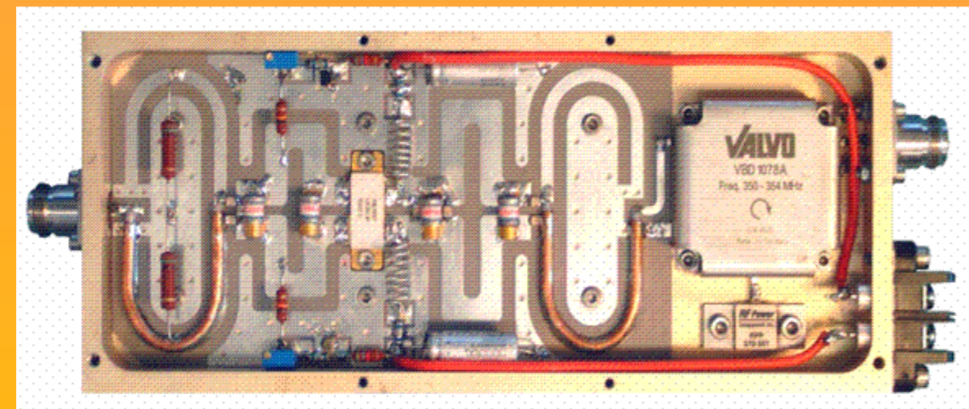
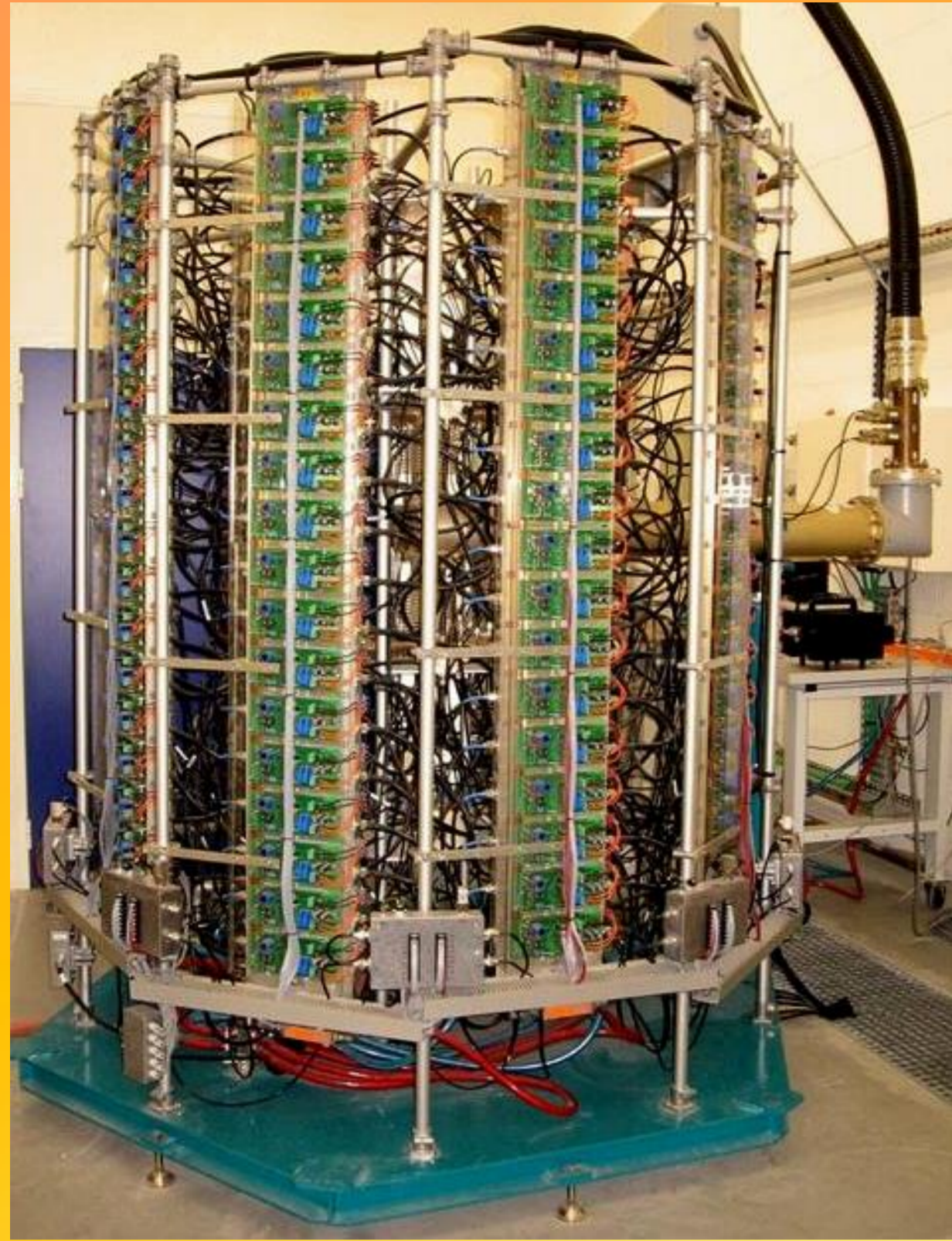


L'amplificateur 35 kW à 352 MHz du Booster (BO)

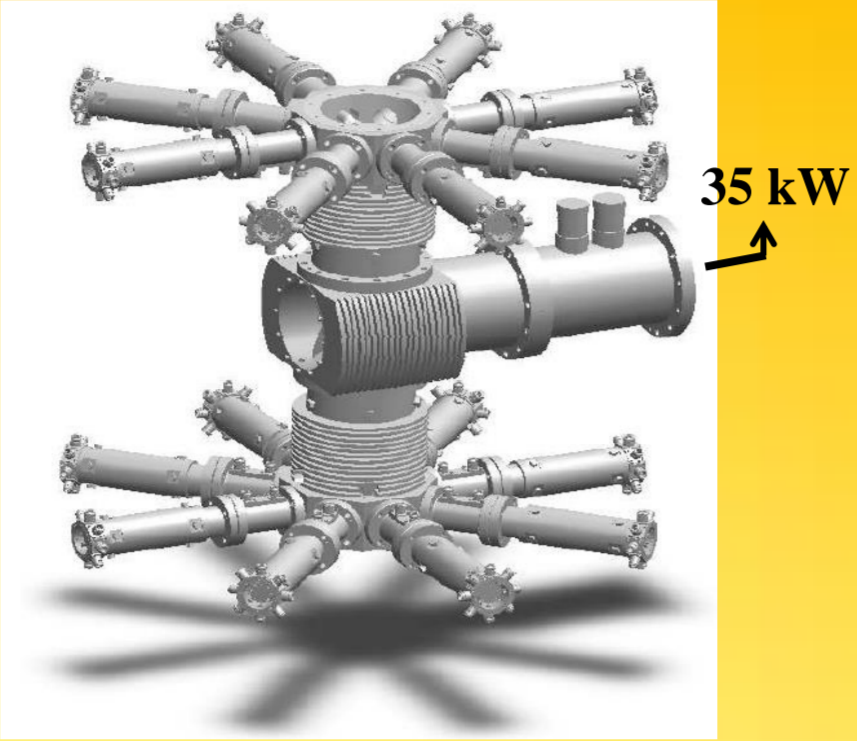
146 modules de 330 W à 352 MHz, chacun avec son circulateur intégré et son alimentation individuelle, montés sur 8 dissipateurs refroidis à l'eau



Module amplificateur
330 W CW - 352 MHz
VDMOS D1029UK05
de SEMELAB
(G = 11 dB, η = 62 %)



Convertisseur DC/DC
600 W - 280 / 28 V



35 kW
Combiner de puissance
(8 x 8 x 2)
8 dissipateurs de
16 + 2* modules
* préamplificateurs

L'amplificateur 35 kW du BO affiche toujours 100% de disponibilité opérationnelle ! En 9 ans, défaillance de seulement 8 modules sur les 146 installés, 5 soudures sèches et 3 transistors cassés, ce qui n'a absolument pas perturbé le fonctionnement du fait de la modularité et de la redondance inhérente à ce design ; les réparations peuvent attendre un arrêt programmé de la machine.

Les amplificateurs 180 kW de l'Anneau de Stockage (AS)

Les amplificateurs de 180 kW de l'AS sont basés sur le même principe que celui du BO, étendu à 4 tours de 45 kW \rightarrow 726 modules / ampli x 4 cavités \rightarrow 16 tours & \sim 3000 modules (transistor LDMOS LR301 de POLYFET qui a un gain 3 dB plus élevé que le VDMOS)



Les 4 amplis de l'AS, comme celui du BO, se sont montrés extrêmement fiables en opération : après \sim 45 000 heures d'opération en 9 ans, seulement 5 courtes interruptions de faisceau imputables aux amplis \rightarrow Taux d'indisponibilité opérationnelle $<$ $5 \cdot 10^{-5}$ et temps moyen entre pannes $>$ 1.5 an (cumul des 4 amplis).

Le taux moyen des pannes de module est \sim 3 %/an ($<$ 2% depuis 2012), principalement de deux types : casse de transistor et dégradation de soudure par stress thermique ; mais c'est essentiellement une question de maintenance (sans impact sur l'opération).

Dans le but d'améliorer encore ces résultats, à relativement faible coût, un upgrade est en cours visant à remplacer le transistor LR301 (28V) par le BLF574XR- NXP de 6^{ème} génération (50V), bien plus robuste et plus performant en termes de gain et rendement :

- Echange du transistor et réutilisation du reste \rightarrow \sim 10% du coût de l'ampli
- Rendement global augmenté de \sim 8 %
 \rightarrow L'économie d'énergie électrique compense le coût de l'upgrade en moins de 3 ans
- 400W (au lieu de 320 W) max. par module \rightarrow possible de stocker 500 mA avec 3/4 amplis
- Transistor plus robuste et température moins élevée \rightarrow diminution du taux de panne \rightarrow réduction du coût de maintenance

Avancement de l'upgrade

- Modification de tous les préampli (160 modules de 1^{er} & 2nd étages) faite en 2013
- 1^{ère} Tour changée en août 2014, 2nde en avril 2015, 3^{ème} prévue en oct. 2015
- Objectif : poursuivre au rythme de 1 à 2 tours par an

R&D sur les ampli RF transistorisés à SOLEIL

Transistor de 6^{ème} génération ($V_{dc} = 50$ V) + expertise SOLEIL \rightarrow bond technologique
 $\rightarrow P_{mod} \sim 700$ W, G \sim 20 dB, $\eta >$ 70% à 352 MHz

[Module LR301 ($V_{dc} = 28$ V) : $P_{mod} = 315$ W, G = 13 dB, $\eta = 62$ % à 352 MHz]

$\rightarrow P_{mod} \times 2.2$ & meilleures performances (G, η , linéarité)

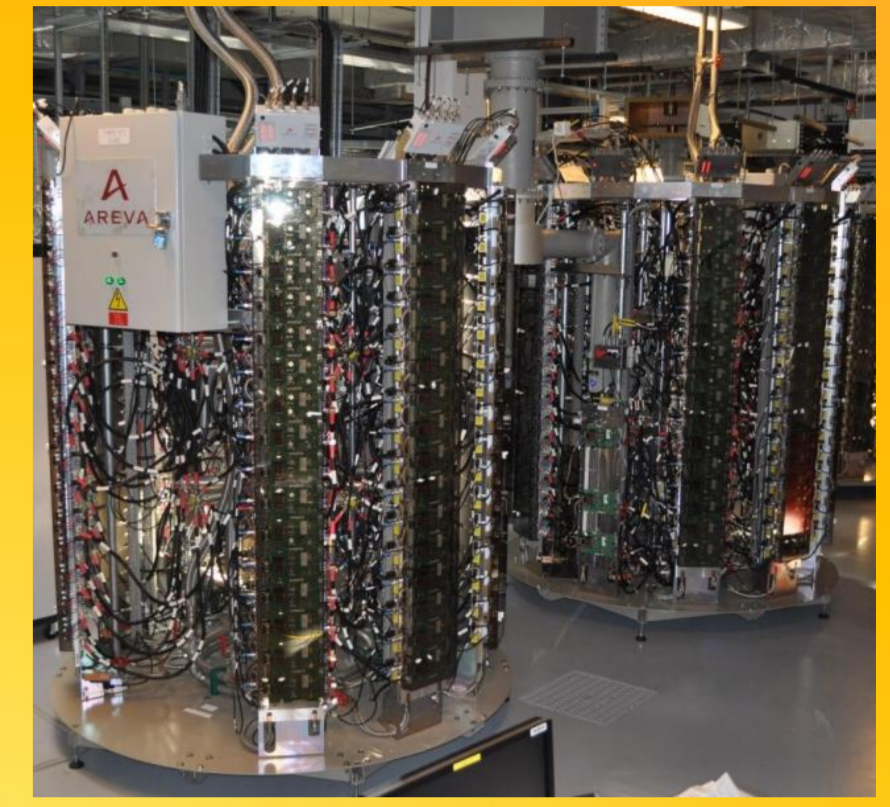
& contraintes thermiques fortement réduites ($\Delta T : - 60$ °C) \rightarrow durée de vie plus longue

\downarrow Upgrade d'ESRF (klystrons remplacés par ampli à transistors)

- \rightarrow Début 2009, accord de transfert de technologie conclu avec ELTA-AREVA
- \rightarrow Contrat avec ESRF pour 7 ampli 150 kW de type SOLEIL (14 tours de 75 kW)

- Mars 2012 : Mise en service des 4 amplis 150 kW du BO qui fonctionnent parfaitement depuis plus de 3 ans ($\eta : 58$ %*)
* η : rendement global (alimentations & circulateurs inclus)
 $\eta >$ 60% attendu avec nouveaux convertisseurs ac-dc

- Début 2014 : Mise en service des 3 ampli de l'AS, légèrement modifiés par rapport à ceux du BO pour tolérer un fort TOS en continu; ils fonctionnent également de façon très satisfaisante depuis plus d'un an.



Ampli 150 kW 352 MHz de ESRF

Collaboration SOLEIL - LNL

2 ampli de 50 kW à 476 MHz pour l'AS de LNL, la source de lumière brésilienne, réalisés avec des composants développés à SOLEIL (modules 400 W avec transistors BLF574)



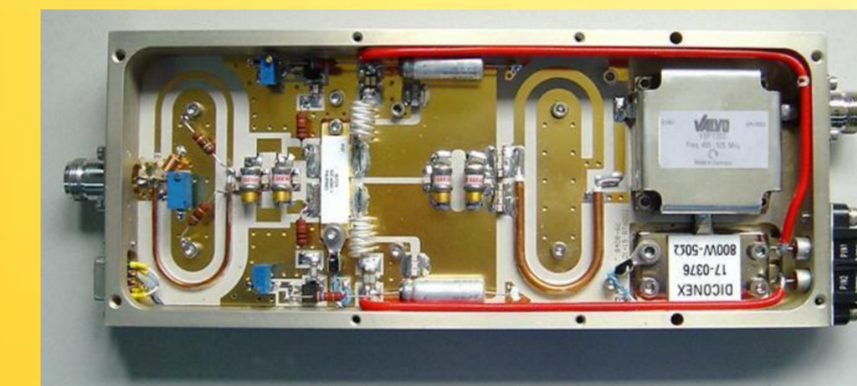
Avril 2010, Campinas-Brésil, l'équipe SOLEIL-LNL après les tests réussis des 2 amplis 50 kW



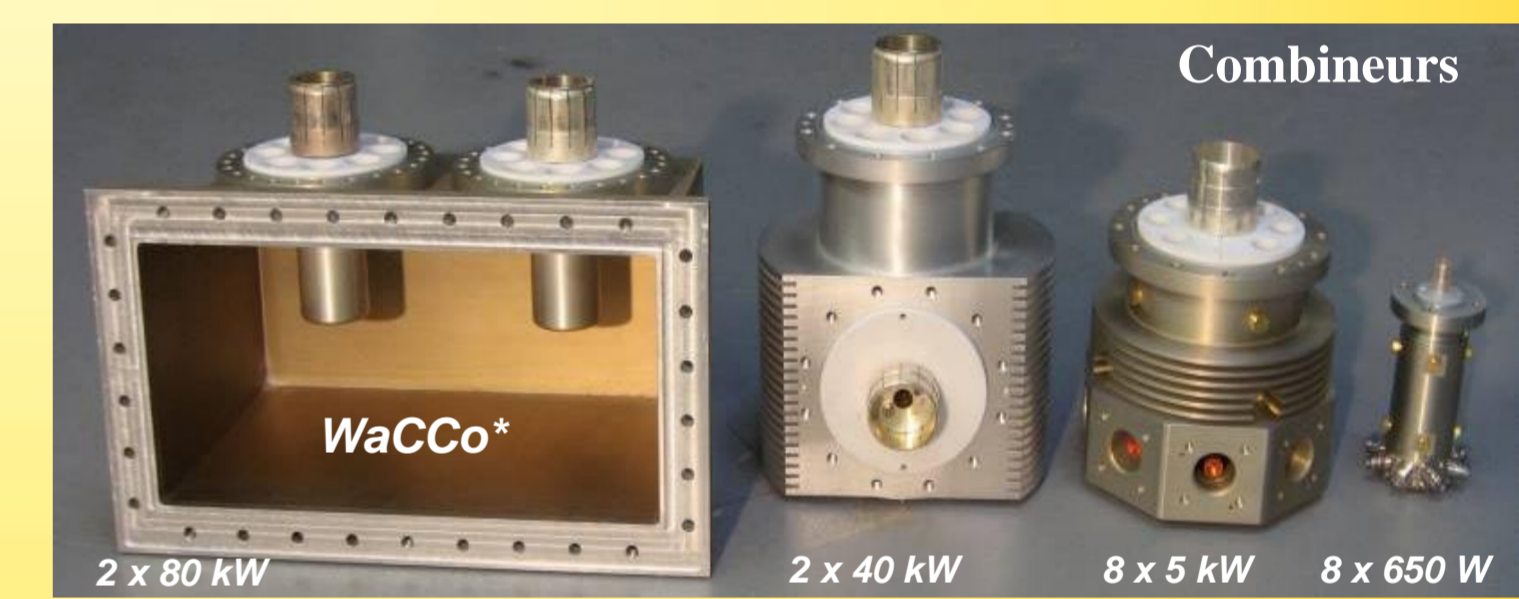
Les 2 amplis 50 kW installés sur l'AS de LNL, où ils fonctionnent parfaitement depuis 5 ans

R&D à SOLEIL sur les ampli 500 MHz transistorisés \rightarrow SESAME* et ThomX#

* Source de lumière synchrotron en construction en Jordanie; # Source de rayons X (Compton) en construction à Orsay-France



- LDMOS BLF578
- $P_{out} : 650$ W CW
- Gain : 17 dB
- Efficacité \approx 63 %



Combiners
2 x 80 kW, 2 x 40 kW, 8 x 5 kW, 8 x 650 W



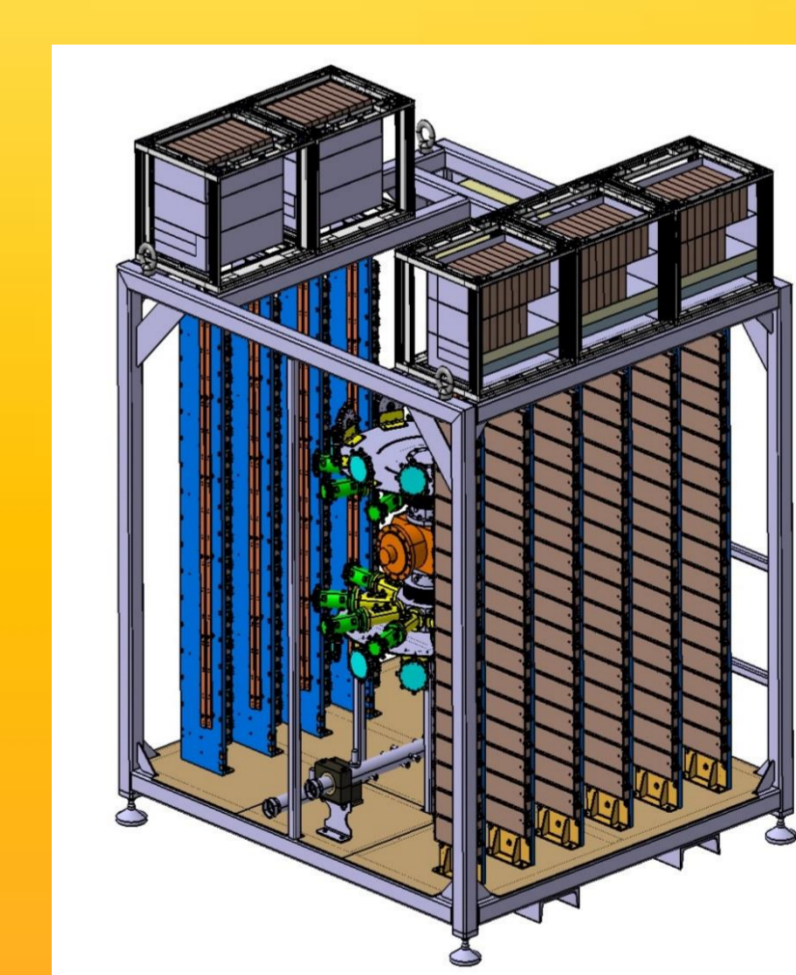
Convertisseurs 230 Vac - 50 Vdc de haute efficacité (96%) en modules de 2 kW avec tension contrôlable à distance pour optimiser l'efficacité à différents points de travail



Diviseurs 2 & 4 - voies, Diviseur 8 voies, Coupleur P₁ - P₂



150 kW à 500 MHz, initialement conçu pour SESAME avec 16 dissipateurs de 16 modules



80 kW à 500 MHz pour SESAME (10 dissipateurs de 16 modules)



50 kW à 500 MHz pour Thomx (6 dissipateurs de 16 modules)

- \rightarrow Les tests de qualif. de l'ampli ThomX sont terminés : à 50 kW, 1dB de compression, $\eta = 54$ %
- \rightarrow Le 1^{er} ampli 80 kW de SESAME est en cours de fab. à SOLEIL (collab. SESAME-SOLEIL); SIGMAPHI ELECTRONICS qui détient une licence de SOLEIL depuis décembre 2013, fournira les 3 autres.

* WaCCo : Wave guide - to - Coaxial Combiner

Résumé & conclusions

- SOLEIL fonctionne maintenant depuis \sim 9 ans avec ses ampli 352 MHz à transistors (35 kW dans le BO; 4 x 180 kW dans l'AS), basés sur un design développé en interne et qui consiste à combiner un grand nombre de modules RF élémentaires de 320 W (1 x 147 dans le BO; 4 x 724 dans l'AS) avec transistors MOSFET, circulateurs intégrés et alimentations individuelles. Ils affichent une disponibilité opérationnelle exceptionnelle ($>$ $1 - 5 \cdot 10^{-5}$ & MTBF $>$ 1.5 an); la démonstration est faite que la technologie à transistors peut remplacer avantageusement les tubes à vide pour ce type d'application, grâce en particulier à sa grande modularité et la redondance associée, à l'absence de HT et le bruit de phase extrêmement faible qui en résulte.
- La R&D menée à SOLEIL a permis de rendre le design initial encore plus compact grâce à un doublement de la puissance par module, tout en réduisant les contraintes thermiques et en améliorant les performances en termes de gain et efficacité, aussi bien à 352 MHz qu'à 500 MHz.
- 4 amplis 150 kW - 352 MHz, basés sur cette technologie, fonctionnent de façon tout à fait satisfaisante sur le Booster de l'ESRF, depuis 3.5 ans ; 3 autres, mis en service il y a un peu plus d'un an sur l'AS, donnent également pleine satisfaction. L'efficacité actuelle est de 58% et elle pourrait atteindre plus de 60% avec les nouveaux convertisseurs ac-dc maintenant utilisés.
- 2 amplis 50 kW - 476 MHz, réalisés dans le cadre d'une collaboration entre SOLEIL et LNL, fonctionnent parfaitement sur l'AS de LNL depuis plus de 5 ans.
- 2 amplis 500 MHz sont actuellement en fabrication à SOLEIL, un de 50 kW pour ThomX et un de 80 kW pour SESAME; une version 150 kW est également disponible.
- Cette technologie à transistors est arrivée à maturité; elle est adoptée par d'autres centres accélérateurs et reprise par l'industrie pour des applications allant de 80 MHz à 1.5 GHz.
- La société industrielle SIGMAPHI ELECTRONICS détient une licence exclusive d'exploitation de la technologie SOLEIL depuis décembre 2013.
- Afin d'obtenir les meilleures performances dans les synchrotrons accélérateurs ou anneaux de stockage, on choisit généralement d'alimenter les cavités séparément; pour cela on a besoin de sources de puissance RF de quelques centaines de kW en continu (limitation par les coupleurs) à des fréquences de 100 à 700 MHz, ce qui sied bien aux capacités des amplis à transistors. L'utilisation d'ERL (Energy Recovery Linac), basé sur la technologie RF supraconductrice, est considérée comme la solution la plus prometteuse pour obtenir des faisceaux d'électrons à forts courants moyens (\sim 100 mA) et très faibles émittances pour les futures sources de lumière ou des applications en physique des hautes énergies. Dans la configuration ERL, la puissance requise par cavité est de \sim 10 kW continu à des fréquences de 0.7 à 1.5 GHz. C'est un autre domaine d'application pour les ampli à transistors. Par contre, ils ne pourront pas se substituer aux klystrons dans les applications pulsées exigeant des dizaines de MW en puissance pic.