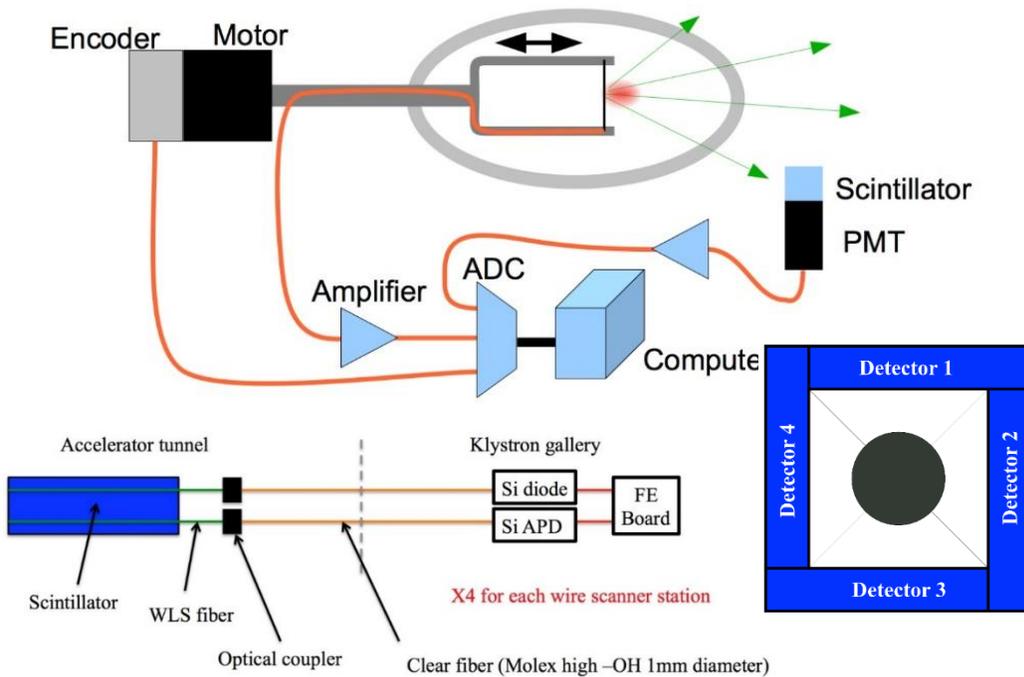
# Mesure de profil transverse



Principe: Utilisation conjointe de wire scanner et de profil non invasif pour couvrir tous les besoins, notamment pour le projet MYRRHA

- **Wire scanner:**

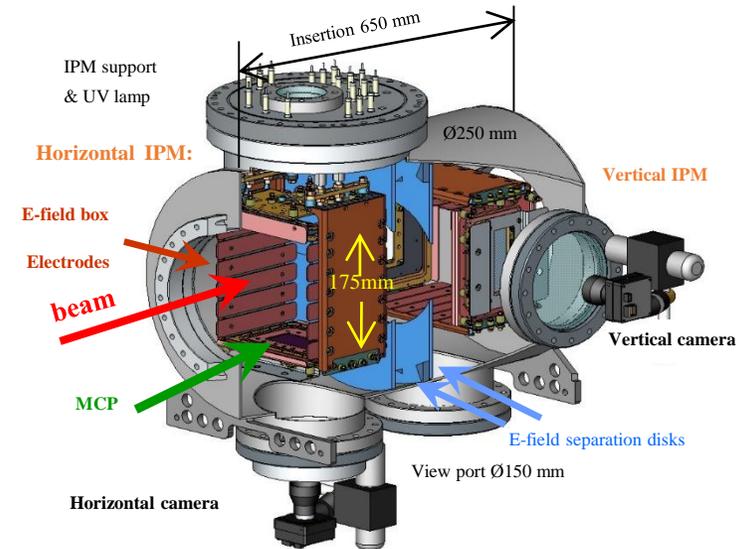
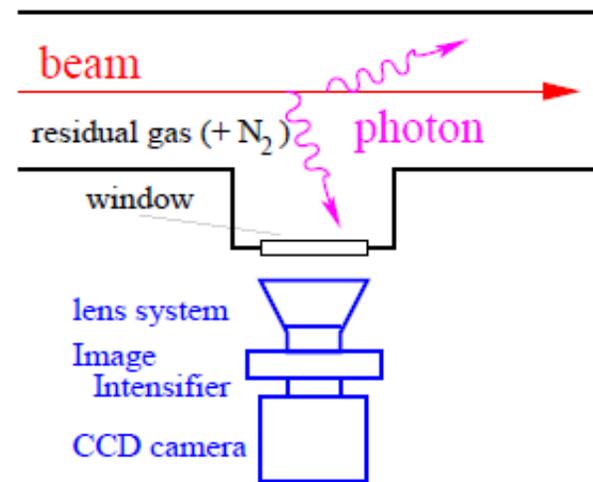
- Utilisable à bas cycle utile ( $t_{pulse} > 5-10 \mu s$ )
- Grande plage dynamique de mesure ( $> 10^4$ )
- Insensible aux effet de charge d'espace



ESS wire scanner scintillator detector scheme  
(B. Cheymol HB2016)

- **Profil non invasif:**

- Utilisable en CW
- Plage dynamique suffisante pour mesurer les tailles RMS
- Utilisation de profileur à luminescence à basse énergie
- Utilisation de profileur à ionisation à haute énergie (limite à déterminer)



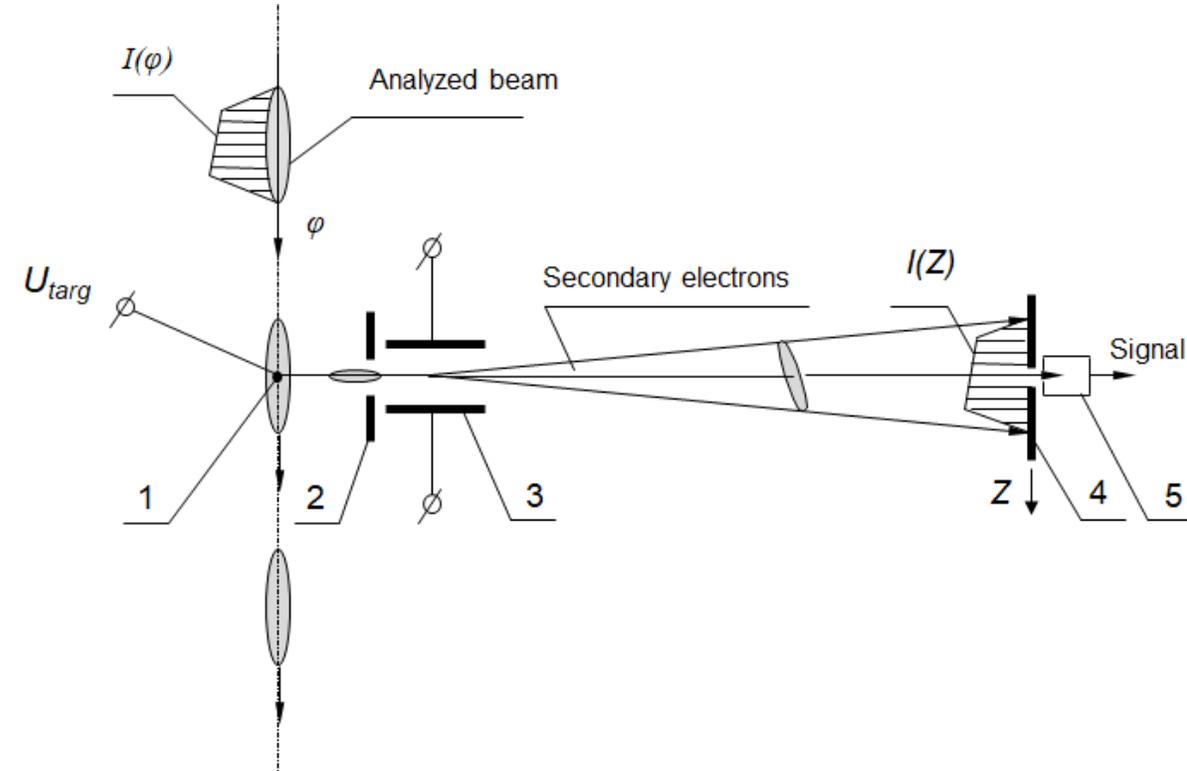
P. Fork (GSI) at OPAC workshop in Vienna (2014): Least invasive beam profile measurements:

Ionization profil Monitors and Beam Induced Fluorescence

# R&D à plus long terme

N.Delerue (IJCLab)

- Reconstruction du faisceau par tomographie
- Anticipation des pannes/pertes faisceau
- Développement de concept pour la mesure longitudinale à haute énergie ( $E > 200$  MeV)
  - A basse énergie Le Bunch Shape Monitor (BSM) développé par A. Feshenko est idéal pour des longueurs de paquets de l'ordre de la dizaine de picoseconde
  - Dans les linacs à haute énergie les longueur de paquets sont de l'ordre de la picoseconde
  - Nouvelle technique à mettre en œuvre, possiblement basé sur les méthodes utilisés dans les accélérateurs leptoniques



**Principe du BSM (Bunch Shape Monitor) :** 1 – la cible, 2 – le collimateur d'entrée, 3 – un déflecteur RF combine avec une lentille électrostatique, 4 – le collimateur de sortie, 5 – le point de collection des électrons

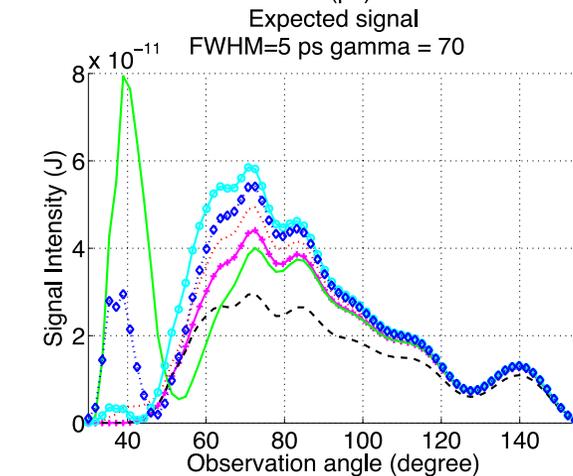
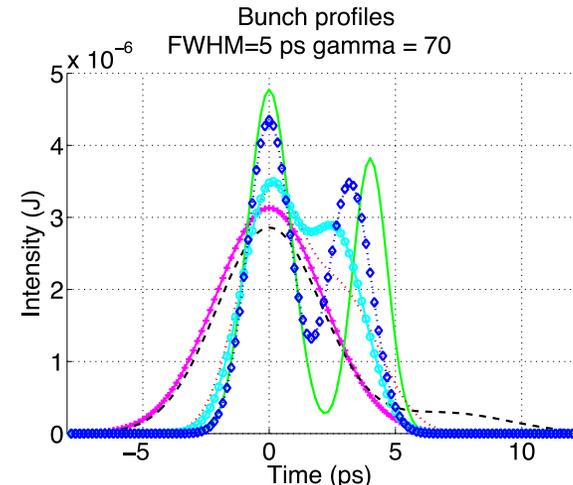
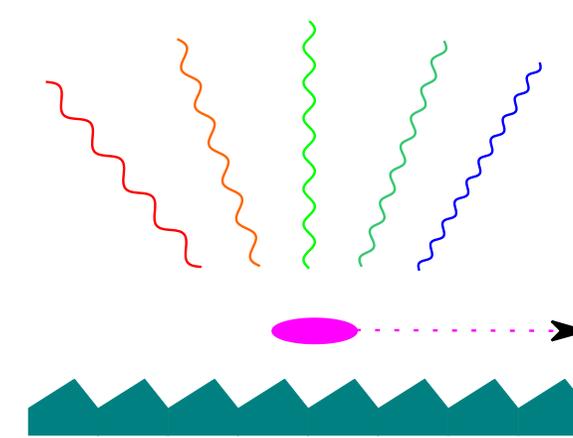
# Moniteurs de profils longitudinaux (sub-ps) [1/2]

- Motivation:
  - Comprendre modes ordre supérieurs et effets collectifs (ERL, anneaux,...)
  - Augmentation brillance
- Mesures directes impossibles (sous la résolution de l'électronique).
- Mesures par déflexion du paquet possible mais coûteuses.
- Mesures par phénomènes cohérents:
  - Rayonnement de transition cohérent (CTR) => mais destructif
  - Rayonnement de Smith-Purcell cohérent\* => R&D en cours

\* faisceau (d'électrons) passe à proximité d'un réseau conducteur et induit un rayonnement électromagnétique depuis la surface du réseau, peut être utilisé comme source de rayonnement THz.

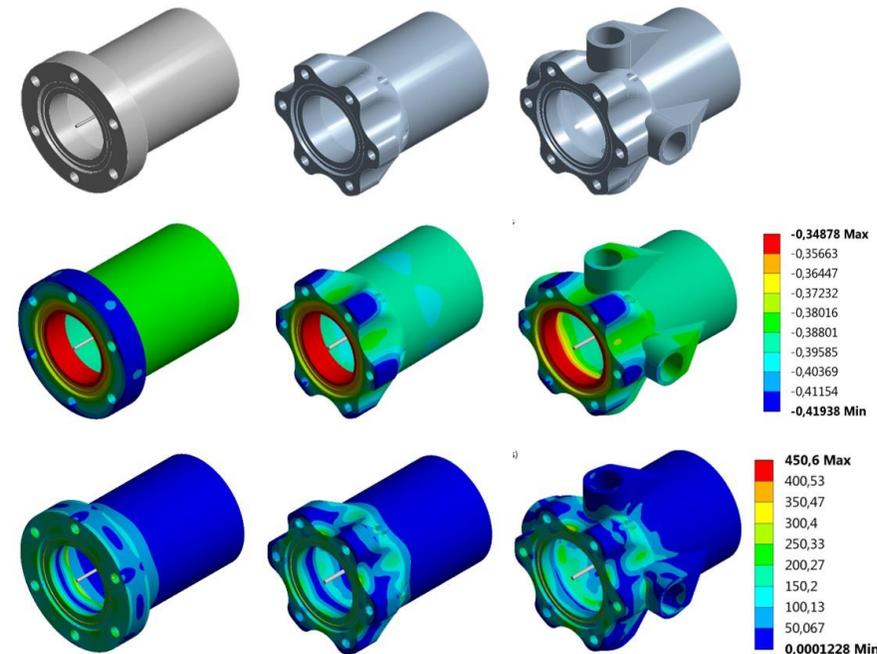
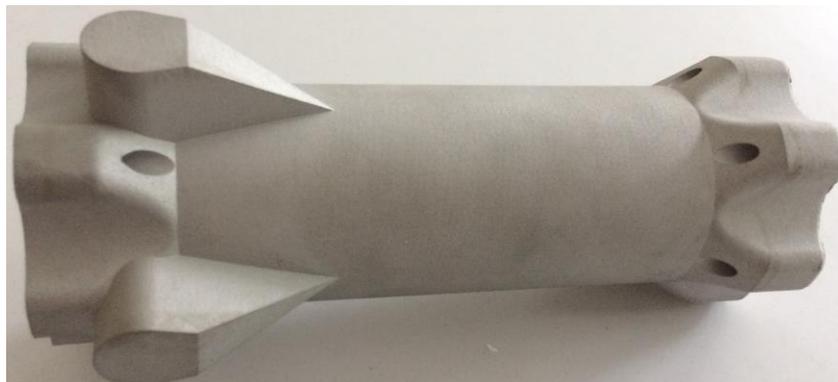
# Moniteurs de profils longitudinaux (électrons) [2/2]

- Adapté pour des paquets  $<5\text{ps}$  et  $>10\text{pC}$ .
- Capacité de mesurer des paquets sous la picoseconde démontrée au SLAC.
- Travaux en cours pour démontrer applicabilité comme diagnostic en salle de contrôle.
- Peut-être crucial pour mesurer les effets collectifs dans un anneau ou les modes d'ordre supérieur dans un ERL.



# Profiter de l'industrie 4.0 [1/2]

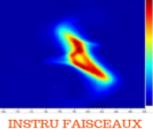
- Techniques numériques amènent évolutions dans processus fabrication industrielles (Industrie 4.0).  
=> impact sur l'instrumentation.
  - Optimisation topologique (OT)
  - Fabrication additive (i3d)
  - Intelligence artificielle (IA)



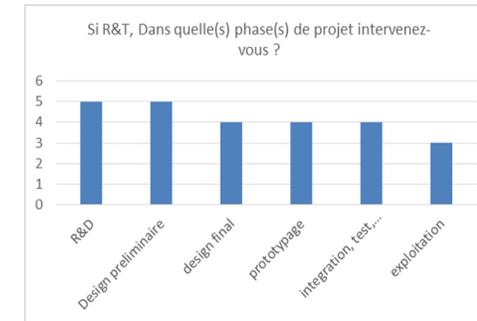
# Profiter de l'industrie 4.0 [2/2]

- Des travaux récents montrent la création de diagnostics virtuels déduisant des infos à partir d'autres diagnostics.
  - Filtrage de bruit électronique
  - Reconnaissance de motif dans un bruit ou une masse de données
  - Analyse d'images (bruit, motif,...)
  - Compétence à acquérir en France
- 
- Sur la décennie 2020-2030 il faut démontrer que ces techniques (OT, I3D et IA) sont applicables aux diagnostics des accélérateurs et développer ces compétences en France.

# Conclusion



- Besoin crucial des diagnostics accélérateurs: diag. faisceau aide a comprendre/maintenir les capacités de l'accélérateurs et a l'améliorer
  - Accélérateurs (anciens/nouveaux) ont besoins de dvt diag
  - Nouveaux accélérateurs ont besoins d'étendre la R&D diag
    - Nombreux projets a moyen terme/long terme
  - Au niveau international:
    - mise en place de conf. (eg IBIC) et forum spécialisés
    - compétitif, Structuration Européenne: ARIES/ADA WP8 (jusqu'à fin 2021)
- Les diagnostics se préparent sur les différences étapes de leur maturité. **Sont soulevées des questions:**
  - d'optimisation des diagnostics (fonctionnement, fiabilité, précision, performances)
  - de technologies (matériaux a l'électronique)
  - de fabrication
  - de méthodologies et techniques d'utilisation (I.A.)
  - de mutualisation et bases communes d'échange
  - d'intégration pour les opérations (salles de commandes)
- Très fortes compétences dans les laboratoires en France.
  - A supporter, A valoriser! Dans sa diversité
  - Former les futurs ingénieurs/chercheurs aux techniques des diagnostics
  - Intégration industrielle?



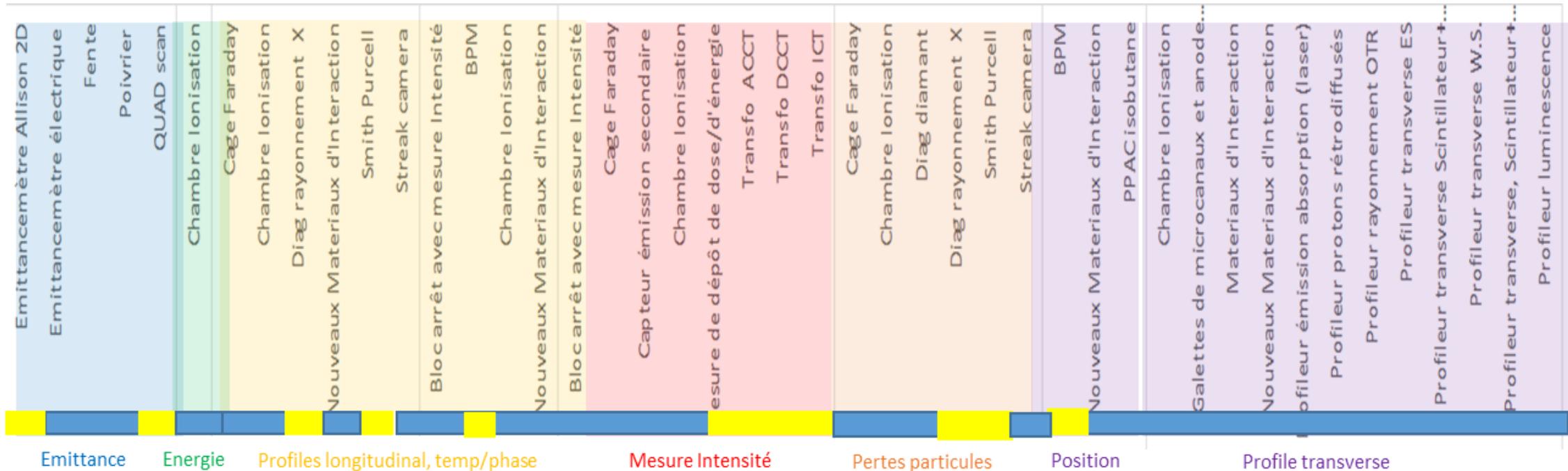
# Back-up

# Intentions et Orientations des recherches diag.

- La communauté rassemblée dans le réseau:
  - S'attache aux différentes étapes de maturité des diagnostics (de l'avant projet et prototypages à l'exploitation)
    - Réflexions à plusieurs niveaux de ces étapes
    - Lié à un/des accélérateurs ou non
  - S'intéresse et se rapproche sur certaines orientations
- Orientations des technologies
  - Bancs de tests
  - Moniteur de position de faisceau (BPM)
  - Emittance- mètre
    - faible courant
    - haut courant – basse énergie
  - Diagnostics interactions matériaux
    - Nouveaux matériaux:
      - polymère/diamant/gaz
    - Optimisation Matériaux
      - chambres/luminescence
  - Diagnostics rapides et nouvelles technologies
    - Mesures longitudinales et transverses
    - Taux réduits
    - Industries 4.0 (impression 3D et intelligence artificielle)
  - Détecteur de pertes faisceaux (hautes puissances, hautes énergies, environnement)
  - Capteur de vibration

# Etat des lieux :

- Identification des compétences des diagnostics :
  - Intensité, profile (transverse/longitudinal), énergie, position, temporelle/phase, pertes de particules, Emittance



Technologies et géométries sont variées, basées sur:

- l'électromagnétisme (anneaux de cuivre, cavités, transformateurs, plaques de déviation)
- l'interaction avec un/des éléments (chambre à fil, ionisation, arrêt faisceau)

# Etapes de maturité d'un diagnostic

R&D Amont d'un diag  
(avant-projet)

Validation générique  
(prototypage)

Validation spécifique  
(construction)

