

R&D pour l'accélérateur du projet MYRRHA

F. Bouly, M. Baylac, D. Bondoux, Y. Gómez Martínez, LPSC

J.-L. Biarrotte, C. Joly, M. Ben Abdillah, N. Gandolfo, D. Longuevergne, H. Saugnac, IPNO

Résumé

Porté par le SCK•CEN, le projet MYRRHA, a pour objectif la réalisation d'un démonstrateur de réacteur hybride (ou ADS pour « Accelerator Driven System ») afin d'étudier la faisabilité de la transmutation des déchets nucléaires hautement radiotoxiques. La réaction en chaîne, dans le cœur sous-critique de ce réacteur sera entretenue grâce à des neutrons de spallation. Ces neutrons seront produits par l'intermédiaire d'un faisceau de protons, issu d'un accélérateur de forte puissance (4 mA – 600 MeV) dont la grande particularité est son niveau de fiabilité extrême et unique au monde : ceci afin de garantir la disponibilité et la robustesse de l'ADS qu'il pilote. La solution de référence retenue est un accélérateur linéaire supraconducteur, qui permet la mise œuvre d'un schéma de compensation de panne. Depuis plus de 10 ans, les études de R&D pour cet accélérateur sont menées au travers de différents projets européens au sein desquels l'IN2P3 joue un rôle majeur. Au début de l'année 2016, le SCK•CEN et de façon plus large le gouvernement belge a émis le souhait de financer le prototypage avancé de tous les éléments de l'accélérateur. Ceci dans l'objectif de lancer la construction de la première partie de l'accélérateur de MYRRHA (100 MeV) à l'horizon 2020 : « MYRRHA phase I ». Afin de discuter les potentielles implications de l'IN2P3 dans ce projet, ce rapport présente dans ses trois premières parties le contexte et les enjeux scientifiques pour l'accélérateur MYRRHA. Puis, on expose un bref état de l'art des accélérateurs de forte puissance dans le monde. L'évolution du design et les étapes franchies au sein des différents programmes de recherches européens sont ensuite résumées; on explicite aussi le rôle joué par l'IN2P3. Enfin, avant de conclure, les ressources et moyens envisagés pour une possible implication de l'institut dans la construction de «MYRRHA 100 MeV» sont discutés.

1. Introduction et contexte du projet

Le nucléaire est la source d'énergie principale pour la production d'électricité civile en France. Aujourd'hui, les 58 réacteurs industriels en fonctionnement représentent plus de 75 % de la production électrique totale dans l'Hexagone [1]. Ce développement important en France est notamment survenu à la suite du choc pétrolier des années 1970. Il est la conséquence d'une politique volontaire d'indépendance énergétique [2]. De plus la fission nucléaire produit une énergie extrêmement concentrée, sans rejet direct de dioxyde de carbone et présente ainsi un intérêt dans la production d'électricité dans un contexte de réduction d'émission de gaz à effet de serre.¹

Toutefois, l'activité électronucléaire engendre des déchets (produits de fission, actinides mineurs), dont une fraction est hautement radiotoxique et responsable de fort dégagement de chaleur. Ceci complexifie grandement la manipulation de ces déchets ainsi que leur potentiel stockage en couche géologique profonde. En 2013 le volume de déchets de Haute Activité (HA) stockés en France s'élevait à 3100 m³, on estime que leur production est d'environ 5 tonnes/an et que leur volume atteindra 4100 m³ à l'horizon 2020 [3].

Peu considérée dans un premiers temps, il est désormais admis que la problématique de gestion de ces déchets comporte des dimensions techniques et sociales indissociables, qui revêtent de nombreux enjeux politiques aussi bien à l'échelle nationale que locale [4].

Afin de répondre à cette problématique sociétale, l'IN2P3 a entrepris les études des systèmes nucléaires et de leurs scénarios associés suite à la loi de 1991 (dite « loi Bataille ») qui a été consolidée et modifiée le 28 juin 2006 [5]. Dans son article 3, il est déclaré que les réflexions autour des problématiques de gestion des déchets s'organisent autour de trois axes complémentaires. Un premier axe porte notamment sur « *la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue. Les études et recherches correspondantes sont conduites en relation avec celles menées sur les nouvelles générations de réacteurs [...] ainsi que sur les réacteurs pilotés par accélérateur dédiés à la transmutation des déchets* ». A noter aussi que le deuxième axe étudie « *le stockage réversible en couche géologique profonde* ».

Dans cet objectif des études de scénario et de faisabilité ont été effectuées, en particulier au sein du Groupement de Recherche GEDEPEON (Gestion des Déchets et Production d'Energie par des Options Nouvelles). Parmi les scénarios possibles l'utilisation des réacteurs hybrides pilotés par accélérateur (ou ADS pour « Accelerator Driven System ») est envisagée pour transmuter (ou incinérer) des isotopes de durée de vie longue, typiquement les actinides mineurs. L'utilisation des ADS s'inscrirait dans une stratégie de transmutation en double strate : ils seraient dédiés à l'incinération des actinides mineurs issus de réacteurs multi recyclant le plutonium (REP ou RNR).

Afin d'étudier la faisabilité, et d'optimiser le fonctionnement, d'un réacteur sous-critique piloté par un accélérateur des études sont notamment menées par l'IN2P3 depuis 2007 avec la construction et l'exploitation de l'expérience GUINEVERE (Generator of Uninterrupted Intense Neutrons at the lead Venus REactor) [6]. Ce projet initié par le SCK•CEN (Mol, Belgique) et le CNRS consiste en une expérience de couplage entre un réacteur maquette sous-critique (le réacteur VENUS du SCK•CEN) et une source de neutrons de 14 MeV générés par l'accélérateur électrostatique de deutons GENEPI-3C, développé par quatre laboratoires de l'IN2P3 (LPSC, LPC, IPNO,IPHC) et opéré par les équipes du LPSC Grenoble [7]. L'installation est opérationnelle depuis 2011. Soutenu par le projet européen FREYA (Fast Reactor Experiments for hYbrid Applications) du 7^{ème} programme cadre d'EURATOM puis par le projet MYRTE (H2020), le programme de

¹ On peut donner comme ordre de grandeur que : l'énergie produite par la fission d'un gramme d'uranium 235 équivaut à la combustion de ~2,4 tonnes de charbon et de ~1,6 tonnes de pétrole.

recherche sur l'expérience GUINEVERE porte non seulement sur la validation de la méthodologie pour le contrôle en ligne de la réactivité d'un ADS, mais également sur la caractérisation de cœurs sous-critiques et critiques afin de fournir des données aux codes de calculs utilisés pour la conception de MYRRHA.

2. Enjeux pour l'accélérateur d'un ADS

2.1. Le projet MYRRHA

Initié par le SCK•CEN le projet MYRRHA (pour Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications) vise la construction d'un démonstrateur d'ADS d'une puissance de 50-100 MW_{th}. La conception de cette installation aura pour principaux objectifs :

- de démontrer le pilotage d'un ADS à une puissance significative, ainsi que la transmutation effective des déchets radioactifs à vie longue de façon expérimentale (assemblages expérimentaux);
- de servir de plateforme d'irradiation à spectre rapide et à haut flux ($\Phi > 0.75 \text{ MeV} = 10^{15} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$), permettant notamment l'étude des matériaux pour les réacteurs à neutrons rapides et la fusion, ou pour la production de radio-isotopes;
- de contribuer à la démonstration de la technologie des réacteurs rapides de Génération IV à plomb fondu, comme souligné dans la feuille de route SNE-TP d'EURATOM [8], sans pour cela compromettre les objectifs précédents.

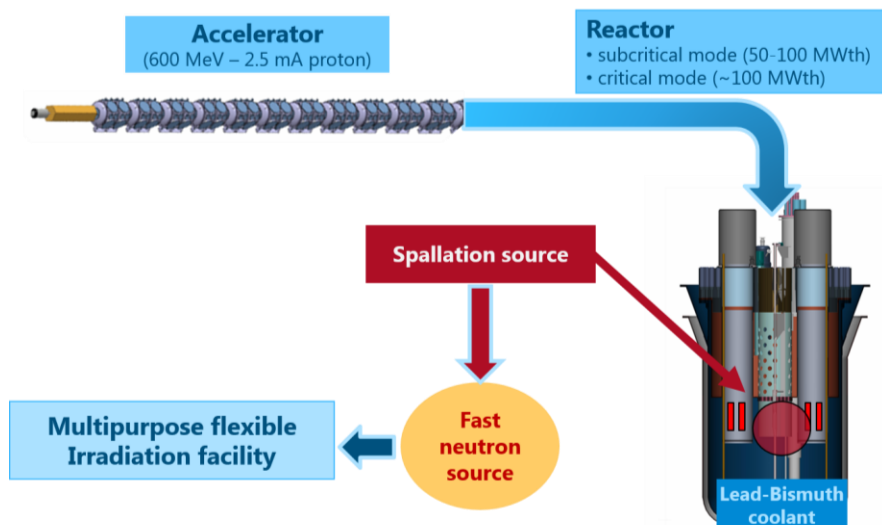


Figure 1 : Schéma conceptuel de l'ADS MYRRHA

Le principe conceptuel de la machine est décrit en Figure 1. Il est prévu que ce réacteur à neutrons rapides puisse être opéré en mode critique et en mode sous-critique. Le combustible utilisé sera du MOX au sein duquel des cellules tests d'irradiation et de transmutation pourront être insérées. En mode sous-critique, la source externe de neutrons est fournie, via spallation directe sur une cible, par un faisceau de protons à travers une fenêtre d'isolation. La cible de spallation est en fait un eutectique de plomb-bismuth (Pb-Bi), qui sera aussi le fluide caloporteur du réacteur. De par ses propriétés thermiques le Pb-Bi permettra, en convection forcée, d'évacuer la chaleur produite par les réactions nucléaires mais aussi le sur-échauffement induit par le faisceau de protons issu de l'accélérateur de particules.

2.2. Accélérateur pour les ADS

Un système de type ADS nécessite l'utilisation d'un accélérateur de protons de forte puissance, produisant des faisceaux continus de plusieurs MW : la demande actuelle se situe typiquement autour de 2 MW pour un ADS démonstrateur, et entre 15 et 30 MW dans le cas d'un incinérateur de type industriel. Outre les fortes puissances faisceau mise en jeu, qui ont de nombreuses implications sur la conception, notamment en termes de maîtrise des pertes, de l'activation de la machine ou de la protection des équipements, la spécificité principale d'un tel accélérateur est qu'il doit pouvoir être opéré d'une manière extrêmement fiable, puisqu'un nombre restreint d'interruptions faisceau par an sera toléré.

L'énergie du faisceau de protons requise pour piloter un ADS doit typiquement être de l'ordre du GeV. Cette valeur résulte d'un compromis dicté par différents critères. L'énergie des protons doit être suffisamment élevée pour optimiser l'efficacité de la réaction de spallation², mais aussi pour limiter l'énergie déposée dans la cible et sa fenêtre, en facilitant de fait sa conception et ses contraintes d'utilisation. D'autre part, l'optimisation des coûts de l'accélérateur favorise une énergie basse. Les compromis obtenus à la suite des travaux menés sur le thème lors du projet EUROTRANS³ (FP6) donnent ainsi les énergies de référence suivantes (cf. Table 1) : 600 MeV pour le démonstrateur MYRRHA et 800 MeV pour la version prototype industrielle baptisée EFIT⁴ [9]. A noter pour mémoire que le projet de prototype industriel japonais du JAEA⁵ a une énergie de référence de 1.5 GeV.

Table 1 : Spécifications faisceau pour MYRRHA et EFIT, issues du projet EUROTRANS (2010)

	Démonstrateur ADS (MYRRHA)	Prototype industriel (EFIT)
Courant faisceau	2.5 mA (& jusqu'à 4 mA pour compenser le burn-up)	~ 20 mA
Energie des protons	600 MeV	800 MeV
Nombre max. d'interruptions faisceau (> 3 sec)	~ < 10 par cycle opératoire de 3 mois	~ < 3 par an
Pénétration faisceau dans le réacteur	Verticalement par-dessus	
Stabilité faisceau sur cible	Energie: ±1% - Courant: ±2% - Position & taille: ±10%	
Structure temporelle faisceau	Continue (CW ⁶), avec de courtes interruptions faisceau (~200µs) à une fréquence de 250 kHz pour un monitoring en ligne de la sous-criticité	

Une fois l'énergie des protons fixée, le courant du faisceau nécessaire pour assurer le pilotage du réacteur est ensuite déterminé selon la puissance thermique et le niveau de sous-criticité du cœur. Dans le cas de MYRRHA ($k_{\text{eff}} = 0.95$), le courant continu requis est ainsi d'environ 4 mA au maximum (soit 2.4 MW de puissance faisceau moyenne), tandis que pour EFIT ($k_{\text{eff}} = 0.97$), il s'élèverait à environ 20 mA, ce qui correspond à une

² Le rendement visé pour une cible en Pb ou Pb-Bi est de 25 à 30 neutrons par proton incident et par GeV.

³ European Research Programme for the Transmutation of High Level Nuclear Waste in an Accelerator Driven System (eurotrans), Contract Number: FI6W-CT-2004-516520.

⁴ EFIT : European Facility for Industrial Transmutation.

⁵ JAEA : Japan Atomic Energy Agency.

⁶ CW: Continuous Wave

puissance faisceau moyenne de 16 MW. En l'état actuel de la technologie, la meilleure alternative pour pouvoir produire un faisceau de 800 MeV d'une telle puissance de façon continue (et fiable) est l'utilisation d'un accélérateur linéaire. C'est en partie pour cette raison que le projet MYRRHA, à titre de démonstrateur, a également opté pour cette option au détriment de l'option cyclotron, suivant ainsi les recommandations énoncées en 2002 lors d'un atelier de l'OCDE/NEA dédié [10].

Les caractéristiques principales du faisceau de protons pour MYRRHA sont indiquées dans la Table 1. Outre le très haut niveau de puissance faisceau, le défi principal – et très novateur – à relever pour cette machine est le niveau de fiabilité extrême requis, puisque le nombre d'interruptions du faisceau doit être limité à des valeurs extrêmement faibles. Cette spécification draconienne sur la fiabilité de l'accélérateur est motivée par le fait que des interruptions faisceau de durée supérieure à quelques secondes pourraient, si fréquemment répétées, induire des contraintes thermiques élevées sur les matériaux fortement irradiés de la fenêtre, de la cible, des gaines du combustible ou plus généralement des structures du réacteur. En outre, de telles interruptions de faisceau, si systématiquement associées à un arrêt du réacteur, pourraient également réduire considérablement la disponibilité de l'installation, puisque les procédures de redémarrage envisagées ont une durée de 20 à 30 heures [11].

Pour MYRRHA, la limite actuelle pour le nombre de ces interruptions faisceau a été fixée à 10 par cycle opératoire de 3 mois, seules les interruptions de plus de 3 secondes étant comptabilisées. Cette spécification a été définie au cours du projet EUROTRANS (FP6), et est en grande partie inspirée de l'analyse opératoire du réacteur PHENIX [11]. D'autres études au Japon ou aux Etats-Unis [12] font néanmoins état de spécifications beaucoup plus souples, mettant en évidence que plusieurs incertitudes demeurent encore sur cette thématique, liées en particulier aux propriétés des matériaux irradiés, aux aspects d'érosion et de corrosion en environnement Pb-Bi, aux procédures de redémarrage du réacteur, etc...

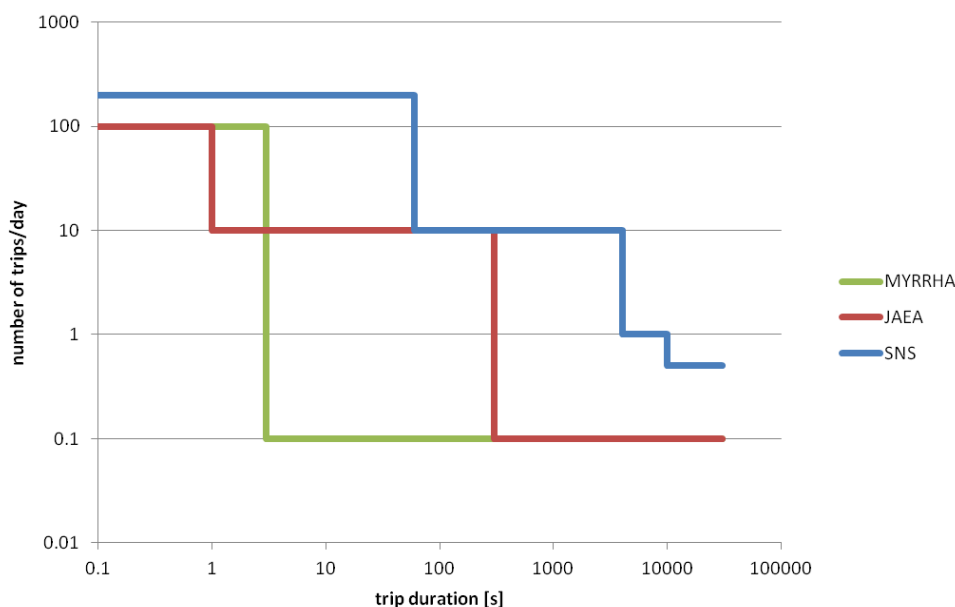


Figure 2 : Fréquence des interruptions/pannes faisceau en fonction de leurs durées : enregistrées à SNS, acceptées par l'ADS japonais (JAEA), acceptées par MYRRHA.

En tout état de cause, le nombre limite d'interruptions faisceau autorisées sera dans tous les cas significativement plus faible que le nombre de pannes enregistrées sur les

accélérateurs comparables en fonctionnement aujourd'hui, comme le SNS⁷. Cette importante différence est illustrée sur la Figure 2 [13], et montre que la fiabilité est bel et bien le défi n°1 pour l'accélérateur de MYRRHA.

3. Concept de l'accélérateur ADS européen : tolérance aux pannes

La contrainte de fiabilité de l'accélérateur ADS peut être reformulée de la façon suivante : le temps moyen de fonctionnement entre deux pannes (MTBF⁸) doit être supérieur, dans le cas de MYRRHA, à 250 heures, une panne étant définie comme un arrêt faisceau de plus de 3 secondes. Un accélérateur de cette complexité étant composé d'une multitude de sous-systèmes et de sous-sous-systèmes, tous contribuant de manière essentielle à la production du faisceau, on peut montrer qu'une amélioration conséquente du MTBF « naturel » ne peut être obtenue que si la panne d'un sous-système n'implique pas automatiquement la panne globale de tout l'accélérateur [14]. De plus, une telle « tolérance aux pannes » ne peut être efficace que si elle est accompagnée de deux contraintes supplémentaires : un temps de commutation réaliste, et un temps moyen de réparation (MTTR⁹) beaucoup plus court que le MTBF de l'élément défaillant. Dans le cas de MYRRHA, le temps de commutation (qui est la somme du temps de détection de la panne et du temps de reconfiguration) est de 3 secondes. Ce temps est clairement très court, mais reste réaliste compte tenu des performances actuelles de l'électronique numérique. La question du MTTR est une question d'ingénierie plus vaste qui mérite une attention continue au cours de toute la phase de conception détaillée.

Le concept clé permettant de mettre en œuvre la « tolérance aux pannes » dans l'accélérateur ADS est la redondance. La redondance parallèle, utilise deux éléments pour assurer une unique fonction, mais pour des raisons économiques, ce scénario parallèle doit être clairement réduit au minimum. La redondance série, au contraire, remplace la fonctionnalité d'un élément manquant par un réajustement d'éléments adjacents ayant des fonctionnalités quasiment identiques. Elle est étroitement liée à une structure modulaire.

Pour tenter d'atteindre l'objectif de fiabilité, les 3 principes essentiels à adopter lors de la conception d'un accélérateur ADS ont été identifiés comme suit :

1. utilisation des composants loin de leurs limites technologiques;
2. insertion de redondances – de série si possible – dans les secteurs clés pour la fiabilité afin d'assurer un niveau suffisant de « tolérance aux pannes » ;
3. prise en compte des aspects liés à la maintenance.

L'application de ces principes au cas de l'accélérateur de MYRRHA (et en vue d'une application industrielle type EFIT) amène à adopter une solution technique basée sur l'utilisation d'un accélérateur linéaire (linac) supraconducteur. Ceci est d'ailleurs en accord avec plusieurs accélérateurs de forte puissance, en fonctionnement, en construction ou en projet de par le monde [15] [16] [17] [18]. L'opération de MYRRHA en mode continu (CW) et avec un courant crête modéré (4 mA) renforce le choix de la supraconductivité, d'autant que les performances et l'acceptance des cavités accélératrices supraconductrices RF (radiofréquences) sont aujourd'hui suffisamment élevées pour envisager l'adoption de marges confortables sur les points de fonctionnement. D'autre part, l'architecture d'un accélérateur linéaire supraconducteur,

⁷ SNS : Spallation Neutron Source, Oak Ridge, USA.

⁸ Mean Time Between Failures

⁹ Mean Time To Repair

constitué d'une séquence modulaire de cavités RF à peu près identiques, est en excellent accord avec le concept de redondance en série. Ce concept est illustré par la Figure 3, où le design de l'accélérateur de MYRRHA a été établi de telle façon que la panne d'une cavité puisse être compensée, localement dans l'accélérateur, par les deux cavités placées en amont et les deux cavités placées en aval de la cavité faisant défaut.

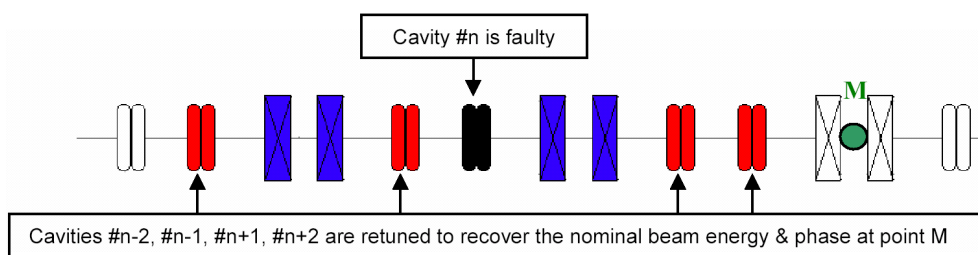


Figure 3 : Schéma de compensation de panne d'une cavité RF pour le linac de MYRRHA.

Afin d'appliquer le concept de « tolérance aux pannes » en particulier dans le cas des cavités RF, dont les systèmes d'alimentation sont une des causes principales de panne faisceau, il faut :

- 1- pouvoir régler l'amplitude et la phase de chaque cavité individuellement et de façon indépendante,
- 2- assurer une dynamique des faisceaux flexible, tolérant facilement la présence d'une cavité inactive
- 3- s'assurer que la technologie des cavités accélératrices supraconductrices et de leur système d'accord en fréquence permettent le re-réglage rapide (en moins d'une seconde) de l'amplitude du champ accélérateur, de la phase du signal RF et de la fréquence de résonance des cavités adjacentes.

Plusieurs études ont déjà été effectuées sur ces aspects, montrant la faisabilité théorique d'un tel re-réglage [19] [20] [21]. De telles procédures ont d'ailleurs été depuis partiellement testées avec succès au SNS [22].

En pratique, les impératifs de fiabilité conduisent ainsi à un concept d'accélérateur ADS composé de 2 sections distinctes (cf. Figure 4).

1. Une section de haute énergie (linac principal supraconducteur, de 17 MeV à l'énergie finale), très modulaire et basée sur l'utilisation de cavités accélératrices supraconductrices alimentées de façon indépendante. Dans cette partie, la redondance de série peut être facilement appliquée de manière à fournir une forte tolérance aux pannes. La fonction d'une cavité défectueuse peut typiquement être prise en charge par quatre cavités adjacentes.
2. Une section de basse énergie (injecteur), dans laquelle la modularité et la « tolérance aux pannes » sont plus difficilement applicables du fait de la faible vitesse du faisceau. Ici, la redondance est donc appliquée dans sa forme parallèle, avec deux injecteurs complets très compacts ayant des capacités de commutation rapide.

Depuis la fin des années 1990, les études de recherche et développement menées sur l'accélérateur de MYRRHA ont été pour la majeure partie financées par des programmes européens au sein desquels les laboratoires de l'IN2P3 ont toujours eu un rôle moteur. De nombreux travaux ont donc été effectués, en se focalisant sur le concept de fiabilité dès la phase de design de l'accélérateur, ce qui représentait une approche « nouvelle » dans la communauté des accélérateurs plus souvent focalisée sur des aspects de « performance ». Ceci a notamment permis le prototypage de certains éléments de

l'accélérateur et d'aboutir à un design de référence, dont le concept a d'ailleurs été repris par d'autres projet d'ADS [23] .

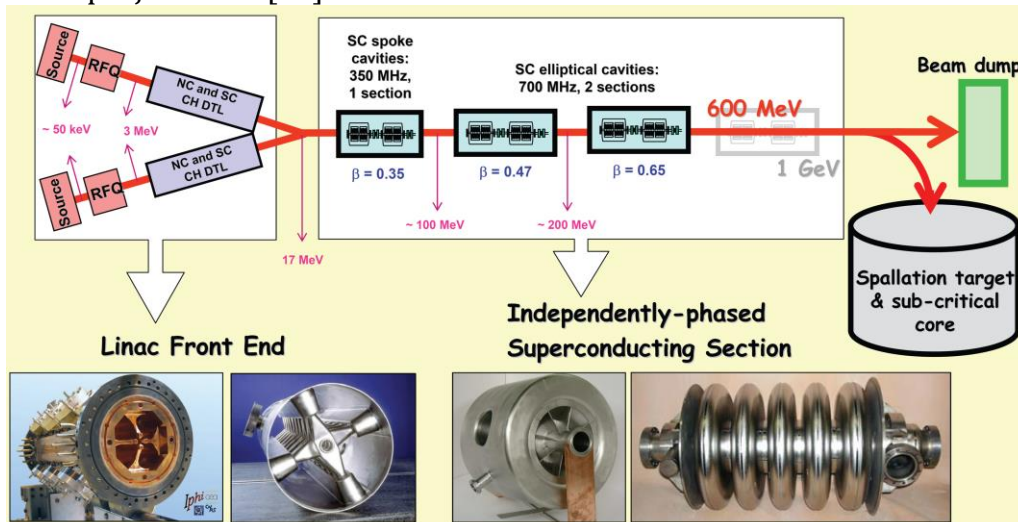


Figure 4 : Schéma conceptuel de l'accélérateur ADS européen, appliqué au cas de MYRRHA (le concept est facilement extensible jusqu'à 1 GeV par exemple pour un ADS industriel). Les photos de gauche à droite représentent : un RFQ en cuivre, et des cavités de type CH, Spoke et Elliptique.

Le gouvernement belge a attribué au projet MYRRHA un budget pour la phase 2016-2017, permettant de financer le prototypage avancé de tous les éléments de l'accélérateur. Ceci dans l'objectif de lancer la construction dès 2019 de la première partie de l'accélérateur de MYRRHA qui permettra de fournir un faisceau de protons de 100 MeV : « MYRRHA phase I ».

Afin de discuter les possibles implications de l'IN2P3 - dans cette perspective de construction et d'opération de l'accélérateur « MYRRHA 100 MeV » - on présentera dans la partie suivante un panorama actuel des accélérateurs de forte puissance. L'évolution du design de l'accélérateur et les étapes franchies au sein des différents programmes de recherche européens seront ensuite résumés ; on explicitera aussi le rôle joué par l'IN2P3. Enfin avant de conclure on discutera les ressources et moyens envisageables pour une possible implication de l'institut dans la construction de « MYRRHA 100 MeV ».

4. Accélérateurs de forte puissance : protons et deutons

Depuis une vingtaine d'années on constate une forte demande, émanant des différentes communautés en physique des particules et physique nucléaire, pour disposer d'accélérateurs de protons et d'ions de forte puissance. Ces applications requièrent en général un faisceau de protons avec une puissance moyenne élevée dont l'énergie cinétique se situe autour du GeV, ce qui est bien au-delà des capacités de la plupart des accélérateurs actuellement en fonctionnement. On peut constater cela sur la Figure 5 où l'on présente un panorama mondial (non exhaustif) des accélérateurs de protons et de deutons en opération, en construction ou en projet [24] : chaque machine est située en fonction de son courant faisceau moyen et de son énergie, les courbes iso-puissance ont été tracées pour pouvoir les comparer.

On peut donc constater sur cette figure que la plupart des accélérateurs en fonctionnement sont composés de structures accélératrices dites « chaudes »¹⁰. C'est notamment le cas du cyclotron de PSI qui est l'un des accélérateurs les plus puissants au monde et le premier à avoir atteint les 1,3 MW [25]. Néanmoins, il semble actuellement

¹⁰ Cavités accélératrices généralement en cuivre, refroidies à l'eau pour évacuer la chaleur induite par les dissipations de l'onde électromagnétique.

difficile d'aller au-delà d'une telle puissance faisceau avec un cyclotron. En effet plus l'énergie est élevée, plus la séparation d'orbite est tenue ce qui rend l'extraction du faisceau très compliquée. De plus, les systèmes d'extraction des cyclotrons à haute énergie engendrent déjà de fortes pertes faisceau, ce qui induit une forte activation des structures. Ceci complique fortement la maintenance et la fiabilité de fonctionnement de la machine. Enfin, de par leur fonctionnement, l'augmentation du courant dans les cyclotrons est aussi difficilement envisageable car ceci augmenterait considérablement les effets « faisceau-faisceau » et donc les phénomènes d'instabilité qui provoqueraient de nouvelles pertes.

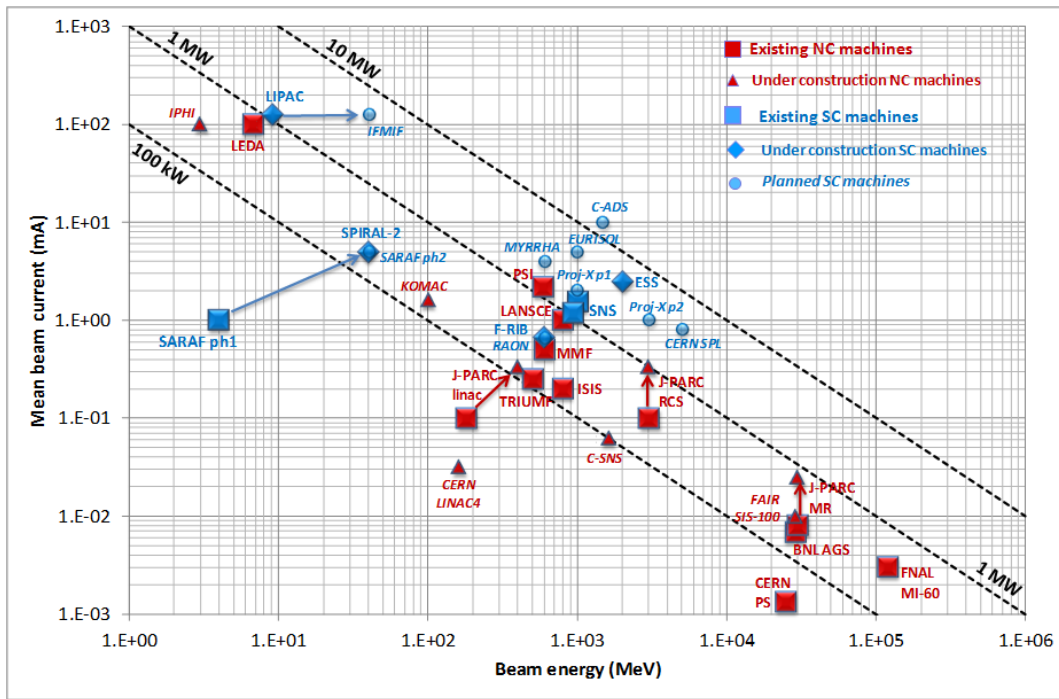


Figure 5: Panorama (non exhaustif) des accélérateurs de protons et deutons dans le monde [24].

Ainsi pour espérer augmenter la puissance des futurs accélérateurs de protons, la technologie supraconductrice radiofréquence (SRF) apparaît comme la plus prometteuse. L'une des raisons principales pour se tourner vers la technologie SRF est la minimisation de la puissance consommée par l'accélérateur et par conséquent la minimisation de son coût de construction et d'opération. Il est important de préciser que cette puissance dépend du rapport cyclique (RC) de la machine : c'est-à-dire le rapport entre la durée de l'impulsion faisceau et la période de répétition de cette impulsion. En première approximation on peut considérer que la puissance totale consommée par l'accélérateur (P_{tot}) dépend de la puissance consommée par les cavités accélératrices (P_{cav}) et de la puissance fournie au faisceau ($P_{faisceau}$) modulées par le rapport cyclique, ainsi que de la puissance consommée par l'installation cryogénique (P_{cryo}) :

$$P_{tot} \approx RC \times (P_{cav} + P_{faisceau}) + P_{cryo} \quad (1)$$

Le choix pour l'utilisation de la technologie SRF relève donc d'une optimisation entre la consommation des cavités accélératrices et de la puissance consommée par une installation cryogénique. En général on constate pour les machines pulsées (avec un cycle utile de quelques %) - telles que SNS, ESS, SPL- qu'il existe une énergie de transition au-delà de laquelle la technologie SRF devient plus efficace : autour de 100 à 200 MeV. Pour

les machine CW (c'est-à-dire avec RC $\sim 100\%$) la règle serait plutôt d'utiliser des cavités SRF à l'énergie la plus basse possible (SPIRAL2, MYRRHA).

On pourra donc constater sur la Figure 5 qu'au-delà du MW la plupart des projets en cours ou futurs sont basés sur la technologie SRF. C'est aussi le cas pour l'accélérateur du SNS qui est le seul linac SRF haute puissance actuellement en fonctionnement dans le monde. L'objectif de puissance faisceau sur cible de 1,4 MW a été atteint en 2013 [26]. L'accélérateur de SNS consiste en un accélérateur d'ions H^- , qui sont ensuite transformés en protons (par « stripping » des électrons) lors de l'injection dans un anneau accumulateur où la durée de l'impulsion faisceau est compressée pour augmenter son intensité crête. L'accélérateur linéaire (cf. Figure 6) fonctionne avec un cycle utile d'environ 6 % pour fournir un faisceau à une énergie de 1 GeV. Il est composé de cavités chaudes (RFQ, DTL et CCL¹¹) jusqu'à une énergie de 186 MeV, ensuite l'accélération est assurée par deux familles de cavités elliptiques supraconductrices fonctionnant à 805 MHz : soit 81 cavités SRF au total.

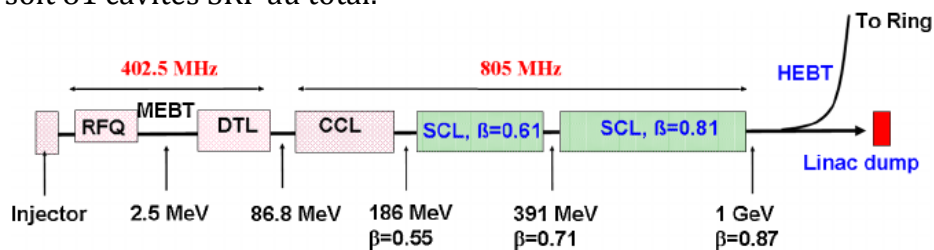


Figure 6: Structure du linac de SNS [27].

Bien que le faisceau soit pulsé et que les particules accélérées soient des H^- , il n'en demeure pas moins que le SNS est la référence principale pour l'accélérateur de MYRRHA. Ils présentent tous deux de fortes similitudes technologiques liées à l'utilisation de cavités SRF. Le développement des cavités 700 MHz de MYRRHA et de leurs systèmes associés (coupleurs de puissance, système d'accord) est d'ailleurs en partie basé sur ceux de SNS. Plus généralement l'expérience acquise sur l'opération d'un tel linac est précieuse en vue de l'objectif de fiabilité à atteindre pour MYRRHA. De plus, l'accélérateur de MYRRHA sera d'une envergure similaire au SNS en termes d'infrastructures et de personnels nécessaires pour assurer sa construction et son opération au quotidien. La construction de SNS a impliqué de nombreux laboratoires partenaires américains, en particulier lors de la phase de R&D entre 1995 et 1999. Dès le début de cette phase une équipe locale dédiée à l'accélérateur a été mise en place et son effectif n'a cessé de croître depuis le début de la construction en 1999, jusqu'à la fin du commissioning en 2006.

MYRRHA présente aussi de grandes similitudes avec le projet européen ESS. L'accélérateur consiste aussi en un linac supraconducteur à protons qui devra fournir un faisceau d'une énergie de 2 GeV pour une puissance faisceau de 5 MW. Il fonctionnera aussi en mode pulsé avec un cycle utile de 4 %, son design est fortement similaire à celui de SNS. Toutefois on notera une différence importante : la section composée de cavités CCL en cuivre dans SNS a été remplacée par des cavités supraconductrices de type « double Spoke » dans le cas d'ESS. Le développement de ces cavités, est d'ailleurs mené par l'IN2P3 et plus particulièrement par la Division Accélérateurs de l'IPN d'Orsay. Ce type de cavité est aussi envisagé comme alternative à la technologie des cavités elliptiques $\beta=0.47$ qui composent la deuxième section du linac supraconducteur de MYRRHA. De plus, la première section du linac de MYRRHA sera composée de cavités « simple Spoke » dont le développement est aussi mené par l'IPN d'Orsay. Il y a donc possibilité d'établir une forte synergie entre ces deux projets, et ceci au sein même de

¹¹ RFQ : Radiofrequency Quadrupole. DTL : Drift Tube Linac. CCL : Coupled Cavity Linac.

l'IN2P3. Enfin on trouve aussi une forte similitude entre MYRRHA et ESS dans le design de la ligne basse énergie (LEBT) et aussi dans les besoins d'instrumentation pour la mesure des propriétés du faisceau.

A présent, les bâtiments du tunnel de l'accélérateur d'ESS sont en cours de construction à Lund (Suède). La R&D et la construction de l'accélérateur s'articule autour de 17 « work packages », dont certains sont menés par des laboratoires européens partenaires (dont l'IN2P3 et le CEA pour le développement des cavités supraconductrices). L'ensemble de ces travaux est coordonné par la Division Accélérateur locale d'ESS. Elle comporte une soixantaine de personnes qui pour la plupart ont été recrutées ces six dernières années.

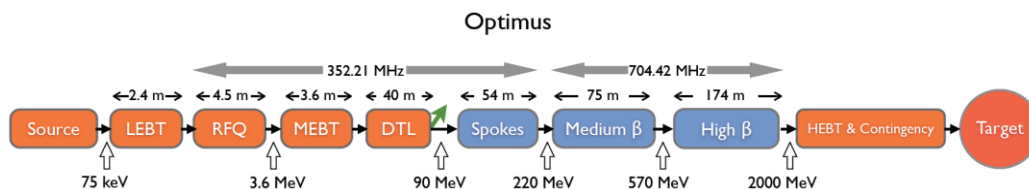


Figure 7: Structure du linac de ESS [28].

Par ailleurs au niveau international, la Chine mène un programme ambitieux de développement sur les ADS dirigé par la *Chinese Academy of Sciences* depuis 2011, dans le but ultime de construire une installation de démonstration à l'échelle industrielle. La première étape de ce programme, financée par le gouvernement chinois, est basée sur la construction du *China Initiative Accelerator Driven System* (CIADS) sur la période 2017-2022 à Huizhou (province de Guangdong). Ce projet comprend un accélérateur supraconducteur fournissant un faisceau de protons de 10 mA (CW) à une énergie de 250 MeV sur une cible de spallation granulaire située dans un cœur sous-critique (10 MW_{th}).

L'accélérateur du projet MYRRHA s'inscrit donc dans la mouvance des nouveaux projets d'accélérateurs « MégaWatts ». La puissance faisceau visée reste tout à fait raisonnable en comparaison à d'autres projets. Le principal challenge est bel et bien l'objectif de fiabilité. Comme nous l'avons souligné précédemment, le retour d'expérience de SNS est très précieux. Remarquons ici qu'il a fallu plus de trois ans après le commissioning de SNS pour atteindre une puissance de 1 MW et plus de cinq ans pour atteindre la puissance nominale. Les premières analyses de l'opération de SNS ont aussi montré qu'une grande partie des interruptions faisceau est due aux générateurs RF et à l'injecteur. Le retour d'expérience montre aussi que les modules supraconducteurs sont globalement plus fiables que la partie chaude du linac. Toutefois, certains points critiques ont aussi pu être identifiés, comme la dégradation des performances de certaines cavités SRF suite à des pertes faisceau, ou des fragilités sur le système d'accord en fréquence des cavités [26]. Ce sont donc l'ensemble de ces aspects qu'il faut anticiper, en amont de la phase de conception, afin d'optimiser la fiabilité d'un accélérateur. C'est donc en grande partie autour de ces thématiques que se sont orientées les activités de R&D menées pour l'accélérateur de MYRRHA, au cours de ces dernières années.

5. R&D et projets européens : Le Projet MAX 2011-2014

Le design de référence de l'accélérateur est développé depuis près de 10 ans. Ces activités de R&D ont été coordonnées par l'IN2P3 au travers des programmes européens PDS-XADS (FP5), EUROTRANS (FP6), MAX (FP7), actuellement le projet MYRTE (H2020) et dans une moindre mesure le projet MARISA¹² (FP7).

Dans cette partie et la partie suivante on se concentrera sur les projets les plus récents en décrivant brièvement les principaux résultats obtenus dans le projet MAX et les objectifs du projet MYRTE. Les implications de l'IN2P3 seront aussi rappelées ainsi que les productions scientifiques (cf Partie 8).

Le projet MAX (Myrrha Accelerator eXperiment R&D programme) [29] a fait suite au projet EUROTRANS. Soutenu par le 7^{ème} programme-cadre de recherche et de développement d'EURATOM, il se focalisait uniquement sur des activités de R&D pour l'accélérateur de MYRRHA. Coordonné par l'IPN Orsay le projet impliquait onze partenaires :

- Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS/IN2P3) : **IPNO et LPSC**
- Accelerators and Cryogenic Systems (ACS), France
- Adaptive Predictive Expert Control Adex SI (ADEX), Espagne
- Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA), France
- Empresarios Agrupados Internacional SA (EA), Espagne
- Universidade Catolica Portuguesa (FE-UCP), Portugal
- Johann Wolfgang Goethe Universitaet Frankfurt am Main (IAP), Allemagne
- Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Italie
- Katholieke Universiteit Leuven (KUL), Belgique
- Studiecentrum Voor Kernenergie (SCK•CEN), Belgique
- Thales Electron Devices SA (TED), France

L'objectif principal du projet était de fournir un design consolidé de l'accélérateur, par rapport à celui établi au cours du projet EUROTRANS, en s'appuyant sur le développement et le prototypage de certains éléments. Ce design obtenu à l'issue du projet est actuellement le design de référence pour l'accélérateur de MYRRHA. On résume ici les principales avancées du projet pour l'injecteur et le linac SRF.

Des informations plus détaillées sont présentes dans la livrable fournie en annexe de ce rapport : [MAX_Deliverable1.5_FINAL_REPORT.pdf](#)

Attention : ce document est soumis à des règles de confidentialité. Merci de ne pas le diffuser en dehors du Conseil Scientifique.

5.1. Injecteur

Toujours pour répondre à la problématique de fiabilité le design de l'injecteur de MYRRHA a été établi afin de garantir une pré-accélération optimale des protons jusqu'à 17 MeV en minimisant le nombre d'éléments dans la ligne. Comme évoqué précédemment dans la Partie 3, afin d'appliquer le principe de tolérance aux pannes l'injecteur sera dédoublé. Si un problème intervient dans le premier injecteur, un aimant permettra de commuter rapidement (en moins de 3 secondes) vers le second injecteur. Aucun travail de R&D n'a pour l'instant été effectué sur ce type d'aimant, toutefois dans le cadre de MAX de nombreuses avancées ont été réalisées sur les autres éléments de l'injecteur.

- Le design de la LEBT (ligne basse énergie) a été finalisé [30]. La construction d'un prototype de la ligne a été lancée. Elle a été menée par le LPSC avec une contribution du SCK•CEN, grâce au support du projet européen MARISA (tâche 7.2).

¹² MYRRHA Research Infrastructure Support Action, funded by the European Atomic Energy Community's 7th Framework Programme (FP7-Fission-2013) under grant agreement N°605318

- Le design complet de l'injecteur et de la ligne de transport moyenne énergie (IPNO/CEA/IAP), en termes de dynamique du faisceau a été consolidé [30]. Il est présenté en Figure 8.

- _ Le prototypage d'un tronçon de RFQ (IAP) qui a permis de démontrer par l'expérience la faisabilité et la fiabilité de la technologie « 4-rod », grâce notamment à l'étude poussée de son système de refroidissement [31].

- _ Le design des cavités CH chaudes et supraconductrices. Un prototype de cavité CH a été réalisé et testé en cryostat vertical et a atteint un gradient accélérateur de 12 MV/m à 2K, ce qui est un record mondial. Un prototype de cavité CH chaud [32] sera lui testé avec un faisceau de protons de 2 mA à 2 MeV dans le cadre du projet FRANZ¹³. Ceci sera un très bon retour d'expérience pour MYRRHA.

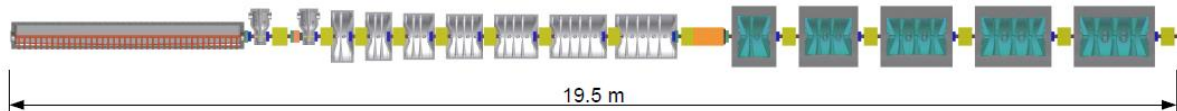


Figure 8: design de l'injecteur consolidé dans MAX. Il se compose d'un RFQ 4-Rod, de deux cavités groupeur, de sept cavités CH chaudes (en cuivre) et de cinq cavités CH-DTL supraconductrices.

5.2. Linac supraconducteur

La table 2 donne les caractéristiques du linac principal qui résulte des études de physique du faisceau effectuées par l'IPNO dans le cadre de MAX [30]. Cette architecture a été définie en respectant les règles connues de la physique des faisceaux intenses garantissant la stabilité [33]. Elle est basée sur l'utilisation de mailles régulières constituées de cryomodule relativement courts entre lesquels est intercalée une focalisation par doublets de quadripôles.

Table 2 : Caractéristiques du linac principal

Section #	#1	#2	#3
E_{input} (MeV)	17	81	184
E_{output} (MeV)	81	184	600
Technologie cavités	Spoke 2K	Elliptique 2K	
Fréquence RF. (MHz)	352.2	704.4	
Beta géométrique	0.35	0.47	0.65
Nb cellules / cavité	2	5	5
Focalisation	Doublets de quadripôles 300K		
Nb cav. / cryomodule	2	2	4
Nb total de cavités	48	34	60
E_{acc} nominal (MV/m)	6.2	8.2	11.0
Phase synchrone (deg)	-40 à -19	-38 à -15	
Charge faisceau / cav (kW)	1.5 à 7.5	2.5 to 17	14 to 32
Longueur (m)	68.6	63.9	100.8

La partie haute énergie de l'accélérateur linéaire (80 – 600 MeV) comporte deux familles de cavités supraconductrices de type elliptique fonctionnant sur le 4^{ème} harmonique (704.4 MHz). Ce choix technologique est assez classique pour une telle utilisation, comme en témoignent les choix similaires effectués pour diverses machines ou projets dans le monde. Pour la partie d'énergie intermédiaire (17 – 80 MeV), la technologie des cavités de type « Spoke » a été retenue, comme pour le projet ESS. La fréquence de fonctionnement est ici de 352.2 MHz et, pour une compatibilité maximale

¹³ the FRAnkfurt Neutron source at the SGZ

avec le système de « tolérance aux pannes », une cavité courte à 2 cellules a été choisie. Une forte activité de R&D est en cours depuis quelques années à l'IPN Orsay sur le développement de ce nouveau type de cavités. De premiers prototypes ont été testés avec succès à 4 K et 2 K en cryostat horizontal. Néanmoins, cette technologie est encore relativement peu mature et l'effort de R&D doit être poursuivi de manière intensive. C'est pour répondre à ce besoin que la conception détaillée du cryomodule Spoke de MYRRHA a été réalisée à l'IPN Orsay dans le cadre de MAX [34].

Par ailleurs l'IPN Orsay a aussi réalisé le test d'un prototype de cryomodule contenant une cavité elliptique $\beta=0,47$ [35]. Ces tests avaient pour premier but d'évaluer les performances de la cavité équipée de son coupleur de puissance et de son système d'accord en fréquence. Le champ accélérateur maximal atteint avant Quench a été mesuré à 14 MV/m : ce qui représente une marge suffisante pour l'opération de MYRRHA dans le cas nominal, mais aussi pour appliquer le schéma de compensation de panne. La faisabilité de cette méthode de compensation de panne et de re-réglage rapide d'une cavité a aussi été testée. Pour cela la boucle de régulation du signal RF (LLRF) et celle du système d'accord rapide (actionné par des éléments piézoélectriques) ont été développées et mises en œuvre [36]. Le changement de point de fonctionnement rapide de la cavité a été démontré expérimentalement à bas champ (< 4 MV/m). Néanmoins pour des champs plus élevés, de fortes instabilités ont été observées. Ces instabilités sont le résultat de l'excitation des modes microphoniques (résonance mécanique) en partie due à l'accroissement des forces de Lorentz lorsque le champ augmente rapidement dans la cavité. Ceci s'explique notamment par le fait que ce type de cavité (elliptique « bas β ») est intrinsèquement peu rigide et donc très sensible aux excitations mécaniques. D'après ces résultats, l'une des conclusions du projet MAX est d'envisager une solution alternative pour la section #2 du linac avec des cavités mécaniquement plus rigides : la cavité double Spoke de ESS est un excellent candidat.

Enfin des études de dynamique du faisceau primordiales ont été effectuées pour évaluer plus en détails la faisabilité des compensations de pannes (IN2P3) avec plusieurs cavités en panne dans le linac et même avec un cryomodule non-opérationnel (2 cavités successives en panne). Ces scénarios de compensation ont été pris en compte dans des simulations de dynamique du faisceau « start-to-end », incluant des études d'erreurs statistiques (CEA) du type Monte-Carlo, pour simuler au mieux le cas réel d'opération de la machine [37]. Ces simulations détaillées semblent confirmer que la compensation des pannes est faisable du point de vue de la dynamique du faisceau. Néanmoins, elles ont permis de mettre en avant que certains ajustements doivent être réalisés sur le design du linac. Bien que les pertes faisceau restent acceptables (< 1 W/m) dans ces simulations, les résultats montrent qu'il faudrait optimiser l'acceptance longitudinale du linac pour les minimiser. De plus le développement d'une méthode plus systématique pour la compensation des pannes des cavités est requis, et ceci en vue de mettre en œuvre un algorithme qui permettrait de réaliser ce re-réglage rapide pendant l'opération de la machine (des études pour l'ADS chinois ont aussi été réalisées dans ce sens [38]).

5.3. Autres activités

D'autres activités, non directement liés au design et au prototypage de l'accélérateur ont été réalisées au sein du projet MAX. Elles sont succinctement résumées ci-dessous.

- Le développement d'amplificateur RF « solid-state » à 700 MHz (TED) : cette technologie est très prometteuse pour améliorer la fiabilité de fonctionnement des systèmes RF.
- Le dimensionnement du système cryogénique pour le linac supraconducteur (ACS).

- L'étude préliminaire des bâtiments et du tunnel de l'accélérateur et de son implantation au SCK•CEN (EA).
- L'analyse détaillée et le retour d'expérience de l'opération de l'accélérateur GENEPI-3C [39] pour la machine GUINEVERE (LPSC): aspect de fiabilité et statistique des pannes, interfaces accélérateur/réacteur, « licensing », déroulement du commissioning, etc...
- La construction d'un « modèle de fiabilité » [40] préliminaire de l'accélérateur de MYRRHA (EA), en se basant sur l'expérience de SNS. Ce modèle permet d'estimer le taux de panne de l'accélérateur en fonction de la fiabilité de l'ensemble des sous-systèmes qui composent l'accélérateur. Cette étude a notamment montré qu'environ une douzaine de compensations de panne RF sont à prévoir par cycle opératoire de 3 mois. Pour atteindre la limite de 10 interruptions faisceau par cycle d'opération il faudra aussi envisager la mise en place de la redondance pour certains sous-systèmes : pompes, etc.

5.4. Bilan

Des activités importantes de R&D ont été menées au cours du projet MAX pour l'accélérateur de MYRRHA tout en apportant des résultats et le développement de nouveaux outils bénéfiques pour la communauté des accélérateurs. MAX a permis d'aboutir au design avancé de plusieurs éléments clés, en vue de la construction de prototypes.

L'IN2P3, a eu un rôle moteur dans ce projet, notamment au travers de L'IPNO qui a joué le rôle de coordinateur. Ceci est résumé par la table 3 suivante.

Table 3 : Ressources et budget pour le projet MAX

	Total (tous les partenaires)	CNRS/IN2P3	
		IPNO	LPSC
Personne.mois engagées sur toute la période	521	208	37
Financement européen dépensé (consommable effectif sans prendre en compte les coûts indirects)	552 k€	85 k€	4 k€
Financement IN2P3 sur la période		495 k€	

Enfin, il est important de préciser qu'à la mi-parcours du projet MAX une revue a été organisée par les collaborateurs du projet, afin de soumettre l'avancée des travaux à un comité d'experts du domaine. Le rapport complet avec les réponses apportées aux suggestions du comité se trouvent à la fin du document : *MAX_Deliverable1.5_FINAL_REPORT.pdf*. Pour résumer les conclusions de cette revue, le comité a émis un avis très positif et encourageant sur la philosophie adoptée pour le design de la machine et les outils développés notamment pour les calculs de dynamique du faisceau et le design des différents éléments. Il a toutefois mis en avant le fait que le planning pour la construction de la machine était très agressif compte tenu des ressources humaines impliquées sur les activités de R&D. Afin de s'assurer des choix technologiques effectués lors de la phase de design, le comité a aussi mis en avant le besoin d'entamer rapidement une phase de prototypage avancé en particulier pour l'injecteur.

6. R&D et projets européens : Le Projet MYRTE 2015-2019

Soutenu par le nouveau programme-cadre de recherche Horizon 2020 d'EURATOM, le WP2 du projet MYRTE (MYRRHA Research and Transmutation Endeavour) fait suite au projet MAX. L'objectif de ce projet est de continuer les travaux entrepris dans MAX en se

focalisant notamment sur la construction et le prototypage des premiers éléments de l'injecteur. Le projet est toujours coordonné par l'IN2P3 et il regroupe 13 partenaires européens. Ce sont les mêmes partenaires que dans le projet MAX à la différence près que l'INFN et FE-UCP se sont retirés et que l'on compte les arrivées de 5 nouveaux partenaires :

- l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN)
- COSYLAB, Slovénie
- Ion Beam Applications (IBA), Belgique
- Neue Technologien GmbH (NTG), Allemagne
- l'Université de Darmstadt, Allemagne

Le projet est divisé en 12 tâches dont 3 sont aussi coordonnées par des laboratoires de l'IN2P3. Ceci est résumé dans la table 4 ci-dessous.

Table 4 : Liste des tâches pour MYRTE WP2

Task #	Task description	Task leader
1	Realisation of a full-size MYRRHA-type RFQ demonstrator	IAP
2	Construction of a prototype Solid State RF power amplifier	IBA
3	Digital Low Level RF development	CNRS/IN2P3/IPNO
4	Beam diagnostics development	CEA
5	Control system development in a highly reliable accelerator context	Cosylab
6	Beam simulation code development, global coherence	CEA
7	Injector commissioning	SCK•CEN
8	Space-charge experiments	CNRS/IN2P3/LPSC
9	LINAC4 reliability analysis	CERN
10	MYRRHA SRF spoke R&D	CNRS/IN2P3/IPNO
11	SRF CH demonstration with beam	IAP
12	MYRRHA linac cost estimation	SCK•CEN

Le projet s'articule en fait autour de trois grands axes.

• **Les tâches relatives au développement de l'injecteur et à l'étude de sa faisabilité technologique.** Le but est ici de construire et d'étudier de façon détaillée l'injecteur de MYRRHA. De façon évidente, il est primordial d'accorder une grande importance à la construction et au test du RFQ (Tâche 2.1) en vue de son couplage avec la LEBT et de son installation en Belgique (Tâche 2.7). Ceci implique que tous les équipements auxiliaires nécessaires à l'opération du RFQ soient développés (prototypés) et opérationnels : les amplificateurs RF « solid-state » (Tâche 2.2) et le LLRF (Tâche 2.3).

• **La caractérisation du faisceau et son contrôle lors de la mise en œuvre de l'injecteur.** Il est en effet fondamental de comprendre et de mesurer le comportement du faisceau pour assurer son bon transport dans l'injecteur, et en particulier dans la LEBT, afin d'optimiser nos outils de simulation (Tâche 2.6) et la confiance que nous avons dans les résultats produits.

La Tâche 2.8 se focalise sur l'étude de la compensation de la charge d'espace dans la LEBT. Sa construction a été financée par le projet MARISA (Tâche 7.2) et par le SCK•CEN. Le LPSC a effectué la conception, la construction et la mise en œuvre de la ligne. L'exploitation de cette ligne est actuellement en cours (cf. Figure 9), et son transfert vers la Belgique est prévu en fin d'année 2016. De nombreuses campagnes expérimentales ont été collectées à ce jour et leur analyse est en cours. Ces résultats expérimentaux seront confrontés aux résultats obtenus avec des codes de simulations afin de comprendre plus en détails les phénomènes physiques qui interviennent dans le mécanisme de

compensation de la charge d'espace. Pour mesurer les propriétés du faisceau produit dans l'injecteur il est aussi nécessaire de disposer de diagnostics performants qui seront en partie développés dans le cadre de MYRTE (Tâche 2.4). Enfin cette première partie de l'injecteur (LEBT+RFQ) constituera une plateforme de test pour initier et éprouver le système de contrôle de l'accélérateur (Tâche 2.5). Ceci inclut notamment le développement d'un « accélérateur virtuel », un outil qui permet de réactualiser le modèle de l'accélérateur pendant son fonctionnement à partir des données mesurées : c'est un outil essentiel pour optimiser la fiabilité et l'opération du linac.

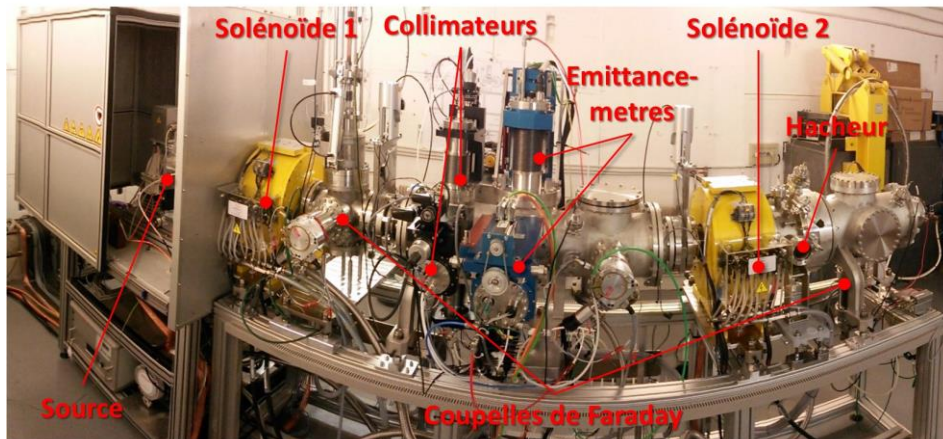


Figure 9 : la LEBT de MYRRHA installée au LPSC.

- **Les activités plus transverses en vue de la construction du linac** concernent notamment des activités de R&D sur les cavités CH (tâche 2.11). Le développement d'un cyomodule Spoke prototype est en cours, dans le cadre de la Tâche 2.10 menée par l'IPNO. Deux prototypes de cavités Spoke ont été construits et sont en cours de tests (cf. Figure 10). Ces prototypes seront notamment utilisés pour étudier plus en détails la préparation des cavités SRF afin d'optimiser leur performances et de mieux appréhender les phénomènes physiques limitant qui peuvent les dégrader (Cf. *Rapport de David Longuevergne et al., « R&D supraconductivité en régime RF »*). Dans ce cadre, des calculs du phénomène de multipacting dans les cavités Spoke sont menés au LPSC. Enfin de façon plus transverse les activités menées pour le développement d'un modèle de fiabilité sont poursuivies en se basant sur le retour d'expérience de LINAC4 au CERN (Tâche 2.9) et la tâche 2.12 est consacrée à l'estimation du coût de l'accélérateur de MYRRHA.



Figure 10 : Les deux prototypes de cavité Spoke pour MYRRHA ; Amelia (ZA01) et Virginia (ZA02).

Le projet MYRTE se terminera en 2019, il s'inscrit dans la suite logique de MAX en se focalisant sur une partie des activités de R&D nécessaires pour pouvoir envisager la construction de l'accélérateur.

Pour conclure cette partie, les implications de l'IN2P3 dans ce projet sont résumées par la table 5.

Table 5: Implications de l'IN2P3 dans le projet MYRTE

	Total (tous les partenaires)	CNRS/IN2P3	
		IPNO	LPSC
Personne.mois (p.m) initialement engagées sur la période	349	83	32
Financement européen attribué(consommables, équipements)	4 M€	184 k€	28 k€
Tâches avec une implication > 2p.m		2.3 - 2.4 - 2.6- 2.10	2.4 - 2.6 - 2.8 -2.10
Tâches avec une implication ≤ 2p.m		2.1 - 2.2 - 2.5 - 2.7- 2.12	

7. MYRRHA 100 MeV

Le projet MYRRHA a été lancé sur la base du concept de référence présenté dans la Partie 2. Récemment, plusieurs facteurs ont conduit à reprendre le design du réacteur (stress tests post Fukushima, dimensions importantes de la cuve et problématique de la contamination au polonium). Un cœur plus compact est actuellement en cours de conception. Parallèlement, le développement de l'accélérateur se poursuit par étape.

La première étape, nommée phase 1, comprend un injecteur, un linac supraconducteur pour des protons jusqu'à une énergie de 100 MeV et des stations expérimentales. Cette étape a pour but d'évaluer les performances du design de référence, en particulier pour les aspects de fiabilité. Les stations expérimentales pourront fournir des applications avec le faisceau de protons, même si le niveau de fiabilité attendu n'était pas atteint dans un premier temps. La phase 1 est structurée en 3 Work Packages :

- WP1.1: 100 MeV accelerator (R&D, design and construction),
- WP1.2: Balance of Plant for the 100 MeV project including licensing,
- WP1.3: Target station R&D, design and construction.

Le lancement de la phase 1 a été annoncé officiellement par le SCK•CEN à l'IN2P3 en janvier 2016, ainsi que son financement par le gouvernement belge. Le planning annoncé de la phase 1 pour les travaux accélérateur (WP1.1) est serré avec la construction de l'infrastructure prévue en 2022, puis les tests de fiabilité jusqu'en 2024 qui permettront alors de décider du lancement de l'intégralité de l'accélérateur. Dans ce cas, le linac complet jusqu'à une énergie de 600 MeV sera construit pour piloter le réacteur.

Pour mener à bien cette 1ère phase, il est nécessaire de terminer la conception du linac 100 MeV rapidement, à savoir d'achever les travaux de R&D restants et de produire le Technical Design Report pour pouvoir entamer la construction de l'installation. Dans ce contexte, le LPSC est sollicité pour la prise en charge de lots de travaux de R&D sur le linac 100 MeV.

Le linac 100 MeV comporte successivement (Figure 11):

- Un injecteur, tel que présenté en Figure 8. Il est toutefois envisagé de remplacer les cavités CH-DTL SRF par des cavités CH chaudes.
- Une ligne de moyenne énergie (MEBT) pour aiguiller et adapter le faisceau vers le linac supraconducteur
- Une section accélératrice formée de cavités de type Spoke (100 MeV).

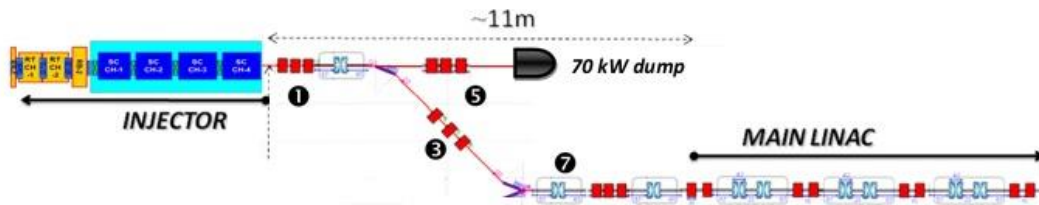


Figure 11: Schéma du linac 100 MeV de MYRRHA

Afin de mener à bien les travaux permettant de terminer la conception du linac 100 MeV et de produire le Technical Design Report, le SCK•CEN s'appuie sur les instituts ayant déjà contribué à différentes phases du projet (cf. §2). Pour l'IN2P3 les laboratoires concernés sont l'IPNO, LPSC, le LAL a aussi montré un intérêt ainsi que GANIL et l'IPHC. Pour ces trois derniers laboratoires les discussions sont en cours, leur éventuelle contribution est à définir.

On présente ici une première estimation des lots sur lesquels l'IPNO et le LPSC pourraient s'impliquer, en plus des activités déjà menées dans MYRTE. Une estimation des ressources est aussi présentée.

7.1. Implications du LPSC

Le LPSC propose de réaliser les 4 lots de travaux suivants :

- **Coupleurs de puissance**

Réalisation de 4 coupleurs de puissance prototype pour les cavités accélératrices supraconductrices de type Spoke. Le LPSC doit assurer le dimensionnement et le suivi de fabrication des coupleurs. Ces coupleurs seraient ensuite testés et conditionnés au LAL avant leur intégration dans le cryomodule Spoke de l'IPNO.

- **Accord à froid des cavités**

Réalisation d'un prototype de carte de contrôle d'actionneur piézoélectrique pour la boucle de régulation du système d'accord à froid des cavités supraconductrices qui sera ensuite testé par l'IPNO.

- **Aimants à commutation rapide**

Conception préliminaire des aimants de déviation du faisceau de protons à la fin de la MEBT.

- **Système de vide**

Définition des puissances de pompage nécessaires pour l'obtention du niveau de vide requis dans l'accélérateur

Les prévisions préliminaires des besoins en ressources humaines du LPSC pour ce projet sont listées dans la table 6 ci-dessous. En cas de difficultés, certaines ressources nécessaires pourraient être externalisées. Cette estimation a été présentée à la Cellule de Revue Technique de Projet du LPSC le 24 mai 2016 et le Conseil Scientifique du laboratoire examinera la participation du LPSC à la phase MYRRHA 100 MeV (le 4 juin 2016).

Table 6: estimation des ressources humaines LPSC pour MYRRHA 100 MeV

NOM	Temps de travail (en personness.mois)				Total	Type d'activité
	2016 semestre 2	2017 semestre 1	2017 semestre 2	2018 semestre 1		
IR et/ou CR	0.25	0.25	0.25	0.25	1	Responsabilité scientifique
IR	3.2	0.5	0.25	0.25	4.2	Responsabilité technique; Simulations thermiques et mécaniques
IR	0	0.9	0.9	0	1.8	Assurance produit
IR	2.4	1.2	0	0	3.6	Cahier des charges carte électronique Conception Test
AI	2.1	1.2	0	0	3.3	Software embarqué Software de contrôle & driver Test
IE ou AI	1.25	0.5	0	0	1.75	Conception Circuit Imprimés Suivi de fabrication CI
IR	1.05	0.15	0	0	1.2	Conception électronique analogique
cdd MECA ?	6.3	3.9	0	0	10.2	Conception
IR	4.32	1.68	0.96	0.48	7.44	Coordination Simulations RF, multipacting/dépôt CCTP, AO, suivi (coupleur, diagnostiques) Participation aux essais
IE	4.5	1.5	0	0	6	Coordination Modélisation magnétique Définition des contrôles de champ Procédures de démarrage ...
AI	3	3	0	0	6	Simulations système de vide
					46.49	

Soit un total de 46.5 personnes.mois sur 2 années (2 FTE sur 2 années), réparti en :

- 16 personnes.mois pour les services techniques du LPSC
- 20,5 personnes.mois pour le pôle accélérateurs et sources d'ions
- 10 personnes.mois en CDD mécanique

Les coûts, en totalité à la charge du SCK•CEN sont estimés dans la table 7. La partie équipement comprend notamment une estimation du budget pour la réalisation de 4 coupleurs de puissance (290 k€).

Table 7: estimation des coûts pour le LPSC.

Personnel :	39 301,00 €
Équipement :	348 800,00
Fonctionnement :	€
Missions :	0,00 €
Frais de gestion :	35 000,00 €
	20 000,00 €
Total :	443 101,00 €

7.2. Implications de l'IPNO

Dans le cadre du projet MYRRHA « 100MeV », une phase de prototypage est en cours d'élaboration en termes de propositions de R&D à mener sur une période de l'ordre de 2 à 3 ans. Une estimation des besoins en ressources humaines à l'IPNO est résumée par la table 8.

En l'état actuel des discussions, l'IPNO propose de prendre en charge un lot de travail qui consiste à développer et tester un cryomodule prototype équipé de deux cavités supraconductrices de type Spoke, associées aux différents systèmes nécessaires à leur

fonctionnement. Les principaux systèmes associés sont par cavité, un système d'accord à froid (SAF) pour l'asservissement en fréquence, un système d'asservissement du champ accélérateur (LLRF) et un coupleur de puissance RF. Pour les deux premiers, la conception et la réalisation de ceux-ci se fera en collaboration avec le LPSC, le LAL et l'entreprise ADEX. Pour les coupleurs de puissance RF, la conception sera de la responsabilité du LPSC avec un conditionnement en puissance réalisé par le LAL avant intégration par l'IPNO des coupleurs dans les cavités. Enfin des expérimentations longue durée permettront de tester l'ensemble du point de vue cryogénique, radiofréquence et ainsi que les procédures de re-réglage rapide pour la compensation de panne.

Dans le domaine des diagnostics de faisceau, l'IPNO est engagé sur la R&D des moniteurs de position du faisceau (BPM) dans le cadre de MYRTE avec la conception et la réalisation de deux prototypes de BPMs à 1.5 MeV. Nous proposons de poursuivre cette R&D avec des expérimentations sur le banc de test instrumentation (qui pourrait être développé par l'IPHC) installé derrière le RFQ. En parallèle, l'IPNO propose de concevoir un prototype pour la section moyenne énergie (17-100 MeV).

Concernant la dynamique du faisceau, l'IPNO a évoqué la possibilité de la prendre en charge à condition de bénéficier d'un CDD post-doc sur ce sujet. Ceci doit encore être discuté et dépendra de la répartition du travail entre les différents partenaires (en particulier le CEA).

Table 7: estimation des ressources pour l'IPNO .

Activités		Coût préliminaire (hors RH)	RH préliminaire
Cavités SPOKE	2 prototypes + tests@ 2K	260k€	5 p.m
Système d'accord à froid	4 prototypes + tests	160k€	20 p.m
Cryomodule	Cryomodule + BâV	505k€	14p.m + 7 p.m
2 Amplificateurs et réseau RF	Installation + tests en puissance	240k€	4 p.m
LLRF	2 exemplaires + distribution	80k€	46 p.m
C&C	pour tests	43k€	12 p.m
Expérimentation de l'ensemble	Condition normale @2K	55k€	37 p.m
Diagnostics LEBT : BPM	Tests avec faisceau sur BTI	5k€	3 p.m
Diagnostics MEBT : BPM	1 prototype	15k€	12 p.m
Dynamique Faisceau	Accélérateur	10k€	25 p.m
		1373 k€	185 p.m (~5 FTE/an)

En conclusion de cette partie, on notera bien que l'ensemble des chiffres présentés pour l'IPNO et le LPSC restent estimatifs et doivent encore être discutés avec le SCK•CEN, dans l'éventualité où l'IN2P3 s'impliquerait dans la phase 1 de MYRRHA.

8. Contributions scientifiques

Dans cette partie on recense (de façon non exhaustive) les contributions scientifiques, relatives à l'étude du linac de MYRRHA, pour lesquelles l'IN2P3 a été fortement impliqué.

8.1. Thèse de doctorat

- F. Bouly, *Etude d'un module accélérateur supraconducteur et de ses systèmes de régulation pour le projet MYRRHA*, Université Paris-sud XI, 2011.
- L. Lukovac, *Développement des technologies visant à optimiser la fiabilité des accélérateurs pilotant les réacteurs nucléaires hybrides dans le cadre du projet EUROTRANS*, Université Paris-sud XI, 2009.

- M. Souli, *Etude et développement d'un coupleur de puissance pour les cavités supraconductrices destinées aux accélérateurs linéaires de protons de haute intensité*, Université Paris-sud XI, 2007.

8.2. Contributions : articles et actes de conférences

- *Space Charge Compensation in Low Energy Beam Lines*, F. Gérardin et al., Proc. IPAC 2016.
- *Control System Developments for the MYRRHA Linac*, R. Modic, J.-L. ; Biarrotte, F. Bouly, D. Vandeplassche, Proc. IPAC 2016
- *The MYRRHA Spoke cryomodule design*, H. Saugnac et al., Proc. LINAC 14
- *Fault-tolerance and consequences in the MYRRHA superconducting linac*, F. Bouly et al., Proc. LINAC 14
- *Design Progress of the MYRRHA Low Energy Beam Line*, R. Salemme, F. Bouly et al., Proc. LINAC 14
- *Commissioning of the MAX 700 MHz test stand*, J.-L. Biarrotte et al., Proc. LINAC 14
- *Toward a Virtual Accelerator Control System for the MYRRHA linac*, J.-P. Carneiro et al., Proc. IPAC 2014
- *The Issue of Accelerator Beam Trips for Efficient ADS Operation*, G. Rimpault et al., ANS Nuclear Technology, 184:2 (2013), p. 249-260
- *Design of the MYRRHA 17-600 MeV Superconducting linac*, J.-L. Biarrotte et al., Proc. SRF 2013
- *Developments and Tests of a 700 MHz Cryomodule for the Superconducting Linac of MYRRHA*, F. Bouly, M. El Yakoubi et al., Proc. SRF 2013
- *Beam operation aspects for the MYRRHA linear accelerator*, J.-L. Biarrotte et al., Proc. TC-ADS 2013
- *Approach of a Failure Analysis for the MYRRHA Linac*, J.-P. Carneiro, Proc. TC-ADS 2013
- *Superconducting RF cavities activities for the MAX Project*, M. El Yakoubi et al., Proc. TC-ADS 2013
- *The R&D@UCL program in support of the MYRRHA linear accelerator*, R. Salemme et al., Proc. TC-ADS 2013
- *Thorium energy futures*, S. Peggs et al., Proc. IPAC 2012
- *The MYRRHA linear accelerator*, D. Vandeplassche et al., Proc. IPAC 2011
- *High energy beam line design of the 600 MeV 4 mA proton linac for the MYRRHA facility*, H. Saugnac et al., Proc. IPAC 2011
- *Reliability and current-adaptability studies of a 352 MHz, 17 MeV, continuous-wave injector for an accelerator-driven system*, Zhang, C. et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 080101 (2010)
- *Accelerator Reference Design for the MYRRHA European ADS Demonstrator*, J-L Biarrotte et al., Proc. LINAC 2010
- *Low Level Radio-frequency Developments toward a Fault-tolerant Linac Scheme for an Accelerator Driven System*, F. Bouly, Proc. LINAC 2010
- *Developments and Test of a 700 MHz Prototypical Cryomodule for the MYRRHA ADS Proton Linear Accelerator*, F. Bouly, Proc. LINAC 2010
- *Accelerator reference design for the European ADS demonstrator*, J-L Biarrotte et al., Proc. TC-ADS 2010
- *Developments of 350 MHz and 700 MHz prototypical cryomodules for the EUROTRANS ADS proton linear accelerator*, F. Bouly, S. Bousson et al., Proc. TC-ADS 2010
- *Construction of a 700 MHz Prototypical Cryomodule for the EUROTRANS ADS Proton Linear Accelerator*, F. Bouly et al., Proc. SRF 2009
- *Accelerator R&D for the European ADS demonstrator*, J-L Biarrotte et al., Proc. PAC 2009
- *Dynamic compensation of an RF cavity failure in a superconducting linac* J-L. Biarrotte, D. Uriot, Phys. Rev. ST Accel. Beams 11, 072803 (2008)
- *Design of the prototypical cryomodule for the EUROTRANS superconducting linac for nuclear waste*, S. Bababnotti et al., Proc. EPAC 2008
- *R&D activities around the Eurotrans accelerator for ADS applications*, J-L. Biarrotte, A.C. Mueller, Proc. ICENES 2007
- *Status of the Eurotrans R&D activities for ADS accelerator development*, J-L Biarrotte et al., Proc. HPPA 2007
- *Accelerator design for ADS*, J-L Biarrotte et al., Proc. ICANS 2007
- *A reference accelerator scheme for ADS applications*, J-L Biarrotte et al., Nuclear Instruments and Methods A 562 (2006) 565-661
- *A European advanced technology programme for ADS accelerator development*, J-L Biarrotte et al., Proc. SRF 2005
- *Beam dynamics studies for the fault tolerance assessment of the PDS-XADS linac design*, J-L Biarrotte et al., Proc. EPAC 2004
- *Beam dynamics studies for the fault tolerance assessment of the PDS-XADS linac design*, J-L Biarrotte et al., Proc. HPPA 2004
- *A European roadmap for developing ADS for nuclear waste transmutation*, collectif, 2001

9. Conclusions

Après une dizaine d'années de recherches et de développements, la solution de référence pour l'accélérateur de type ADS a été clairement identifiée. Le concept retenu est un accélérateur linéaire supraconducteur à fonctionnement continu (CW), composé d'un double injecteur redondant et compact, suivi d'une longue structure modulaire de cavités accélératrices supraconductrices ayant un fort potentiel de tolérance aux pannes.

Le principal défi à relever lors de la conception, la construction et la mise au point de l'accélérateur ADS est / sera le défi de sa fiabilité qui, exprimée en termes de nombre de pannes faisceau par unité de temps, est très au-delà des performances actuelles opérationnelles de ce type de machines. Pour cela, les activités de R&D lors de la phase de conception sont principalement focalisées sur cette thématique, à la fois du point de vue théorique (simulations avancées de l'optique des faisceaux en régime d'erreurs ou de pannes, modélisations de la fiabilité de l'accélérateur...) et du point de vue de l'implantation technologique (conception détaillée, prototypage et test de certains éléments clés).

Des activités de R&D primordiales en vue de la construction de MYRRHA ont été et sont menées au travers de projets européens (MAX, MARISA, MYRTE). L'IN2P3 joue un rôle de premier ordre au sein de ces projets. Cela a notamment permis de former des personnes dans le domaine, mais aussi d'acquérir de nouvelles compétences dans l'institut tout en apportant des résultats et le développement de nouveaux outils/concepts bénéfiques pour la communauté des accélérateurs (cf. Partie 8 : Contributions scientifiques).

Le lancement de la phase 1 de MYRRHA (100 MeV) est une excellente opportunité pour l'IN2P3 de participer à la construction d'un grand instrument basé sur des concepts novateurs, tout en apportant et en continuant à développer son expertise dans le domaine des accélérateurs de particules. Nous avons proposé, à la fin de ce rapport, des lots de R&D pour lesquels l'IN2P3 pourrait s'impliquer, en estimant les ressources nécessaires pour mener à bien ces travaux.

Toutefois, cela reste une première estimation, et l'implication de l'institut dépend aussi de la façon dont le SCK•CEN souhaite coordonner le projet et de l'orientation qu'il souhaite lui donner.

Références

- [1] OECD Nuclear Energy Agency, Nuclear Energy Data 2015, Paris: OECD/NEA PUBLISHING, 2015.
- [2] Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, «Nucléaire et politique énergétique», 4 septembre 2015. [En ligne]. Available: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Nucleaire-et-politique-energetique.html>. [Accès le 19 avril 2016].
- [3] Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs, «Les déchets Radioactifs - Les volumes de déchets», 30 juillet 2015. [En ligne]. Available: <http://www.andra.fr/pages/fr/menu1/les-dechets-radioactifs/les-volumes-de-dechets-11.html>. [Accès le 19 avril 2016].
- [4] OCDE Agence pour l'énergie Nucléaire, Comprendre les attentes de la société dans la gestion des déchets radioactifs et s'y adapter, Paris: Les éditions de L'OCDE, 2006.
- [5] *LOI n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs*.
- [6] T. Chevret, J. Lecouey, N. Marie, F. Lecolley, G. Lehaut et al., «Reactivity Measurement of the Lead Fast Subcritical VENUS-F Reactor Using Beam Interruption Experiments», *PHYSOR2014 - The Role of Reactor Physics towards a Sustainable Future*, kyoto, Japan, 2014.
- [7] M. Baylac et al., «Operation of the Versatile Accelerator Driving the Low Power ADS GUINEVERE at SCK•CEN», *Proceedings of LINAC2014, TUPP100*, Geneva, Switzerland, 2014.
- [8] Sustainable Nuclear Energy Technology, *Strategic Research Agenda*, 2009.
- [9] A. Barbensi et al., «EFIT, The European Facility for Industrial Transmutation of Minor Actinides», *Proceedings of Acc'App 2007*, Pocatello, Idaho, USA, 2007.
- [10] OECD Nuclear Energy Agency, «Utilisation and Reliability of High Power Proton Accelerators workshop proceedings- Summary of working group discussion on Accelerators», *HPPA 2002*, Santa Fe, New Mexico, USA, May 2002.
- [11] G. Rimpault et al., «The Issue of Accelerator Beam Trips for Efficient ADS Operation», *Nuclear Technology*, vol. 184, n° 12, pp. 249-260, 2013.
- [12] H. Ait Abderrahim et al., «Accelerator and target technology for accelerator driven transmutation and energy production», DOE white paper on ADS technology, September 2010.
- [13] D. Vandeplassche et al., «Accelerator Driven Systems», *Proceedings of IPAC12*, New Orleans, Louisiana, USA, 2012.
- [14] L. Burgazzi, P. Pierini, «Reliability studies of high power proton accelerator», *Reliability Engineering and Systems Safety*, vol. 92, n° 1449-463, 2007.
- [15] Spallation Neutron Source, «Spallation Neutron Source Project Completion Report», June 2006.
- [16] M. Lindroos, C. Oygon et S. Peggset al. «The ESS Superconducting Linear Accelerator», *Proceedings of 14th International conference on RF Superconductivity (SRF09)*, Berlin, Germany, September 2009.
- [17] R. Ferdinand et al., «The SPIRAL 2 Superconducting Linac», *Proceedings of LINAC2008*, Victoria, Canada, 2008.
- [18] W. Pan et al., «Chines ADS project and proton accelerator development», *Proceedings of LINAC2012*, Tel-Aviv, Israel, 2012.
- [19] J.-L. Biarrotte et D. Uriot, «Dynamic compensation of an RF cavity failure in a superconducting linac», *Physical review ST : Accelerators & Beams*, vol. 11, n° 72803, 2008.
- [20] F. Bouly, J.-L. Biarrotte et D. Uriot, «Fault Tolerance and Consequences in th MYRRHA Superconducting Linac», *Proceedings of LINAC2014*, Geneva, Switzerland, 2014.
- [21] F. Bouly, Etude d'un module accélérateur supraconducteur et de ses systèmes de régulations pour le projet MYRRHA, Orsay, France: Thèse de doctorat de l'Université Paris Sud 11, 2011.
- [22] J. Galambos, S. Henderson, A. Shislo et Y. Zhang, «Operationnal Experience of a Superconducting Cavity Fault Recovery System at the Spallation Neutron Source», *5th Workshop on Utilisation and Reliability of High Power Proton Accelerators*, Mol, Belgium, May 2007.
- [23] Y.-L. Chi et Y. He, «The present status of the chinese ADS proton accelerator R&D», *Proceedings of the Technology and components of Accelerator-driven Systems*, Nantes, France, May 2013.
- [24] J.-L. Biarrotte, «High Power Proton/Deuteron Accelerators», *Proceedings of SRF 2013*, Paris, France, 2013.
- [25] M. Seidel et al., «Production of a 1.3 MW proton beam at PSI», *Proceedings of the IPAC2010*, Kyoto, Japan, 2010.

- [26] J. Galambos, «SNS Performance and the Next Generation of High Power Accelerators», *Proceedings of NA-PAC2013, FRYAA1*, Pasadena, CA USA, 2013.
- [27] Y. Zhang et al., «Transverse beam resonance in the superconducting linac of the Spallation Neutron Source», *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, vol. 13, p. 044401, 2010.
- [28] C. Darve et al., «The ESS Superconducting Linear Accelerator,» chez *Proceedings of SRF2013*, Paris, France, 2013.
- [29] «Site internet du projet MAX», [En ligne]. Available: <http://ipnwww.in2p3.fr/MAX/>.
- [30] «MAX Deliverable 1.2. Disponible sur demande.».
- [31] «MAX Deliverable 2.4.».
- [32] «MAX Deliverable 2.3.».
- [33] R. Duperrier et al, «Review of iInstability Mechanisms in Ion Linacs», *Proceedings of ICFA-HB*, Morschach, Switzerland, 2010.
- [34] «MAX Deliverable 3.3. Disponible sur demande.».
- [35] «MAX Deliverable 3.1. Disponible sur demande.».
- [36] «MAX Deliverable 3.2.».
- [37] «MAX Deliverable 1.4. Disponible sur demande.».
- [38] Z. Xue, «A New Fault Recovery Mechanism for Superconducting Cavity Failure in C-ADS,» chez *Proceedings of IPAC2016, MOPMB032*, Busan, Korea, 2016.
- [39] «MAX Deliverable 4.3. Disponible sur demande.».
- [40] «MAX Deliverable 4.4. Disponible sur demande.».