



MAX

MYRRHA ACCELERATOR EXPERIMENT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAMME



Les accélérateurs pour les ADS

Jean-Luc BIARROTTE, *CNRS-IN2P3 / IPN Orsay*

Coordinateur du projet MAX (EURATOM FP7)



IN2P3
Les deux infinis



MAX

MYRRHA ACCELERATOR eXPERIMENT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAMME



1. Introduction

2. Spécificités de l'accélérateur ADS

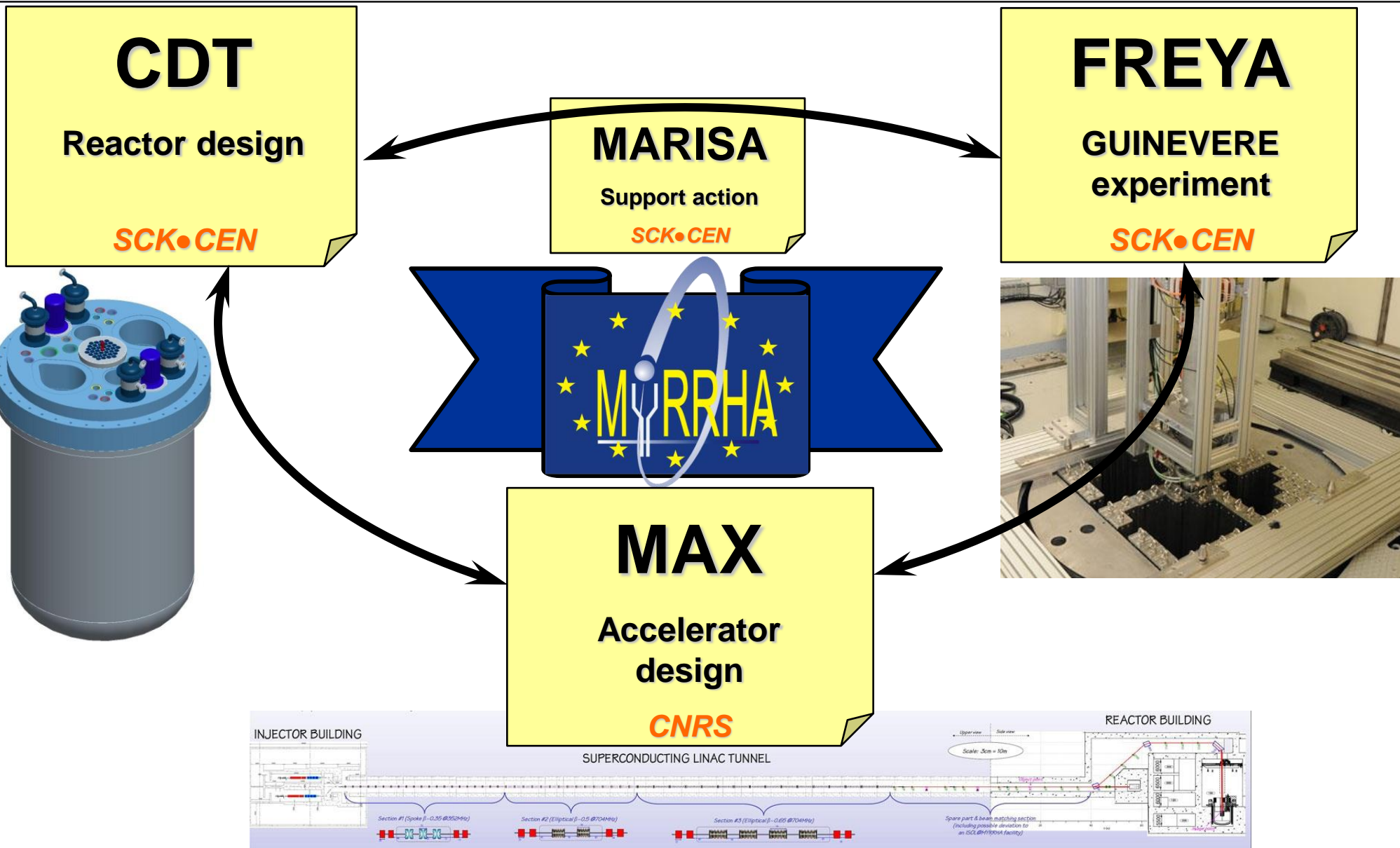
3. R&D récente autour de l'accélérateur de MYRRHA

4. Conclusion

Le R&D sur les accélérateurs ADS à l'IN2P3

- **1997-2002** : premières études CNRS autour des projets ASH, TRASCO, AAA, et création du **PIR CNRS sur l'aval du cycle** PACE (→ PACEN → NEEDS)
- **2002** : 1^{er} design “**MYRRHA Draft 1**” par le SCK•CEN (*cyclotron 350 MeV*)
- **2002-2004** : études autour du projet Européen **PDS-XADS (FP5)**
(*cyclotron → accélérateur linéaire, introduction du concept de tolérance aux pannes*)
- **2005** : nouveau design “**Myrrha Draft 2**” (*linac 350 MeV*)
- **2005-2010** : études autour du projet Européen **EUROTRANS (FP6)**
(*linac 600 MeV pour démonstrateur, activités R&D orientées fiabilité*)
- **2010** : MYRRHA est sur la feuille de route Européenne **ESFRI** et est officiellement **soutenu par le gouvernement belge**
- **2010-2015** : design détaillé de MYRRHA avec soutien des projets Européens **CDT, MAX, FREYA, MARISA (FP7)**

MYRRHA et le FP7 d'EURATOM (2010-2014)

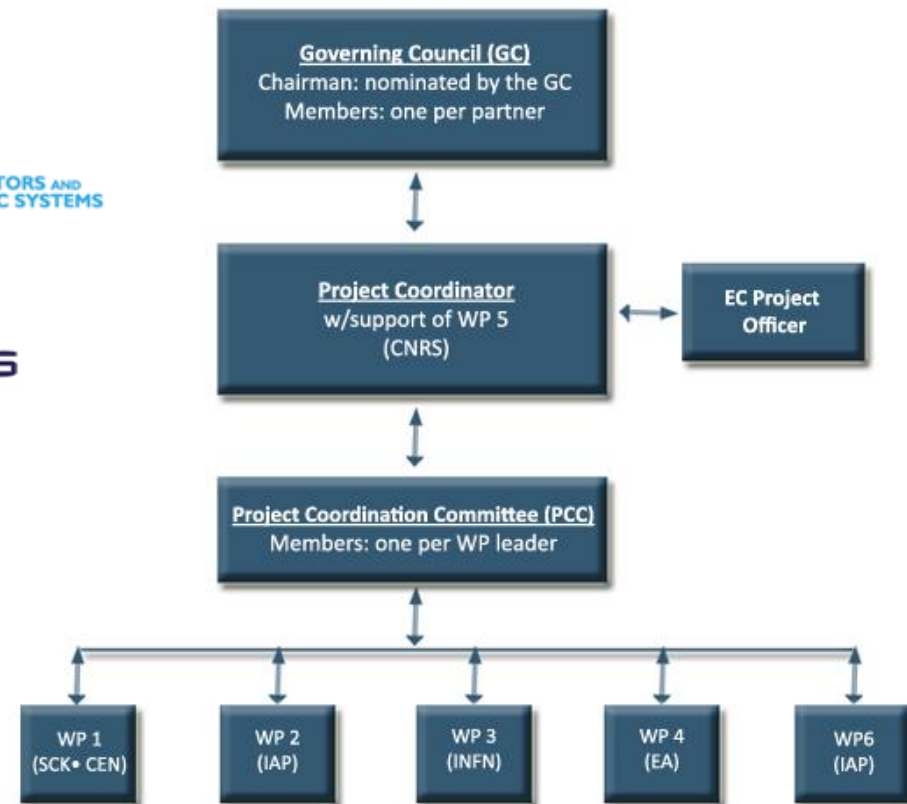


Le projet MAX

But: obtenir un design de reference consolidé pour le linac de MYRRHA, avec un niveau de confiance & de détail suffisants pour initier à partir de 2015 une éventuelle phase d' "engineering design" puis de construction



<http://ipnweb.in2p3.fr/MAX/>



WP1: Global accelerator design

WP2: Injector developments

WP3: Main linac developments

WP4: System optimisation



MAX

MYRRHA ACCELERATOR eXPERIMENT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAMME



1. Introduction

2. Spécificités de l'accélérateur ADS

3. R&D récente autour de l'accélérateur de MYRRHA

4. Conclusion

MYRRHA en tant que démonstrateur ADS

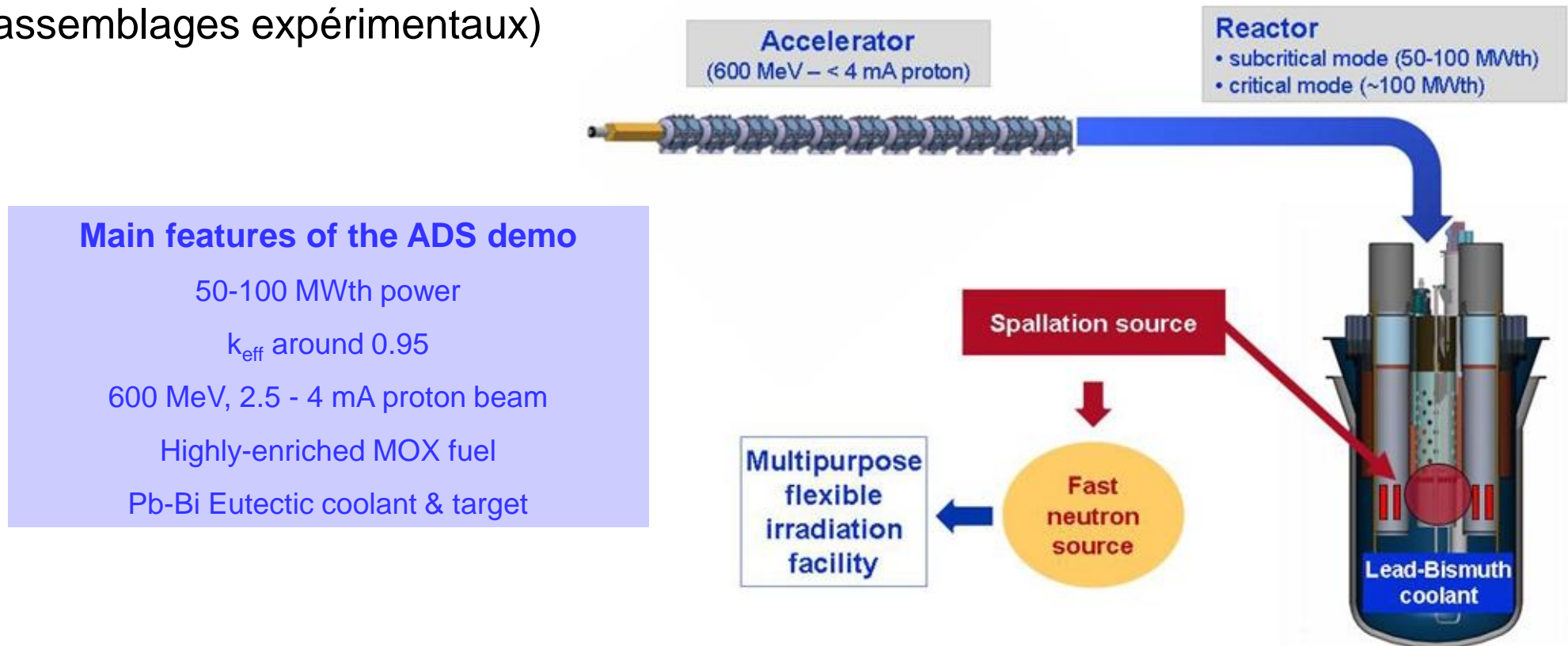
Démontrer la faisabilité physique et technologique de l'ADS, et en particulier:

➤ le **concept de l'ADS**

(couplage accélérateur + source de spallation + réacteur à hte puissance)

➤ la **transmutation des actinides mineurs**

(assemblages expérimentaux)



Main features of the ADS demo

50-100 MWth power

k_{eff} around 0.95

600 MeV, 2.5 - 4 mA proton beam

Highly-enriched MOX fuel

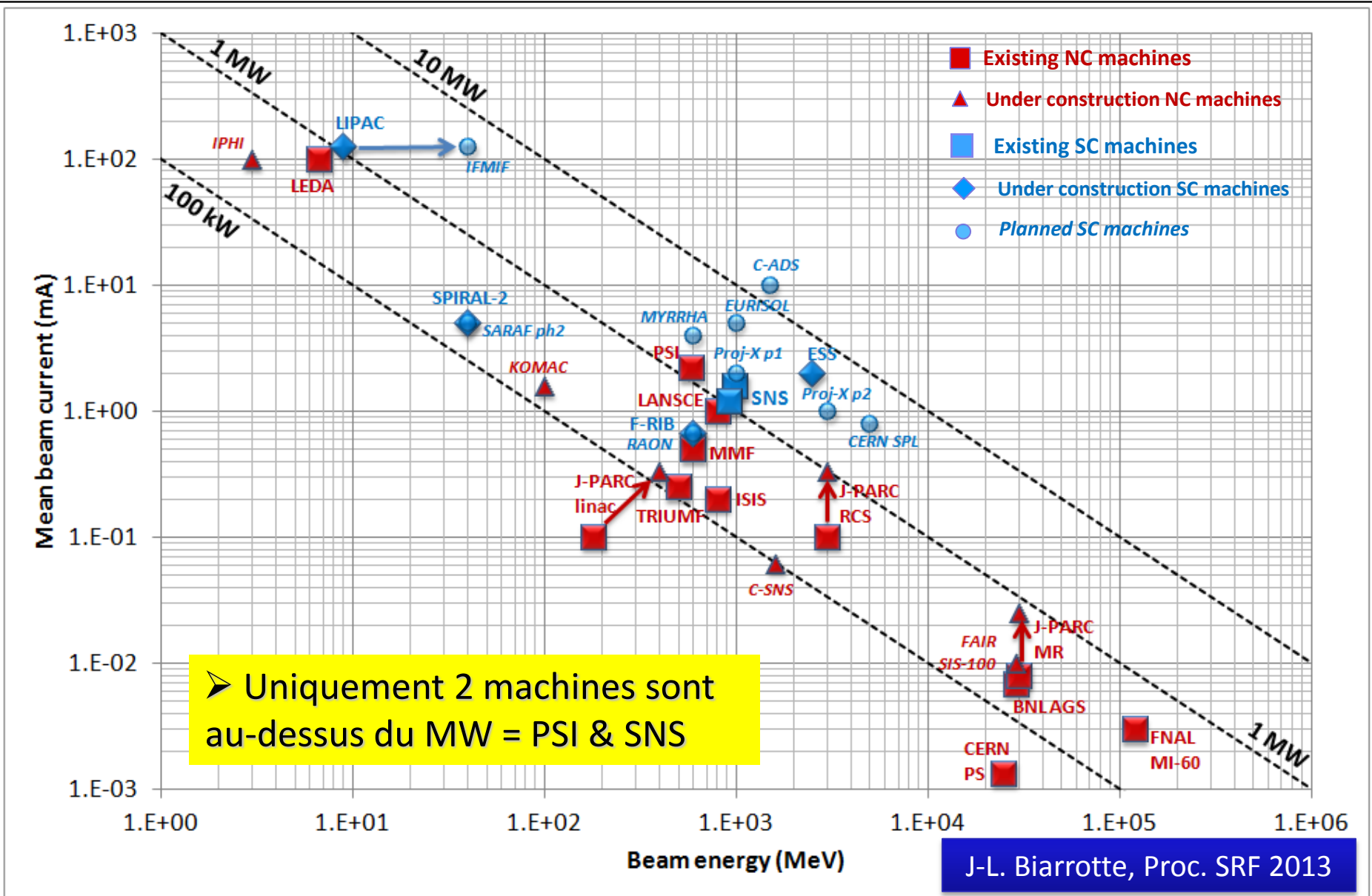
Pb-Bi Eutectic coolant & target

Faisceau de protons requis pour MYRRHA

→ Faisceau de très forte puissance (2.4 MW)

Proton energy	600 MeV
Peak beam current	0.1 to 4.0 mA
Repetition rate	1 to 250 Hz
Beam duty cycle	10^{-4} to 1
Beam power stability	$< \pm 2\%$ on a time scale of 100ms
Beam footprint on reactor window	Circular $\varnothing 85\text{mm}$
Beam footprint stability	$< \pm 10\%$ on a time scale of 1s
# of allowed beam trips on reactor longer than 3 sec	10 maximum per 3-month operation period
# of allowed beam trips on reactor longer than 0.1 sec	100 maximum per day
# of allowed beam trips on reactor shorter than 0.1 sec	unlimited

Panorama des accélérateurs de p/d de forte puissance



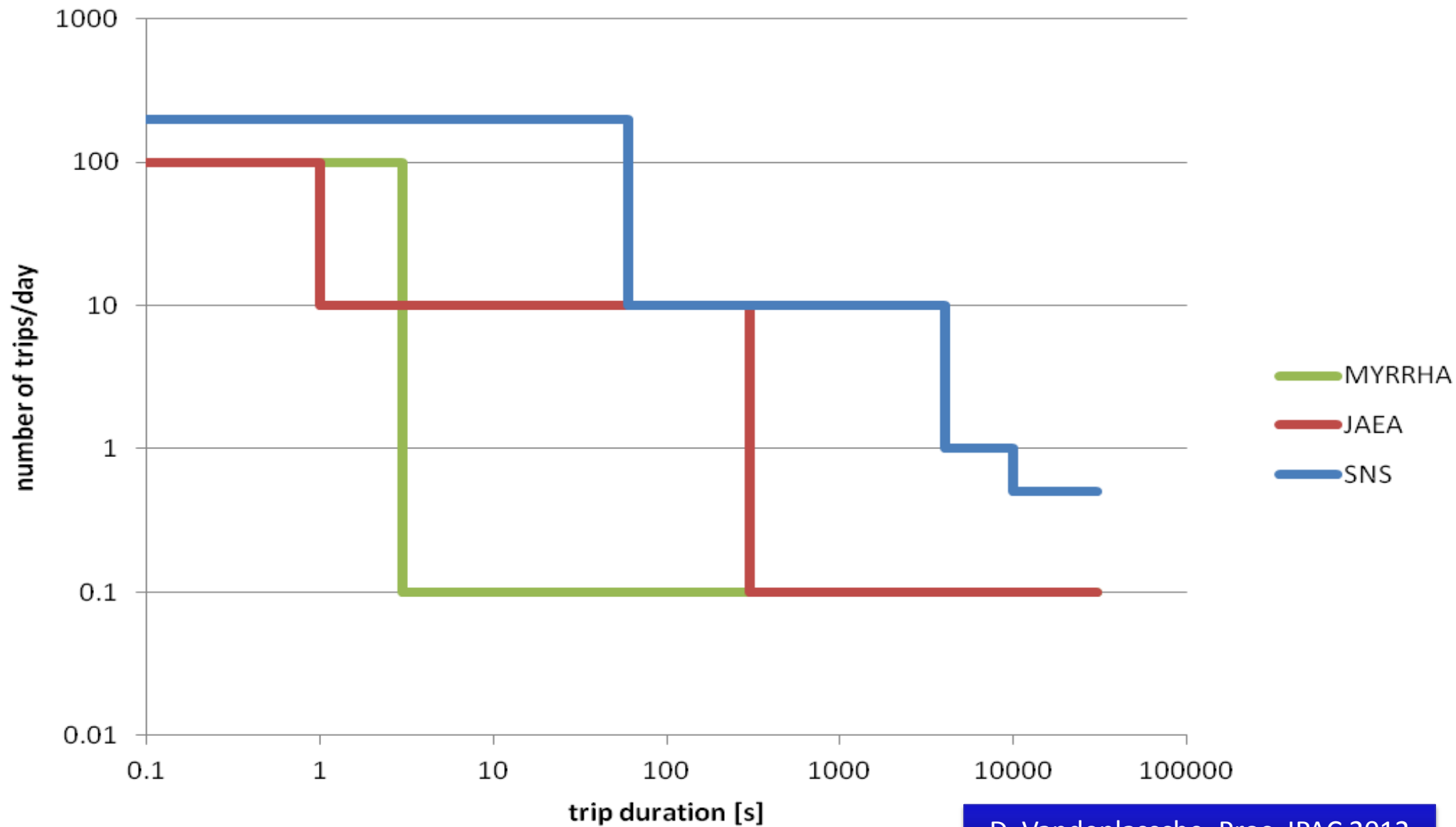
Faisceau de protons requis pour MYRRHA

→ Faisceau de très forte puissance (2.4 MW)

Proton energy	600 MeV
Peak beam current	0.1 to 4.0 mA
Repetition rate	1 to 250 Hz
Beam duty cycle	10^{-4} to 1
Beam power stability	$< \pm 2\%$ on a time scale of 100ms
Beam footprint on reactor window	Circular $\varnothing 85\text{mm}$
Beam footprint stability	$< \pm 10\%$ on a time scale of 1s
# of allowed beam trips on reactor longer than 3 sec	10 maximum per 3-month operation period
# of allowed beam trips on reactor longer than 0.1 sec	100 maximum per day
# of allowed beam trips on reactor shorter than 0.1 sec	unlimited

→ **Fiabilité extrême**

L'enjeu majeur : la fiabilité



D. Vandeplassche, Proc. IPAC 2012

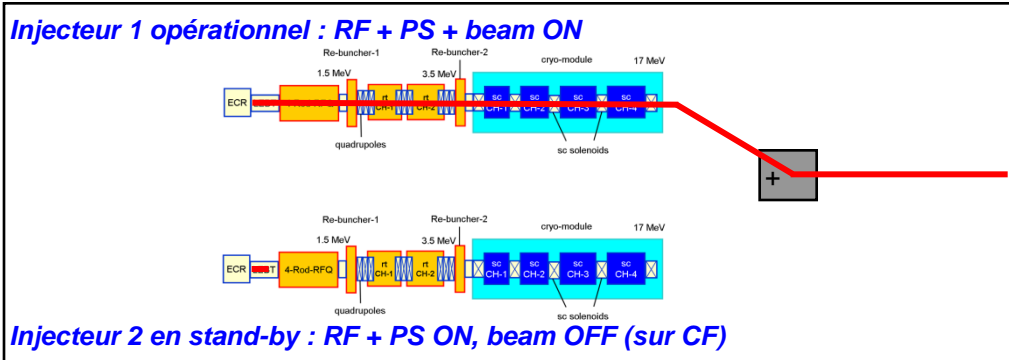
L'enjeu majeur : la fiabilité

- ☀ **Les arrêts faisceau de plus de 3 secondes** doivent être évités
 - Pour limiter les contraintes thermiques et la fatigue mécanique de la cible, du combustible, des assemblages
 - Pour assurer un niveau de disponibilité de 80%
- ☀ **Spécifications Myrrha: <10 arrêts faisceau par cycle de 3 mois**
 - Basées sur l'analyse de l'opération du réacteur PHENIX
 - MTBF > 250h, bien au-delà des performances des accélérateurs actuels
 - Notablement plus sévères que les spécifications ADS au Japon ou aux USA
- ☀ **Des règles strictes doivent être suivies pendant le conception**
 - Design **robuste** (simplicité, optiques stables, marges sur les pts de fonctionnements...)
 - Inclusion de **redondances** (parallèles, séries si possible)
 - Assurer des **schémas de maintenance** efficaces (en ligne lorsque possible)

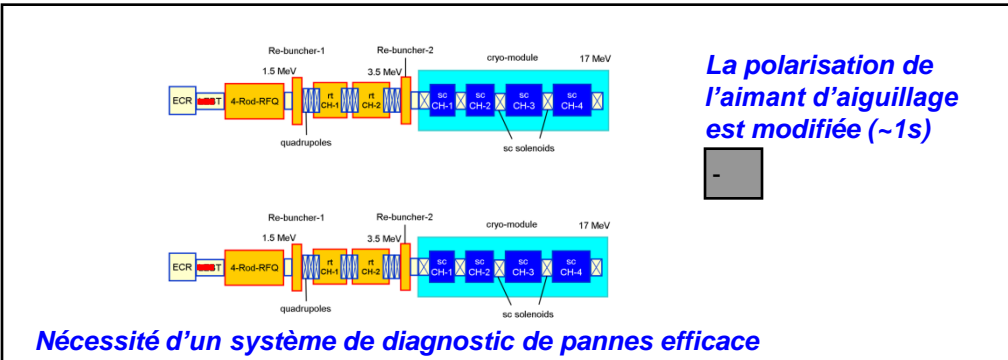
L. Burgazzi, P. Pierini,
Rel.Eng&Syst.Saf (2007)

Scénario de compensation de panne (injecteur)

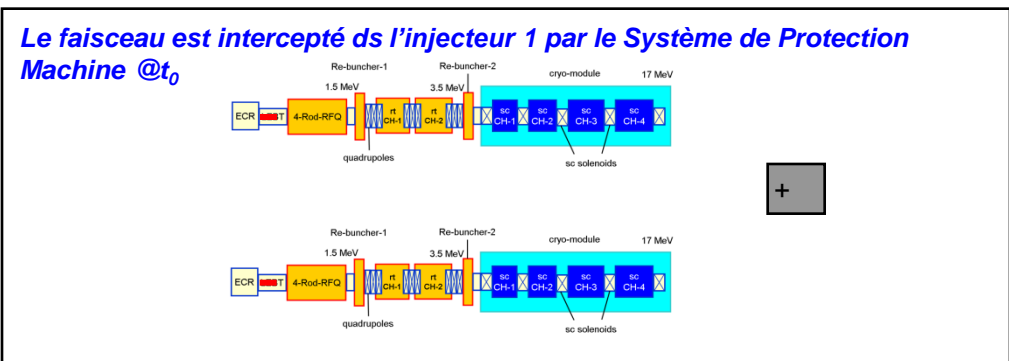
1 Configuration initiale



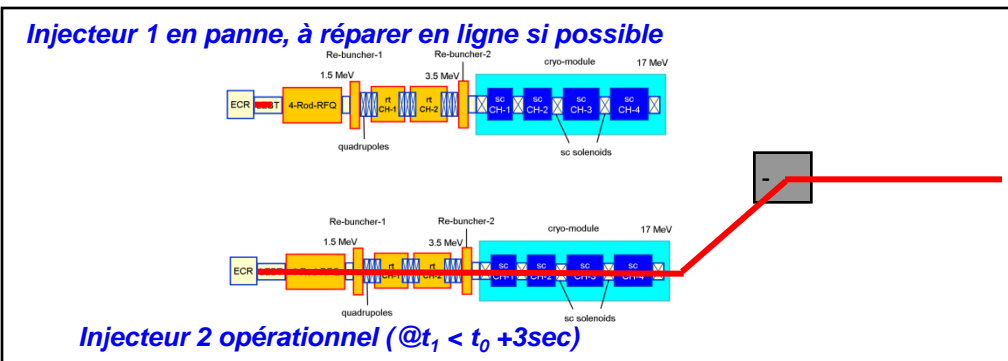
3 La panne est localisée ds l'injecteur



2 Une panne est détectée



4 Reprise du faisceau



J-L. Biarrotte, A.C. Mueller et al., NIM A (2006)

Scénario de compensation de panne (linac principal)

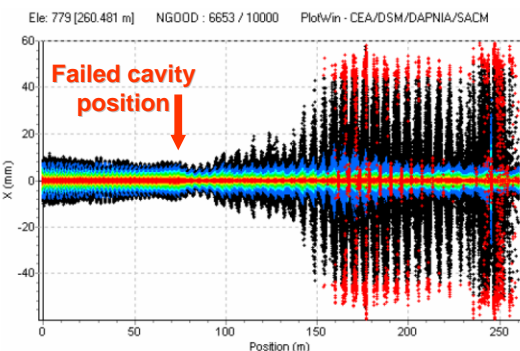
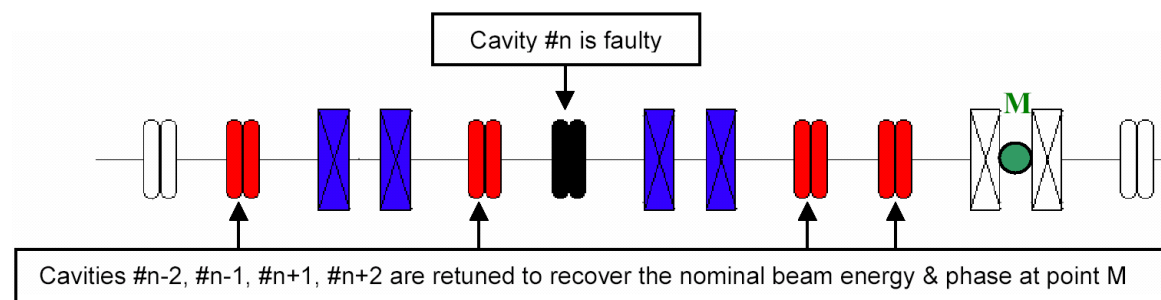


Figure 12 : Transverse beam distribution at 220 μ s, in red are plotted the losses

- 1 Une panne est détectée quelque part
→ Le faisceau est coupé par le MPS dans l'injecteur à t_0
- 2 La panne est localisée dans la boucle RF d'une cavité supraconductrice
→ Par le système de diagnostic de pannes

3 De nouveaux réglages V/ϕ sont appliqués aux cavités adjacentes

→ Réglages déterminés & enregistrés lors du commissioning de la machine et/ou via appli dédiée



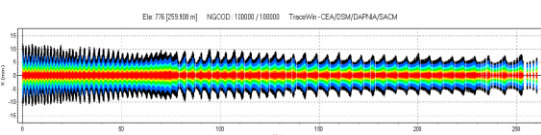
4 La cavité en panne est mise hors fréquence

→ Pour éviter de perturber le faisceau

J-L. Biarrotte, D. Uriot,
Phys.Rev ST AB (2007)

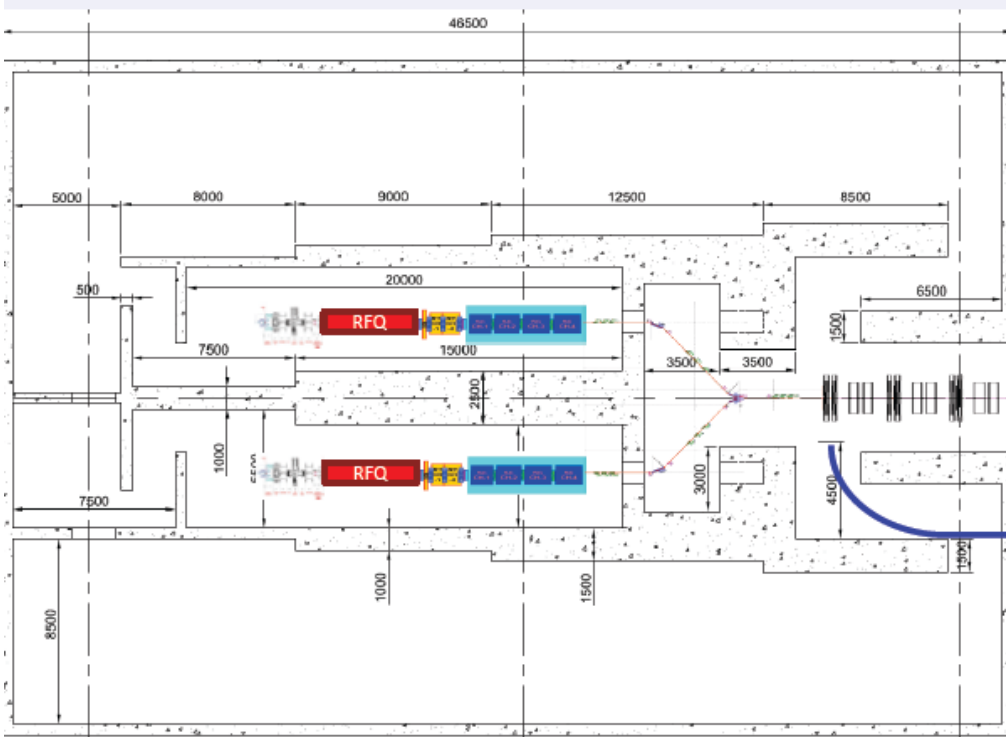
5 Après retour à l'équilibre, le faisceau est ré-injecté à $t_1 < t_0 + 3\text{sec}$

→ Et le système RF en panne est réparé en ligne si possible

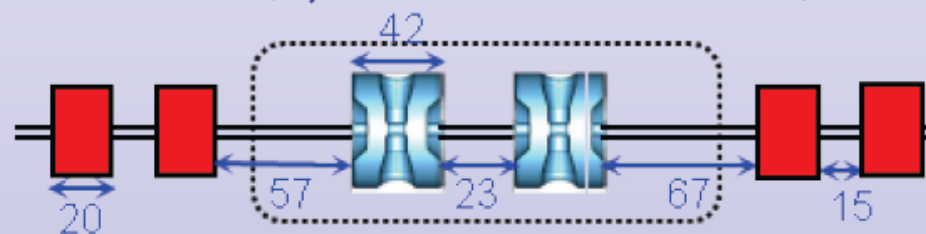


L'accélérateur linéaire de MYRRHA

INJECTOR BUILDING

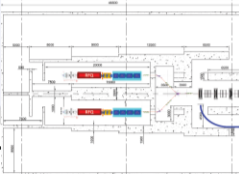


Section #1 (Spoke $\beta \sim 0.35$ @ 352 MHz)



L'accélérateur linéaire de MYRRHA

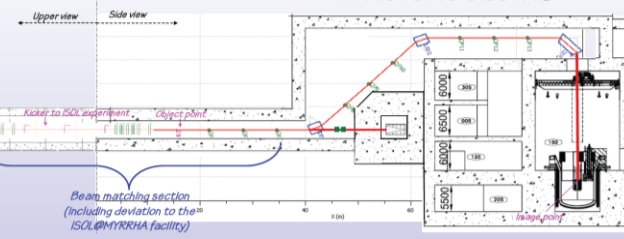
INJECTOR BUILDING



SUPERCONDUCTING LINAC TUNNEL



REACTOR BUILDING





1. Introduction

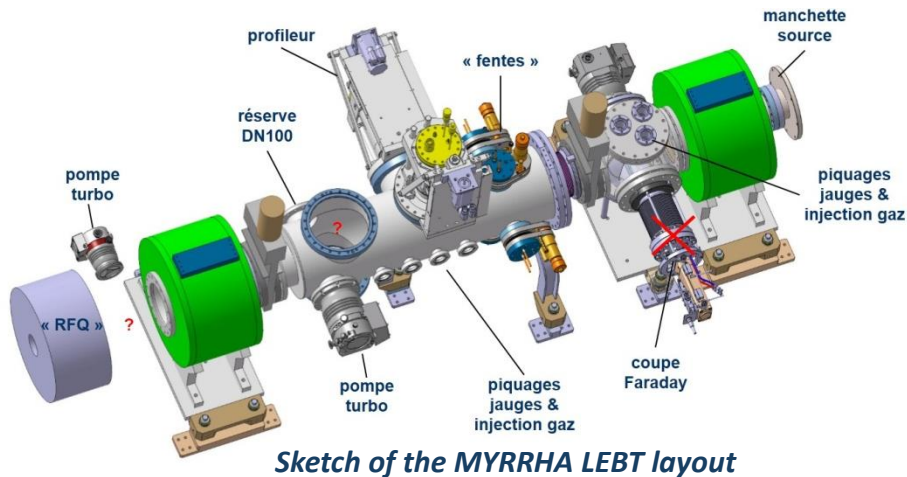
2. Spécificités de l'accélérateur ADS

**3. R&D récente autour de
l'accélérateur de MYRRHA**

4. Conclusion

Source & ligne basse énergie (30 keV)

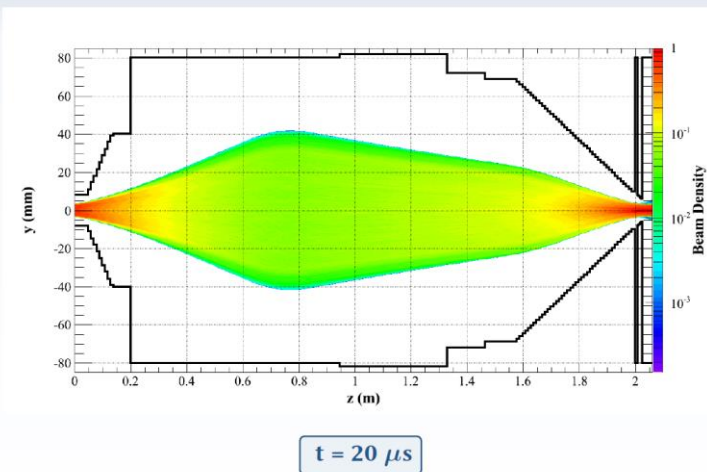
- Source ECR prototype Pantechnik (SCK*CEN)
- Ligne basse énergie en cours de construction (LPSC Grenoble + SCK*CEN)



R. Salemme et al., Proc. TC-ADS 2013

SC forces RMS Envelope SC Child-Langmuir law SCC Simulation Codes LEBT Simulation

Beam evolution



N. Chauvin

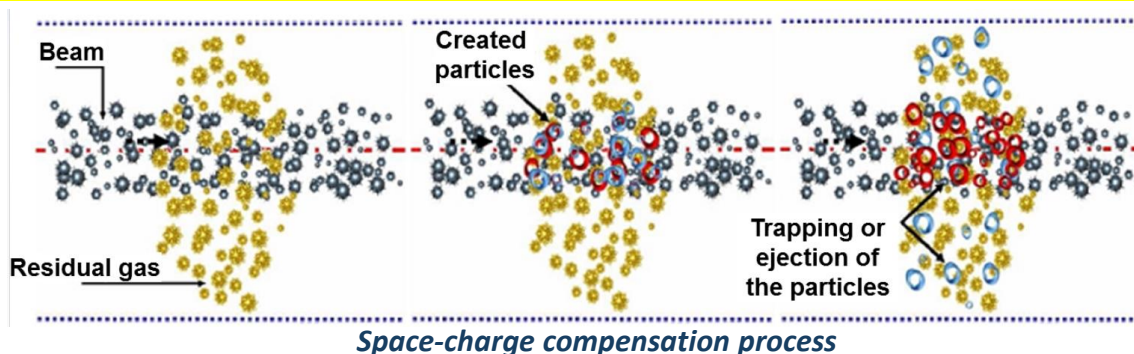
Space Charge Effects

CAS 2012 – May 31, 2012

53 / 59

Impact of SSC rising time, courtesy of N. Chauvin CEA Saclay

- R&D à venir : physique faisceau en régime de compensation de charge d'espace



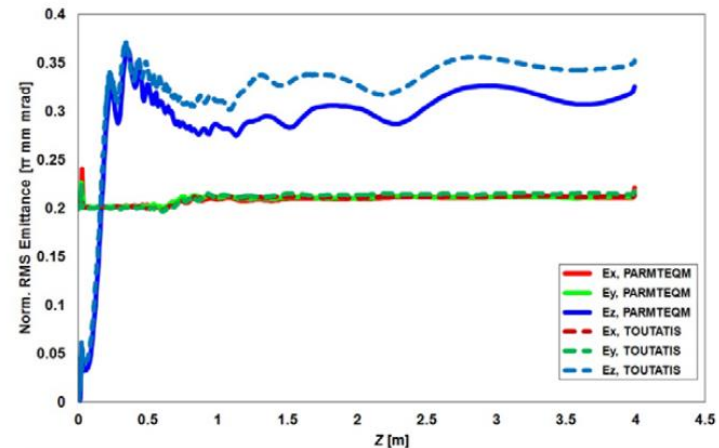
RFQ (30 keV – 1.5 MeV)

- Solution de ref. = structure “4-rod” à 176.1 MHz
- R&D à Frankfurt sur la fiabilisation (thermique)
- Construction d’un prototype RFQ de 1m achevée (prêt pour tests RF forte puissance)
- Prochaine étape = proto RFQ entier (SCK*CEN)

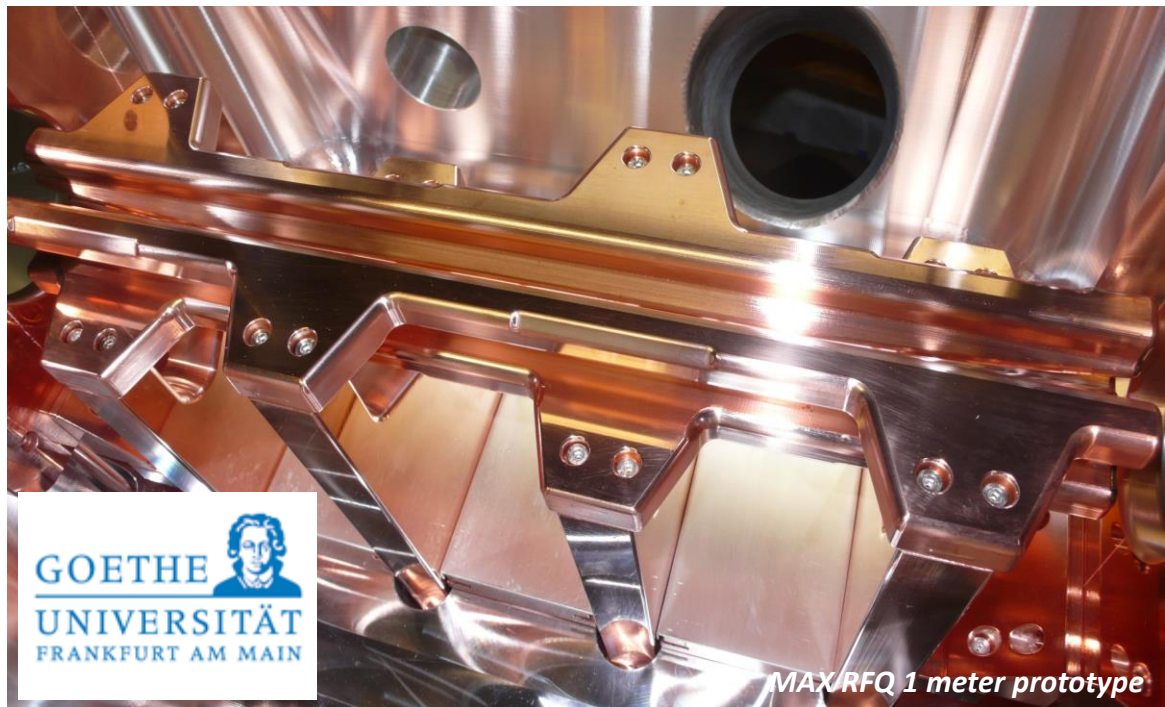
Parameter	EUROTRANS	MYRRHA	SARAF
f [MHz]	352	176	176
W_{in} [MeV] / W_{out} [MeV]	0.05 / 3	0.03 / 1.5	0.02 / 1.5
U [kV]	65	40	32.5
$E_{s,max} / E_k$	1.7	1	0.8
σ_{min} [mm]	2.3	2.9	2.7
m_{max}	1.8	2.3	2.7
g_{min} [mm]	2.6	3.6	3.7
$\epsilon_{in}^{t, n, rms}$ [π mm-mrad]	0.2	0.2	0.175
$\epsilon_{out}^{t, n, rms}$ [π mm-mrad]	0.21 / 0.20	0.22 / 0.22	0.19* / 0.19*
$\epsilon_{out}^{l, rms}$ [π keV-deg]	109	64.6	36*
L [m]	4.3	4.0	3.8
T [%] / T_{10mA} [%]	~100 / ~100	~100 / ~100	95.5* / 92.3*
R_p [k Ω m]	61 (MWS)	67 (after SARAF)	67 (meas.)
P_c [kW/m]	69.8 (MWS, +20%)	23.5	15.8

* Simulated by A. Bechtold using the RFQSim code without image effects or multipole effects.

MYRRHA RFQ parameters & emittance evolution



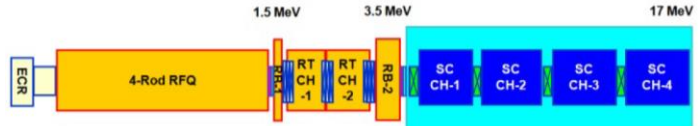
M. Zhang et al., Proc. LINAC 2012
 M. Vossberg et al., Proc. LINAC 2012



MAX RFQ 1 meter prototype

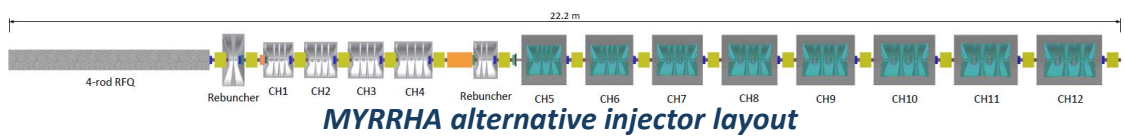
Booster CH-DTL (1.5 – 17 MeV)

- Aussi compact que possible
- Basé sur le principe “KONUS beam dynamics”; un design alternatif + conventionnel est à l’étude



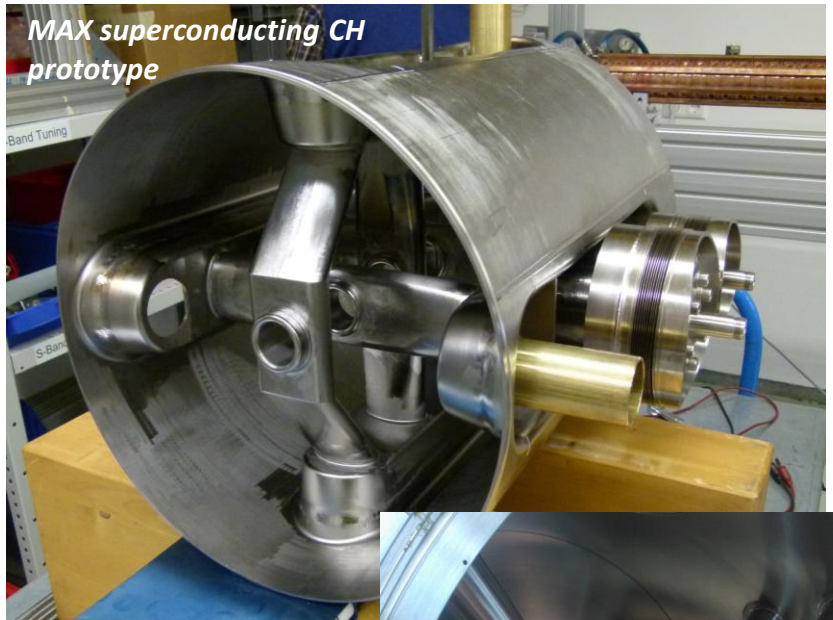
	N_{gaps}	V_{eff} [MV]	L_{cell} [m]	β_{avg}	E_a [MV/m]	Upstream transv. focusing [T/m or T]
RB 1	2	0.15	0.10	0.06	1.56	-
RT-CH 1	10	1.03	0.54	0.06	1.91	(triplet) 44.5/43.5/44.5
RT-CH 2	10	1.14	0.66	0.08	1.72	(triplet) 47.0/48.0/47.0
RB 2	5	0.525	0.36	0.09	1.45	(triplet) 51.0/53.5/51.0
SC-CH 1	10	3.50	0.87	0.10	4.02	(solenoid) 2.50
SC-CH 2	9	3.98	1.01	0.13	3.94	(solenoid) 3.05
SC-CH 3	8	4.18	1.07	0.16	3.89	(solenoid) 3.50
SC-CH 4	7	4.09	1.07	0.18	3.82	(solenoid) 4.30

MYRRHA reference injector layout



MYRRHA alternative injector layout

- Construction de prototypes de cavités CH à 176 MHz achevés (prêts pour tests RF)



MAX superconducting CH prototype



MAX room-temperature CH prototype

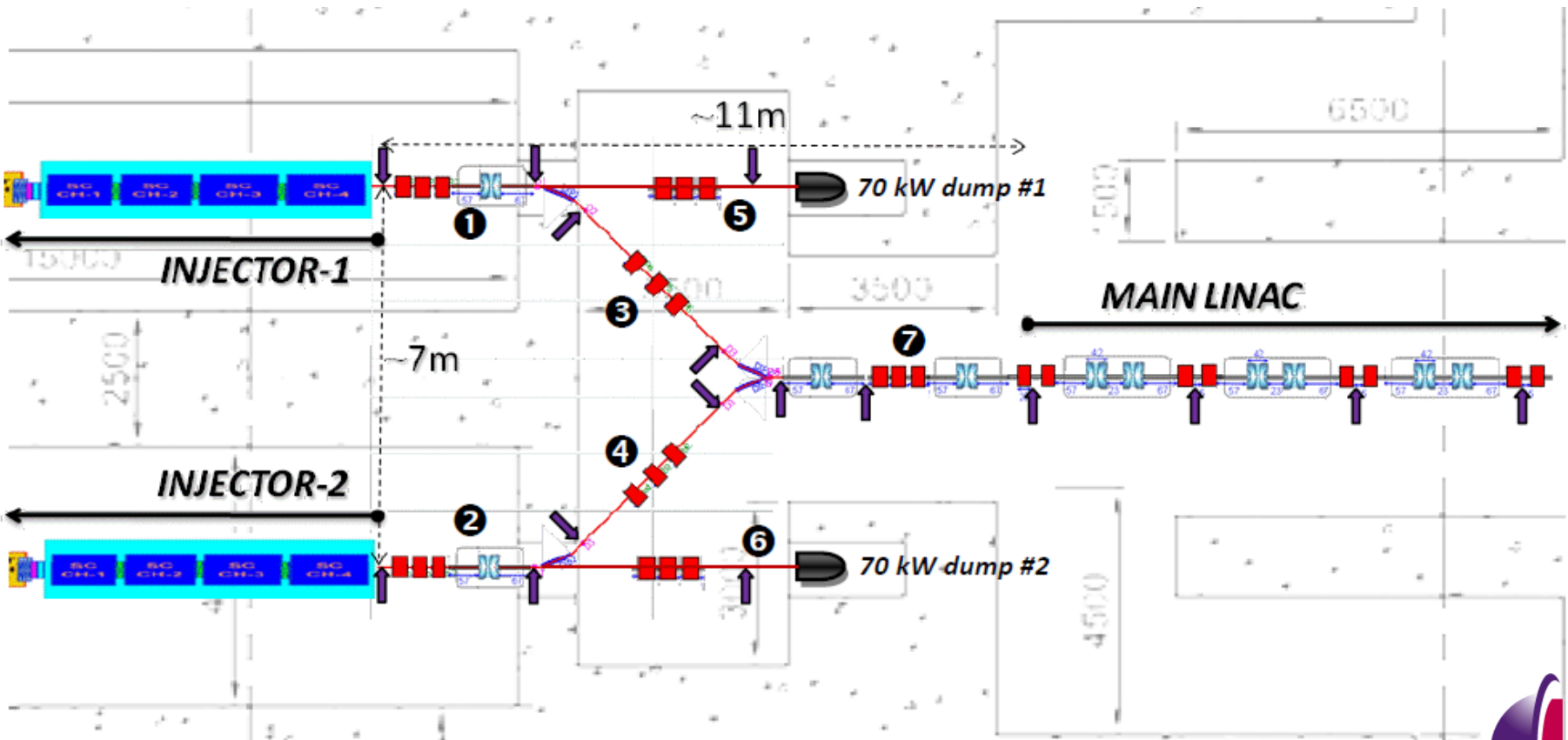
M. Bush et al.,
Proc. SRF 2013

D. Mäder et al.,
Proc. SRF 2013



Ligne moyenne énergie (17 MeV)

- Design de la ligne de connection entre les 2 injecteurs
- Définition préliminaire des procédures d'aiguillage rapide



General layout of the MYRRHA MEBT, superimposed on a preliminary building layout

Linac supraconducteur principal (17 – 600 MeV)

- Conception du linac SC: 230 mètres, 102 cavités, capacités de tolérances aux pannes
- Thématique principale = physique faisceau lors des scénarios de récupération de pannes
- R&D générique sur les cavités Spoke
- Conception du cryomodule Spoke MYRRHA
- Fabrication de 2 cavités prototypes en 2014 (appel d'offre en cours de lancement)

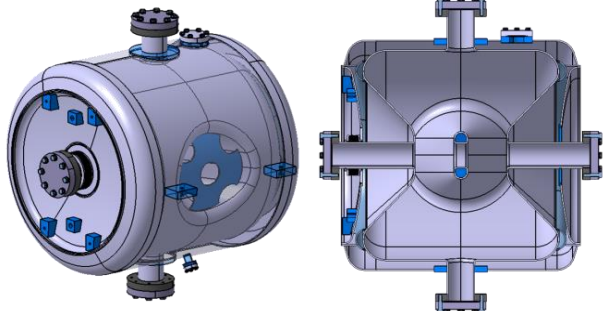
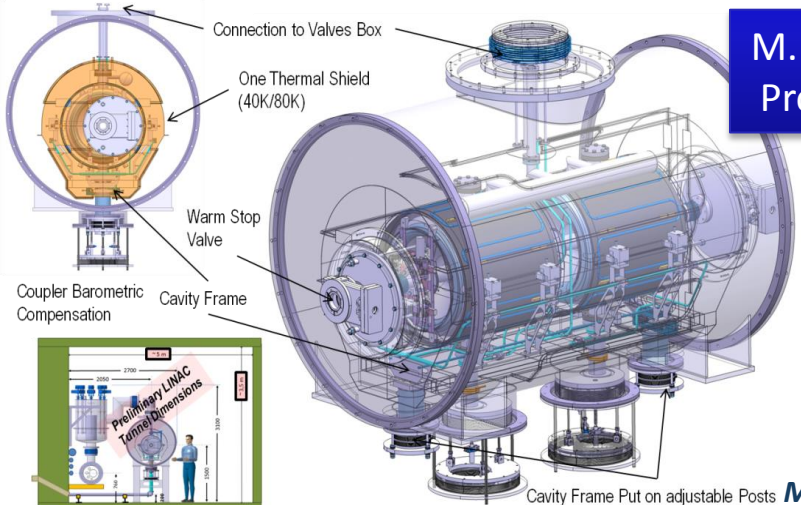
Main parameters of the MYRRHA linac

Section #	#1	#2	#3
E _{input} (MeV)	17.0	80.8	184.2
E _{output} (MeV)	80.8	184.2	600.0
Cav. Technology	Spoke	Elliptical	
Cav. freq. (MHz)	352.2	704.4	
Cavity optimal β	0.375	0.510	0.705
Nb of cells / cav.	2	5	5
Focusing type	NC quadrupole doublets		
Nb cav / cryom.	2	2	4
Total nb of cav.	48	34	60
Nominal E _{acc} * (MV/m)	6.4	8.2	11.0
Synch. phase (deg)	-40 to -18	-36 to -15	
4 mA beam load / cav. (kW)	1.5 to 8	2 to 17	14 to 32
Nominal Qpole gradients (T/m)	5.1 to 7.7	4.8 to 7.0	5.1 to 6.6
Section length (m)	73.0	63.9	100.8

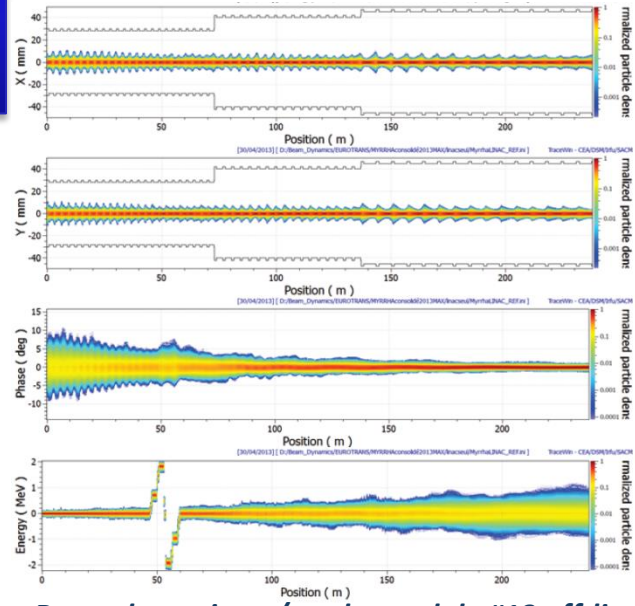
*E_{acc} is given at optimal beta and normalized to L_{acc} = N_{gap} · β · λ / 2

J-L. Biarrotte et al.,
Proc. SRF 2013

M. El Yakoubi et al.,
Proc. TC-ADS 2013



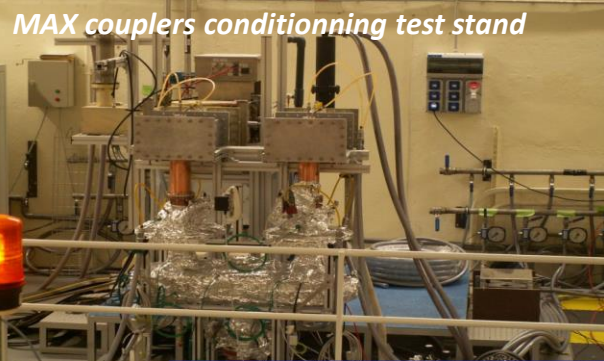
MYRRHA spoke module & cavity overview



Beam dynamics w/ spoke module #18 off-line

Linac supraconducteur principal (17 – 600 MeV)

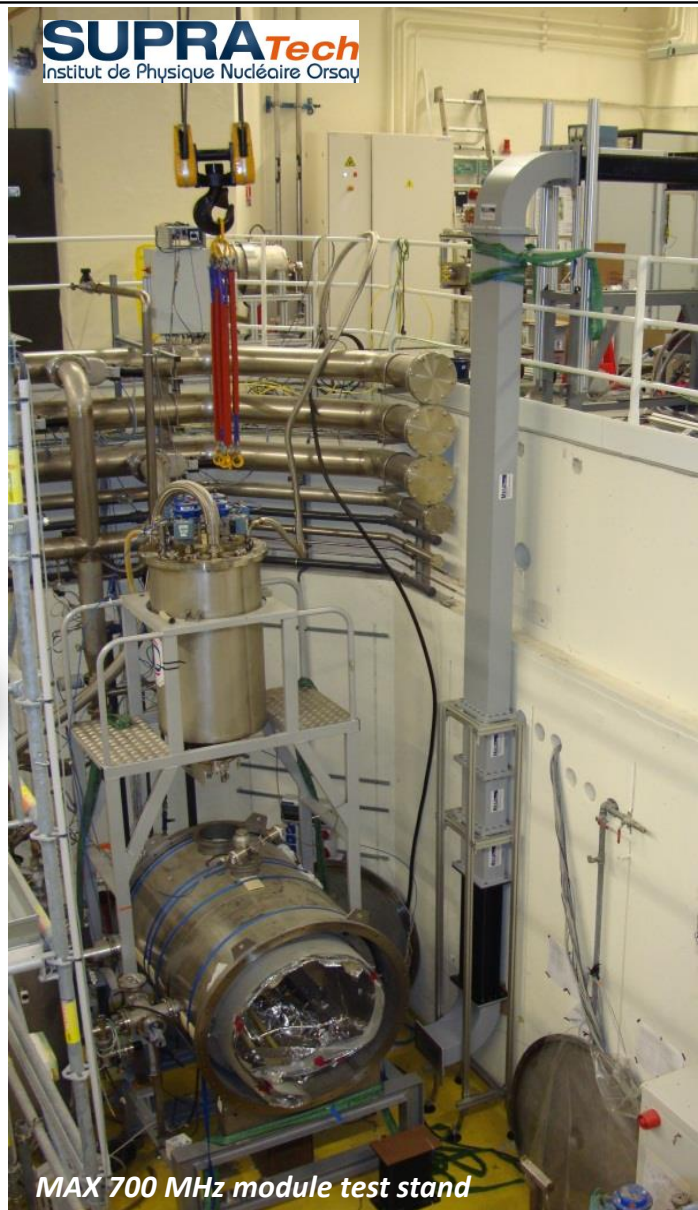
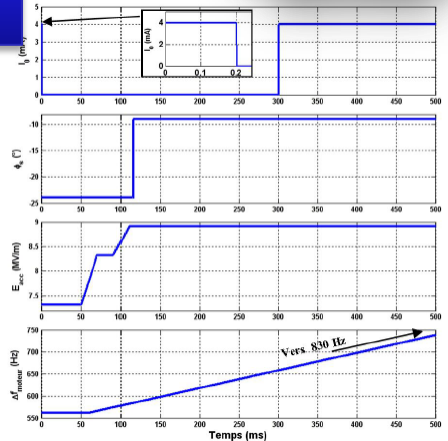
- Demonstration de la technologie 700 MHz en régime RF CW et en environnement “accélérateur”
- Coupleurs conditionnés, première expérience à 80kW et 2K prévue en Novembre 2013



M. El Yakoubi et al., Proc. SRF 2013

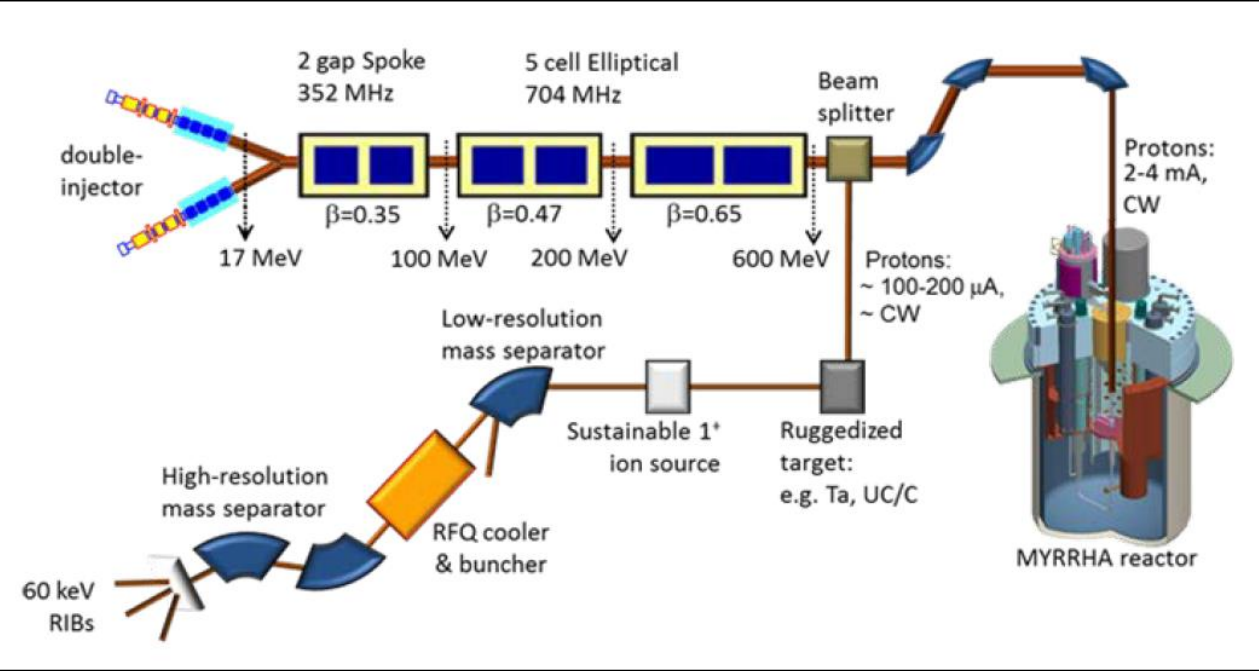
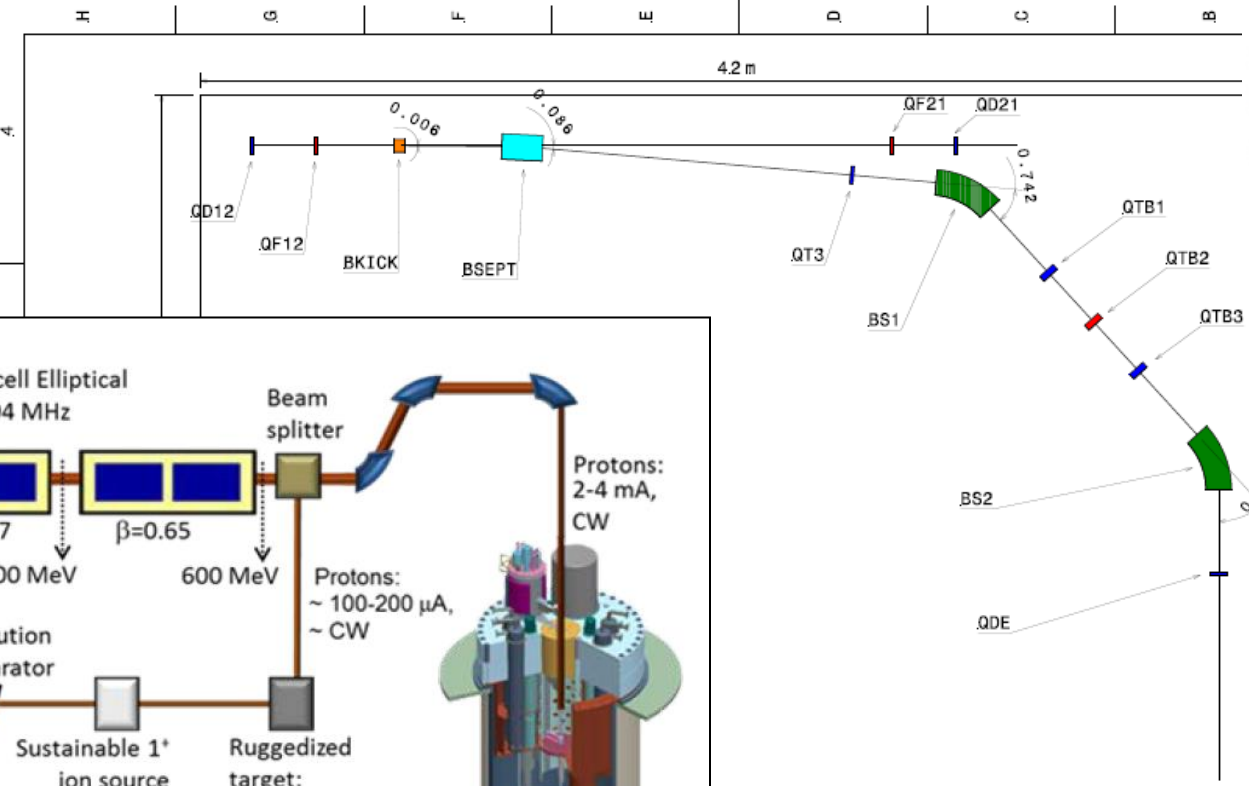
- Planning experimental sur les procédures de compensation de pannes par re-réglage rapide (gestion SAF, DLLRF...)

F. Bouly, thèse de doctorat (2011)



Extraction pour ISOL@MYRRHA (600 MeV)

- Design conceptuel avec kicker rapide
- Pulses ISOL = 200us, 4mA, 250 Hz

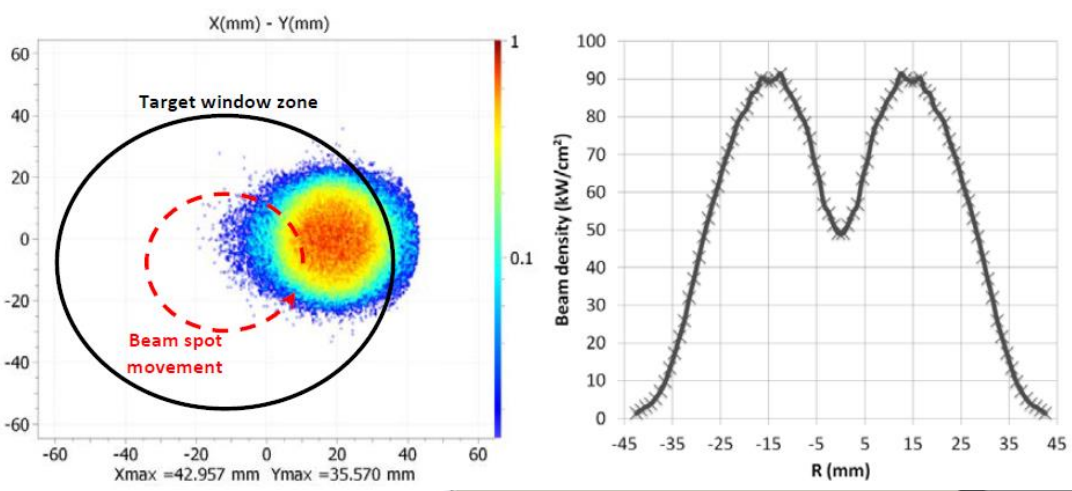


		ISOL@MYRRHA Extraction line			
		DRAWING TITLE Front view			
DRAWN BY Roberto Salenne	DATE 29/04/2013	SIZE A3	DRAWING NUMBER Part1	REV	
CHECKED BY Dirk Vandeplassche	DATE 29/04/2013	SCALE 1:140	SHEET		.1/1
DESIGNED BY Dirk Vandeplassche					

Preliminary layout of the ISOL@MYRRHA extraction zone

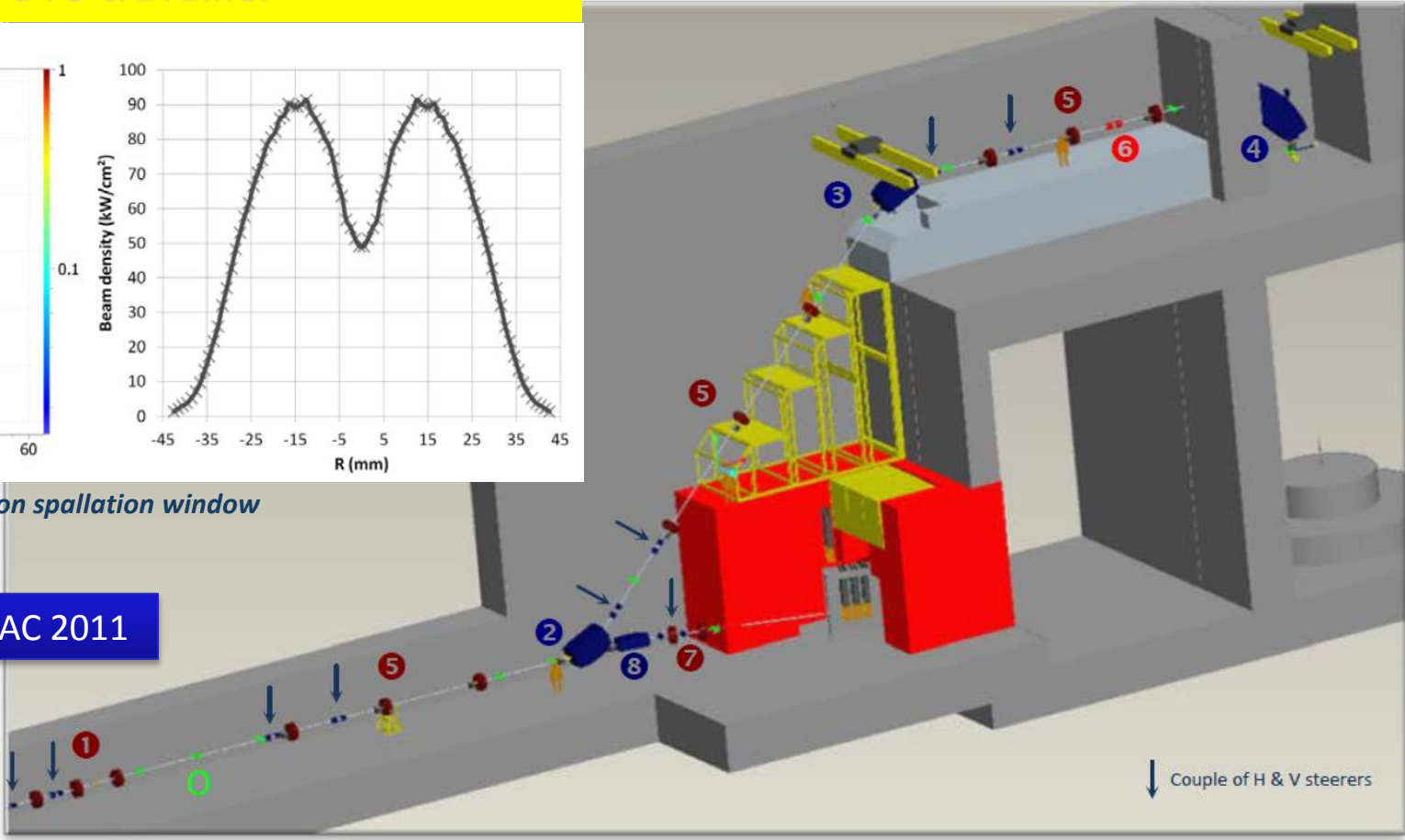
Ligne d'injection réacteur (600 MeV)

- Design de la ligne d'injection, avec arrêt faisceau 2.4 MW (PSI-like) & balayage de la cible
- Interface réacteur à re-travailler



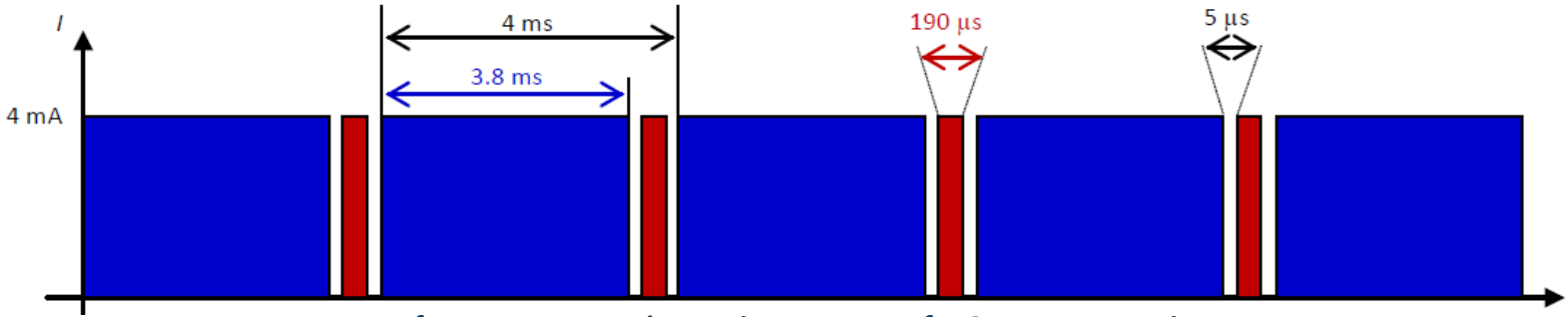
Beam distribution on spallation window

H. Sagnac et al., Proc. IPAC 2011



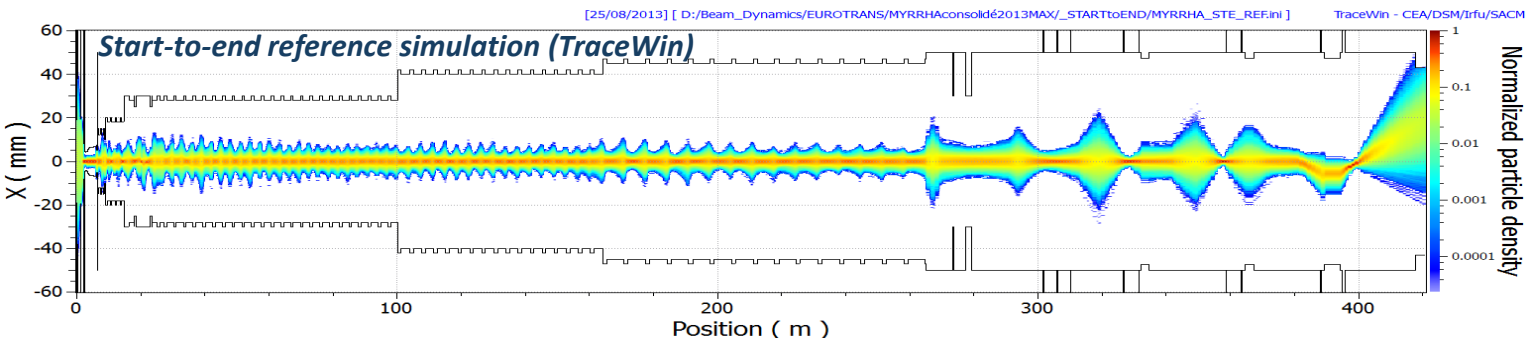
Layout of the MYRRHA beam lines to reactor & dump

➤ Definition de la structure faisceau et de la stratégie de contrôle



Reference MYRRHA beam time structure for 2.4 MW operation:
 -> long 4mA blue pulses are sent to the reactor (mean power is adjusting with pulse length)
 -> short red ones are sent to ISOL (creating 200us beam holes for reactor subcriticality monitoring)

- “Benchmarking” de codes (TraceWin, LORASR, Track)
- Simulations “start-to-end” (nominal, avec pannes)
- Etudes d’erreurs Monte Carlo à venir

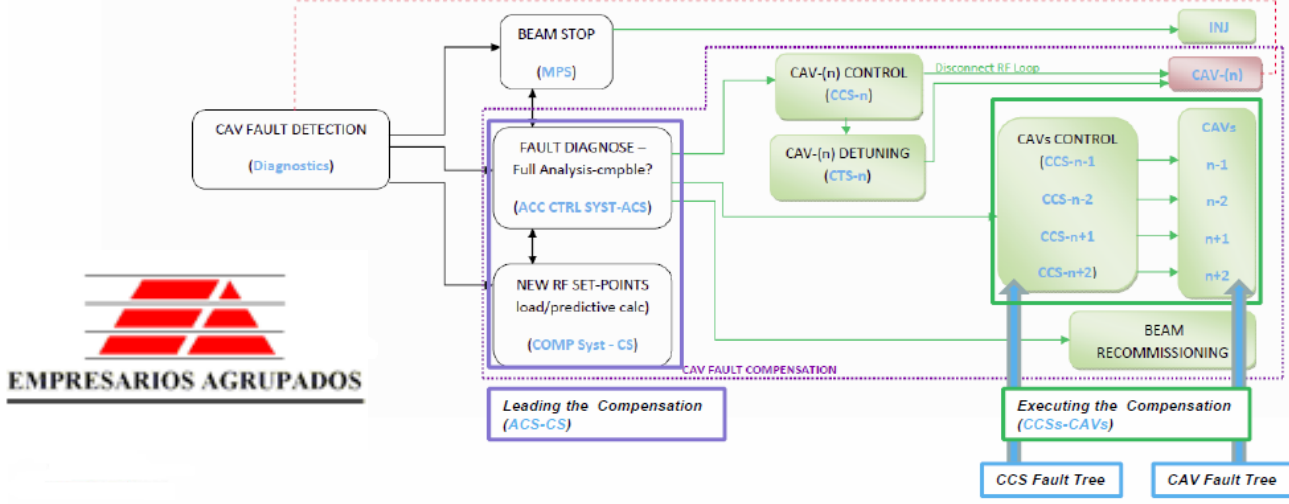


J-L. Biarrotte et al.,
 Proc. TC-ADS 2013

Etudes fiabilité, optimisation systèmes

- Modélisation de la fiabilité du linac de SNS, avec résultats concluants Vs logbook
- Modèle en cours d'adaptation pour le linac de MYRRHA

A. Pitigoï, Proc. TC-ADS 2013



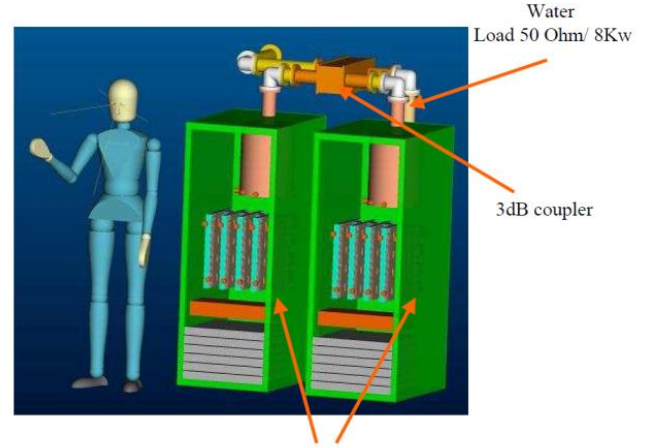
Local compensation sequence: basis for « COMP » fault tree

- R&D sur les amplis RF état solide 700 MHz
- Design préliminaire de l'usine cryogénique

T. Junquera et al., Proc. SRF 2013



- Développements diagnostics faisceau (EM-4D, BPM...)



Proprietary Information

2 x 16Kw bloc





1. Introduction
2. Spécificités de l'accélérateur ADS
3. R&D récente autour de l'accélérateur pour MYRRHA
4. Conclusion

Conclusions & perspectives

➤ **Produire un faisceau de type MYRRHA (forte puissance + très fiable) est un challenge très intéressant (& difficile) à relever**

- Le niveau de fiabilité requis par MYRRHA est extrêmement élevé
 - ✓ 2 ordres de grandeur > SNS (seul linac SC forte puissance existant, en attendant Spiral-2 !)
- Un faisceau ~MW n'est pas facile à produire et contrôler (halo, protection machine...)
 - ✓ SNS a mis 3 ans pour atteindre le MW ($P_{\text{MYRRHA}} = 2 \times P_{\text{SNS}}$, $P_{\text{ind_ADS}} = 15 \times P_{\text{SNS}}$)

➤ **Les études actuelles sont principalement dédiées à la conception machine et à la R&D sur certains composants clé.**

- Nous avons acquis une certaine confiance sur la pertinence des solutions envisagées
 - ✓ Feedback positif lors de la "MYRRHA Design Review" de Novembre 2012
- Le besoin en R&D reste très important pour démontrer complètement la faisabilité et préparer une éventuelle phase de construction de MYRRHA
 - ✓ Construction injecteur échelle 1 (initié au LPSC + SCK*CEN), prototypage cryomodules, problématiques à l'interface réacteur...

Conclusions & perspectives

- **L'IN2P3 est jusqu'à présent l'organisme leader sur la thématique**
 - 15 ETP sur la R&D linac MYRRHA, dt la moitié vient de l'IN2P3 (IPNO: 5, LPSC: 2)
- **Les activités R&D accélérateurs ADS semblent globalement appréciées et soutenues**
 - Soutien de l'IN2P3 depuis plusieurs années (AP) + FP5/6/7 + PACEN/NEEDS
 - Un projet de type "MAX II" (2015-2018) est fortement encouragé par EURATOM
 - Impact potentiel sur la fiabilité des accélérateurs du futur
- **Les activités des prochaines années seront probablement très conditionnées par la décision de construire (ou de ne pas construire) MYRRHA**
 - Quid d'une position française sur MYRRHA ?
 - Quid d'une éventuelle implication forte de l'IN2P3 dans la construction ? (à la ESS)
 - En préalable, un engagement fort du SCK*CEN au niveau Accélérateurs est requis
 - ✓ Le groupe Accélérateurs du SCK*CEN se résume actuellement à... 3 personnes !!
 - ✓ La com. actuelle du SCK = "le CNRS va fournir l'accélérateur de MYRRHA" est irréaliste, une "Central Design Team" d'envergure sera nécessaire sur place (cf. ESS, SPIRAL2...)



MAX

MYRRHA ACCELERATOR eXPERIMENT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAMME



Merci pour votre attention !

COORDINATOR

<http://ipnweb.in2p3.fr/MAX/>



<http://myrrha.sckcen.be/>

