

ADS - Rapport 2012

Annexe «Les accélérateurs pour les ADS »

J-L. Biarrotte, 30/11/2012

Sommaire

1. Introduction	2
2. Besoins ADS en termes de faisceaux.....	2
3. Concept de l'accélérateur ADS	5
4. Activités de R&D sur l'injecteur	7
5. Activités de R&D sur le linac principal.....	8
6. Conclusions et perspectives	10
Références	11

Les accélérateurs pour les ADS

1. Introduction

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 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 opérer d'une manière extrêmement fiable, puisqu'un nombre restreint d'interruptions faisceau par an sera toléré.

Le design conceptuel d'un tel type d'accélérateur est en cours de développement depuis environ 10 ans. Ces activités ont été / sont coordonnées par le CNRS/IN2P3 IPN Orsay au niveau européen à travers les projets EURATOM des programmes cadres successifsⁱ et soutenues par le Programme Interdisciplinaire de Recherche du CNRS sur l'aval du cycle électro-nucléaireⁱⁱ. Ces travaux préconisent l'utilisation d'une solution basée sur un accélérateur linéaire supraconducteur, permettant d'obtenir une machine efficace et surtout très modulaire avec un grand potentiel en termes de fiabilité [1].

Depuis 2011 et le lancement du projet MAXⁱⁱⁱ [2], soutenu par le 7^{ème} programme cadre d'EURATOM, ces études se focalisent essentiellement sur le cas de l'accélérateur pour le projet de démonstrateur ADS du SCK•CEN belge : MYRRHA^{iv} [3]. L'objectif principal du projet MAX est d'apporter un soutien scientifique et technique aux activités de conception et de R&D pour le futur accélérateur de MYRRHA, pour en fournir en 2014 un design consolidé avec un niveau de détails suffisant pour pouvoir démarrer en 2015 une éventuelle phase d'avant-projet détaillé puis de construction.

2. Besoins ADS en termes de faisceaux

L'énergie du faisceau de protons pilotant un réacteur ADS doit typiquement être de l'ordre du GeV. Cette valeur est issue d'un compromis dicté par différents critères. L'énergie des protons doit être suffisamment élevée pour optimiser l'efficacité de la réaction de spallation^v, 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 EUROTRANS donnent ainsi les énergies de référence suivantes (cf. Table 1) : 600 MeV pour le démonstrateur MYRRHA et

ⁱ FP5 : PDS-XADS, FP6 : EUROTRANS, FP7 : MAX.

ⁱⁱ Programme NEEDS (anciennement PACEN).

ⁱⁱⁱ MAX: MYRRHA Accelerator eXperiment R&D programme

^{iv} MYRRHA : Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications

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

800 MeV pour la version prototype industrielle baptisée EFITⁱ [4]. A noter pour mémoire que le projet de prototype industriel japonais du JAEAⁱⁱ a une énergie de référence de 1.5 GeV.

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 puissance faisceau moyenne de 16 MW. En l'état actuel de la technologie, la seule 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 [5].

En l'état actuel du projet, l'ADS MYRRHA est conçu pour remplir les objectifs suivants:

1. démontrer la faisabilité de la technologie ADS à une puissance significative, ainsi que la transmutation effective des déchets radioactifs à vie longue de façon expérimentale;
2. servir de réacteur d'irradiation à spectre rapide et à haut flux ($\Phi_{>0.75\text{MeV}} = 10^{15} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$);
3. 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 [6], sans pour cela compromettre les 2 objectifs précédents.

MYRRHA est un réacteur flexibleⁱⁱⁱ d'environ 80 MW_{th} refroidi au plomb-bismuth. En mode sous-critique, la source externe de neutrons est fournie, via spallation directe sur le métal liquide, par un faisceau de protons à travers une fenêtre d'isolation. Les caractéristiques principales de ce faisceau de protons 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 supérieures à quelques secondes pourraient, si fréquemment répétées, induire des contraintes thermiques inacceptablement 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.

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, et est en grande partie inspirée de l'analyse opératoire du réacteur PHENIX [7]. D'autres études au Japon ou aux Etats-Unis [e.g. 8] 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

ⁱ EFIT : European Facility for Industrial Transmutation.

ⁱⁱ JAEA : Japan Atomic Energy Agency.

ⁱⁱⁱ Sa configuration lui permet d'être capable d'être opéré en mode sous-critique et en mode critique.

matériaux irradiés, aux aspects d'érosion et de corrosion en environnement plomb-bismuth, aux procédures de redémarrage du réacteur, etc..

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 SNSⁱ. Cette importante différence est illustrée sur la Figure 1 [9], et montre que la fiabilité est bel et bien le défi n°1 pour l'accélérateur de MYRRHA.

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 ⁱⁱ), avec périodiquement de courtes interruptions faisceau (~200µs) pour un monitoring en ligne de la sous-criticité	

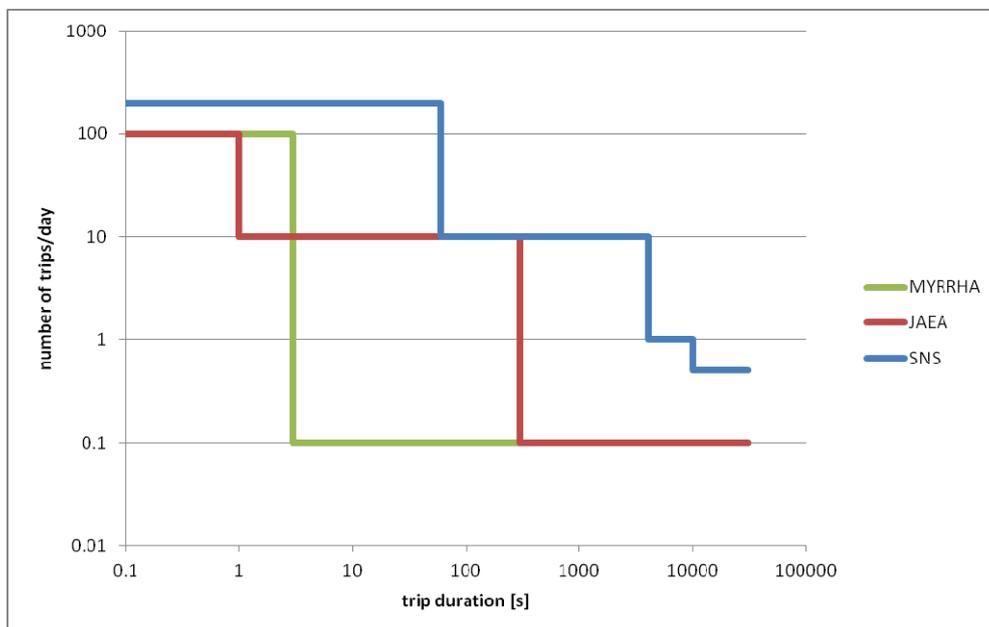


Figure 1 : Fréquence des interruptions/pannes faisceau en fonction de leurs durées : enregistrées à SNS, acceptées par l'ADS japonais (JAEA), acceptées par MYRRHA.

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

ⁱⁱ CW: Continuous Wave

3. Concept de l'accélérateur ADS

La contrainte de fiabilité de l'accélérateur ADS peut être reformulée de la façon suivante : le temps moyen de fonctionnement entre deux pannes (MTBFⁱ) 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 facilement montrer [10] que dans une telle configuration, 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. 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 (MTTRⁱⁱ) 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 méritera une attention continue au cours de toute la phase de conception détaillée.

Le concept clé permettant de mettre en œuvre le concept de « tolérance aux pannes » dans l'accélérateur ADS est la redondance. La redondance parallèle, communément utilisée, utilise 2 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 ainsi identifiés comme suit :

1. utilisation des composants loin de leurs limites technologiques;
2. insertion de redondances – de série si possible – dans les secteurs clé 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 amène à adopter une solution technique basée sur l'utilisation d'un accélérateur linéaire (linacⁱⁱⁱ) supraconducteur, ce qui est d'ailleurs en accord avec plusieurs projets d'accélérateurs de forte puissance, en fonctionnement, en construction ou en projet [11,12,13,14]. L'opération de MYRRHA en mode continu (CW) et avec un courant crête somme toute très modéré (4 mA) renforce ce choix basé sur la supraconductivité, d'autant que les performances des cavités accélératrices supraconductrices RF^{iv} sont aujourd'hui suffisamment élevées pour envisager l'adoption de marges très confortables sur les points de fonctionnement. D'autre part, l'architecture d'un accélérateur linéaire supraconducteur, constitué d'une séquence modulaire de cavités RF à peu près identiques, est en excellent accord avec le concept de redondance en série. Par exemple, afin d'implémenter le concept de « tolérance aux

ⁱ MTBF : Mean Time Between Failures

ⁱⁱ MTTR : Mean Time To Repair

ⁱⁱⁱ linac : linear accelerator

^{iv} RF : Radio-Fréquence

pannes » dans le cas des cavités RF, dont les systèmes d'alimentation sont une des causes principales de panne faisceau, il suffit alors de s'arranger pour : (i) pouvoir régler l'amplitude et la phase de chaque cavité individuelle de façon indépendante, (ii) assurer une dynamique des faisceaux flexible, tolérant facilement la présence d'une cavité inactive et le re-réglage rapide en phase et tension des cavités adjacentes. Plusieurs études ont déjà été effectuées sur ces aspects, donnant la certitude de la faisabilité théorique d'un tel re-réglage [15,16]. De telles procédures ont d'ailleurs été depuis partiellement testées avec succès au SNS [17].

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

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 4 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 2 injecteurs complets très compacts ayant des capacités de commutation rapide.

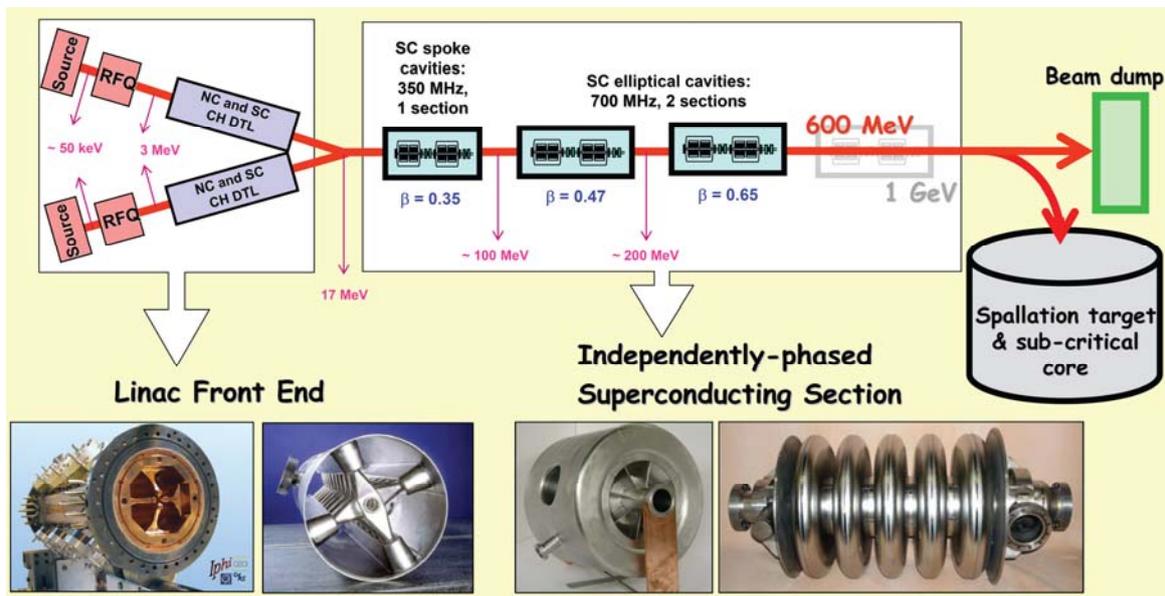


Figure 2 : Schéma conceptuel de l'accélérateur ADS Européen, appliqué au cas de MYRRHA (le concept est facilement extensible jusqu'à par exemple 1 GeV pour un ADS industriel). Les photos de gauche à droite représentent : un RFQⁱ en cuivre, et des cavités supraconductrices de type CHⁱⁱ, Spoke et Elliptique.

Les chapitres suivants décrivent de façon plus détaillée les principales caractéristiques techniques de chaque partie dans le cas de l'accélérateur pour le démonstrateur MYRRHA.

ⁱ RFQ : Radio-Frequency Quadrupole

ⁱⁱ CH : Crossbar H-mode

4. Activités de R&D sur l'injecteur

La philosophie adoptée pour la conception de l'injecteur 0 – 17 MeV de MYRRHA, et pour celle d'un ADS de façon générale, est d'optimiser l'efficacité d'accélération de cette partie afin de minimiser le nombre de composants susceptibles de subir une panne, tout en conservant des points de fonctionnement très conservatifs. Pour ce faire, cet injecteur, en l'état actuel des études de conception, est basé sur des solutions technologiques relativement novatrices, développées essentiellement par l'Institut de Physique Appliquée (IAP) de l'Université de Francfort, en Allemagne.

Un tel injecteur est basé sur les éléments suivants (cf. Figure 3).

- Une source de protons de type ECRⁱ, qui s'est avéré être un choix technologique très fiable comme en témoignent les résultats obtenus par la source SILHI au CEA Saclay [18] par exemple.
- Une ligne de transport magnétique de basse énergie (LEBTⁱⁱ) à 30 keV, avec deux solénoïdes et un hacheur électrostatique.
- Un RFQ en cuivre fonctionnant à des tensions très conservatrices de 40 kV (facteur de Kilpatrick : 1.0) ; long d'environ 4 mètres, il permet de mettre le faisceau en paquets et de l'accélérer jusqu'à 1.5 MeV.
- Un « booster » basé sur la technologie peu conventionnelle des structures CH [19]. Ce booster comprend notamment 2 cavités accélératrices en cuivre puis 4 cavités accélératrices supraconductrices regroupées en un cryomodule, pour une accélération jusqu'à 17 MeV.

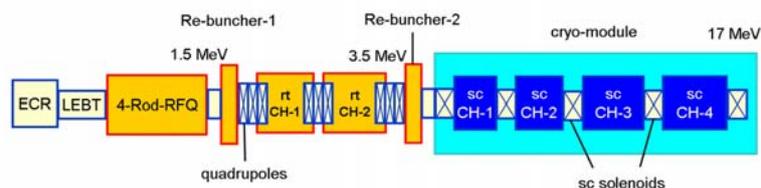


Figure 3 : Schéma conceptuel de l'injecteur 17 MeV pour MYRRHA (longueur totale : environ 15 mètres).

Dans ce schéma très efficace à base de cavités multi-cellules, le profil de vitesse du faisceau est figé par conception, rendant toute procédure de « récupération de panne » inenvisageable. Pour parer à toute éventualité et optimiser le niveau de fiabilité, la stratégie est donc ici de dupliquer cet injecteur afin de pouvoir disposer d'un injecteur de secours en ligne, près à prendre le relai en cas de défaillance de l'injecteur principal. Les 2 injecteurs sont connectés par une ligne de faisceau à double branche comportant notamment un dipôle de déviation à commutation rapide et quatre cavités de regroupement.

Une forte activité de R&D est menée pour le développement d'un tel injecteur, avec notamment des études de dynamique des faisceaux et des réalisations de cavités prototypes. Une première version de cet injecteur à une fréquence de 352.2 MHz, développée dans le cadre du projet EUROTRANS, a été décrite dans [20]. Dans le cadre de MAX, le design a été consolidé [21], avec notamment un passage à une fréquence plus basse de 176.1 MHz permettant d'apporter certains avantages décisifs comme des dissipations de puissance réduites ou la possibilité de considérer l'option technologique

ⁱ ECR : Electron Cyclotron Resonance

ⁱⁱ LEBT : Low Energy Beam Transport

4 barres pour le RFQ. Les prototypages des différents éléments, RFQ [22], cavités CH [23,24], sont menés par l'IAP Francfort et montrent dès à présent des résultats très prometteurs. La prochaine étape, menée par le SCK•CEN, consistera à construire l'injecteur de MYRRHA à échelle 1 au laboratoire UCL de Louvain-la-Neuve ; un tel injecteur prototype, composé dans un premier temps d'une source ECR commerciale, d'une LEBT et d'un RFQ de 1.5 MeV, devrait pouvoir fournir du faisceau dès l'horizon 2015. En parallèle, les activités de R&D générique sur les injecteurs de protons de très haute intensité et sur leur fiabilité se poursuivent autour du projet IPHIⁱ [25], développé conjointement par le CEA Saclay et le CNRS/IN2P3. Après de nombreuses difficultés techniques, la construction des tronçons de ce RFQ de 100 mA est à présent achevée, et la mise en service de l'expérience est attendue en 2013.

5. Activités de R&D sur le linac principal

Dans le schéma ADS de référence, un accélérateur linéaire supraconducteur entièrement modulaire accélère le faisceau de protons depuis 17 MeV jusqu'à l'énergie finale ; dans le cas de MYRRHA (600 MeV), la longueur totale de cette section est d'environ 230 mètres (cf. Figure 4).

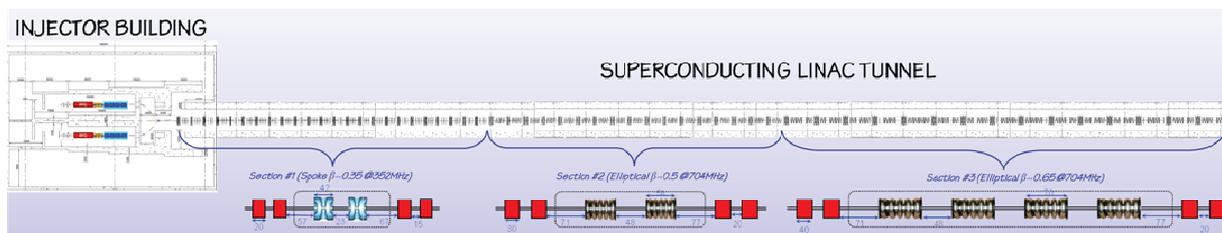


Figure 3 : Agencement de l'accélérateur 600 MeV pour MYRRHA (à l'échelle).

Ce linac principal est composé d'un ensemble de cavités RF supraconductrices de 3 types différents, alimentées de façon indépendante, très acceptantes en énergie, et opérées à des gradients accélérateurs très conservateursⁱⁱ. L'objectif est ici d'augmenter autant que possible la flexibilité de réglage et d'offrir des marges suffisantes sur les points de fonctionnement (environ 25 à 30%) pour assurer la mise en œuvre de la capacité de « tolérance aux pannes » par redondance série. Comme évoqué précédemment, cette capacité est incontournable pour atteindre le niveau de fiabilité requis, et doit être démontrée expérimentalement. Pour cela, un « scénario de récupération rapide de pannes en ligne » de référence a été défini dans le cas par exemple d'un défaut de la boucle d'alimentation d'une cavité accélératrice ; ce scénario consiste à arrêter le faisceau pendant une seconde, tout en effectuant un re-réglage des éléments adjacents [26]. Une telle procédure devrait être prochainement testée expérimentalement à l'aide d'un prototype de cryomodule accélérateur 700 MHz développé spécifiquement à l'IPN Orsay [27]. Ce module, qui contient une cavité elliptique supraconductrice conçue par l'INFN (5 cellules, β 0,47) et qui sera alimenté par une source RF 80 kW CW, est actuellement en phase de mise en service.

L'architecture détaillée du linac principal de MYRRHA, telle que définie par l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay (IPNO) du CNRS/IN2P3, est résumée en Table 2. Ce schéma, défini en respectant les règles connues de la physique des faisceaux intenses garantissant la stabilité [28], est basé sur

ⁱ IPHI : Injecteur de Protons de Haute Intensité

ⁱⁱ Les champs magnétiques et électriques de surface dans les cavités supraconductrices sont pour cela limités à environ 50 mT et 25 MV/m en fonctionnement nominal.

l'utilisation de mailles régulières constituées de cryomodules relativement courts entre lesquels est intercalée une focalisation par doublets de quadrupôles. Un tel système présente plusieurs avantages : facilité de maintenance, alignement plus simple à température ambiante, nombreux emplacements pour diagnostiquer le faisceau, et, point important, une régularité optique quasi-parfaite permettant de minimiser le potentiel de désadaptation du faisceau.

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. La fréquence de fonctionnement est ici de 352.2 MHz et, pour une compatibilité maximale 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 4K et 2K en cryostat horizontal, entièrement équipés de leur système d'accord, blindage magnétique, coupleur de puissance RF, et alimentés par un amplificateur 10 kW de type « solid-state » [29]. 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 le cryomodule Spoke MYRRHA est actuellement en phase de conception détaillée à l'IPN Orsay dans le cadre du projet MAX, avec un possible prototypage d'un module « tête de série » dans les années à venir.

Table 2 : Caractéristiques du linac principal de MYRRHA

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 quadrupôles 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

En sortie du linac principal, le faisceau de protons est enfin conduit et injecté sur la cible de spallation à l'intérieur de la cuve du réacteur, au centre du cœur. Cette ligne de faisceau (cf. Figure 4 [30]) est constituée de trois aimants dipolaires formant un système doublement achromatique afin de garantir la stabilité du faisceau sur la cible, et incluant des propriétés télescopiques pour en faciliter la mise au point. Elle abrite également des aimants AC permettant un balayage du faisceau homogénéisant la densité de puissance au niveau de la fenêtre chaude. En marge de cette ligne d'injection, une ligne de transport supplémentaire permet de conduire le faisceau issu du linac sur un bloc d'arrêt capable de recevoir la puissance totale (2.4 MW), élément indispensable pour les phases de réglage et d'optimisation de la fiabilité de la machine.

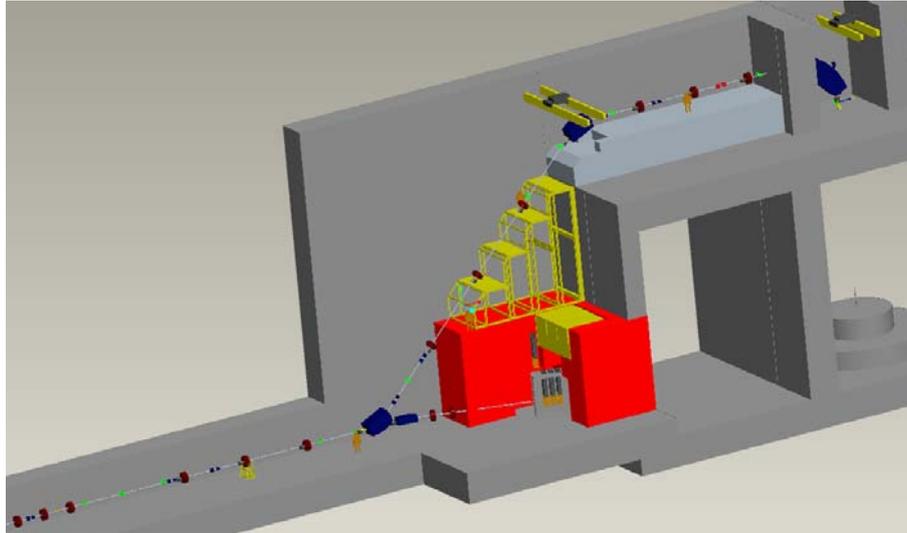


Figure : Agencement des lignes haute-énergie pour MYRRHA.

La conception de cette ligne d'injection est en cours de consolidation, en prenant en compte les problématiques de sûreté à l'interface avec le réacteur. Des études d'erreurs préliminaires de type Monte-Carlo montrent notamment que le très long espace de glissement final (27 mètres) à travers le hall réacteur rend la ligne très sensible aux vibrations et aux instabilités du faisceau, soulignant l'importance cruciale de la présence d'un système fiable de diagnostic du faisceau sur cible. Un tel système pourra par exemple s'inspirer du détecteur optique VIMOS développé à PSI [31].

6. Conclusions et perspectives

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 clé). Actuellement et jusqu'en 2014, ces études sont essentiellement menées dans le cadre du projet MAX, projet soutenu par le 7^{ème} programme cadre d'EURATOM et coordonné au niveau européen par le CNRS/IN2P3 IPN Orsay.

Afin de démontrer complètement la faisabilité expérimentale de l'accélérateur ADS, la poursuite dans les années à venir de ces activités de R&D axées fiabilité est nécessaire. Parmi les thèmes prioritaires, on peut notamment citer la démonstration expérimentale de la technologie novatrice de l'injecteur, la validation par prototypage des 3 concepts de cryomodules constituant le linac principal

et de ses sources de puissance RF associées, les études liées à la sûreté de l'interface réacteur (collimation du faisceau, fenêtre froide...) et à l'instrumentation du faisceau (monitoring sur cible, mesure de longueur de paquets...), ou le développement d'un concept de système de contrôle et commande fiable et intelligent (détection des pannes, gestion des procédures de compensation...).

Dans ce contexte, la construction d'un démonstrateur d'ADS, comme le prévoit à partir de 2015 le projet MYRRHA, peut clairement être considérée comme une opportunité unique à saisir. Au-delà de son rôle d'irradiateur de recherche à spectre rapide, un tel réacteur pourrait en effet permettre :

- d'une part, à la communauté EURATOM d'extrapoler l'expérience acquise lors de la construction et la mise en service d'un tel démonstrateur à la conception d'un brûleur de déchets industriels, et d'évaluer de façon optimale la viabilité d'un scénario de transmutation des actinides mineurs de type double strate ;
- d'autre part, en reprenant les solutions adoptées pour l'accélérateur, d'apporter un impact substantiel à la fiabilité de tous les projets d'accélérateurs émergents et futurs.

Références

- [1] J-L. Biarrotte, A.C. Mueller et al., "A reference accelerator scheme for ADS applications", Nucl. Instr and Meth. in Phys. Res. A 562 (2006), pp. 565–661.
- [2] See MAX website <http://ipnweb.in2p3.fr/MAX/>
- [3] See MYRRHA website <http://myrrha.sckcen.be/>
- [4] A. Barbensi et al., "EFIT, the European Facility for Industrial Transmutation of Minor Actinides", Proc. Acc'App 2007, Pocatello, USA.
- [5] Summary of Working Group Discussion on Accelerators, in: OECD Nuclear Energy Agency, International Workshops on Utilization and Reliability of High Power Proton Accelerators (HPPA): 3rd Meeting, May 12–16, 2002, Santa Fe, NM, USA, ISBN 92-64-10211-6.
- [6] Sustainable Nuclear Energy Technology Platform, "Strategic Research Agenda", May 2009.
- [7] G. Rimpault et al., "The issue of accelerator beam trips for efficient ADS operation", submitted for publication to ANS Nuclear Technology (2013).
- [8] H. Ait Abderrahim et al., "Accelerator and target technology for accelerator driven transmutation and energy production", DOE white paper on ADS technology, September 2010.
- [9] D. Vandeplassche & L. Medeiros Romao, "Accelerator Driven Systems", Proc. IPAC 2012 conference, New Orleans, USA.
- [10] L. Burgazzi, P. Pierini, "Reliability studies of a high power proton accelerator", Reliability Engineering and Systems Safety, **92-4**, 449 (2007).
- [11] SNS preliminary Design Report, "Superconducting Radiofrequency Linac for the Spallation Neutron Source", SNS-RF-99-101, December 1999.
- [12] M. Lindroos, C. Oyon, S. Peggs, "The ESS Superconducting Linear Accelerator", 14th Int. Conf. on RF Superconductivity, Berlin, Germany, September 2009.
- [13] Final Report of the EURISOL Design Study, published by GANIL, Caen, France (2009).
- [14] R. Ferdinand et al, "The SPIRAL 2 superconducting linac", Proc. LINAC 2008 conference, Victoria, Canada.
- [15] J-L. Biarrotte, D. Uriot, "Dynamic compensation of an rf cavity failure in a superconducting linac", Phys. Rev. ST – Accel. & Beams, **11**, 072803 (2008).
- [16] J-L. Biarrotte, M. Novati, P. Pierini, H. Safa, D. Uriot, "Beam Dynamics Studies for the Fault Tolerance Assessment of the PDS-XADS Linac Design", 33rd ICFA Advanced Beam Dynamics workshop HB, Bensheim, Germany, October 2004.

-
- [17] J. Galambos, S. Henderson, A. Shishlo, Y. Zhang, "Operational 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.
- [18] R. Gobin et al, "Saclay High Intensity Light Ion Source status", Proc. EPAC 2001, Paris, France.
- [19] U. Ratzinger and R. Tiede, "Status of the HIF RF linac study based on H-mode cavities", Nucl. Instr and Meth. in Phys. Res. A 415 (1998), pp. 229-235.
- [20] C. Zhang, M. Busch, H. Klein, H. Podlech, U. Ratzinger, R. Tiede, J.L. Biarrotte, "Reliability and current-adaptability studies of a 352 MHz, 17 MeV, continuous-wave injector for an accelerator-driven system", Phys .Rev. ST – Accel. & Beams, **13**, 080101 (2010).
- [21] C. Zhang et al. "Front-End Linac Design and Beam Dynamics Simulations for MYRRHA", Proc. LINAC 2012 conference, Tel Aviv, Israel.
- [22] M. Vossberg et al., "Test-RFQ for the MAX Project", Proc. LINAC 2012 conference, Tel Aviv, Israel.
- [23] H. Podlech et al, "Recent developments on superconducting CH-structures and future perspectives", Proc. LINAC 2008 conference, Victoria, Canada.
- [24] F. Dziuba et al., "CH-cavity development for the 17 MeV EUROTRANS injector", Proc. LINAC 2010, Tsukuba, Japan.
- [25] P-Y. Beauvais et al., "Installation of the French high-intensity proton injector at Saclay", Proc. LINAC 2006 conference, Knoxville, USA,.
- [26] F. Bouly, J-L. Biarrotte, C. Joly, "Low Level Radio-Frequency developments toward a fault-tolerant linac scheme for an Accelerator Driven System", Proc. LINAC 2010, Tsukuba, Japan.
- [27] F. Bouly et al., "Developments and test of a 700 MHz prototypical Cryomodule for the MYRRHA ADS proton linear accelerator", Proc. LINAC 2010, Tsukuba, Japan.
- [28] R. Duperrier, "Review of instability mechanisms in ion linacs", Proc. ICFA-HB 2010, Morschach, Switzerland.
- [29] F. Bouly, S. Bousson et al., "Developments of 350MHz and 700MHz prototypical cryomodules for the EUROTRANS ADS proton linear accelerator", 1st workshop on Technology & Components of ADS, Karlsruhe, Germany, March 2010.
- [30] H. Sagnac et al., "High energy beam line design of the 600MeV 4mA proton linac for the MYRRHA facility", Proc. IPAC 2011 conference, San Sebastian, Spain.
- [31] K. Thomsen, "VIMOS, near-target beam diagnostics for MEGAPIE", Nuclear Instr. & Methods in Phys. Research A 575 (2007) 347-352.