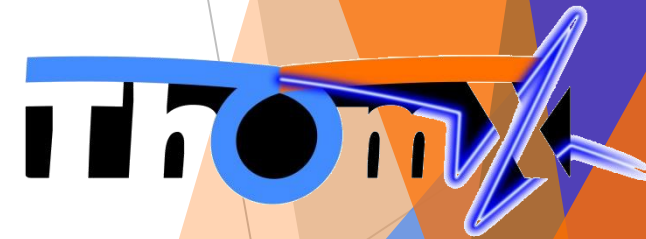


Injection et extraction des faisceaux dans ThomX - Éléments Pulsés.



Patrick ALEXANDRE
SOLEIL

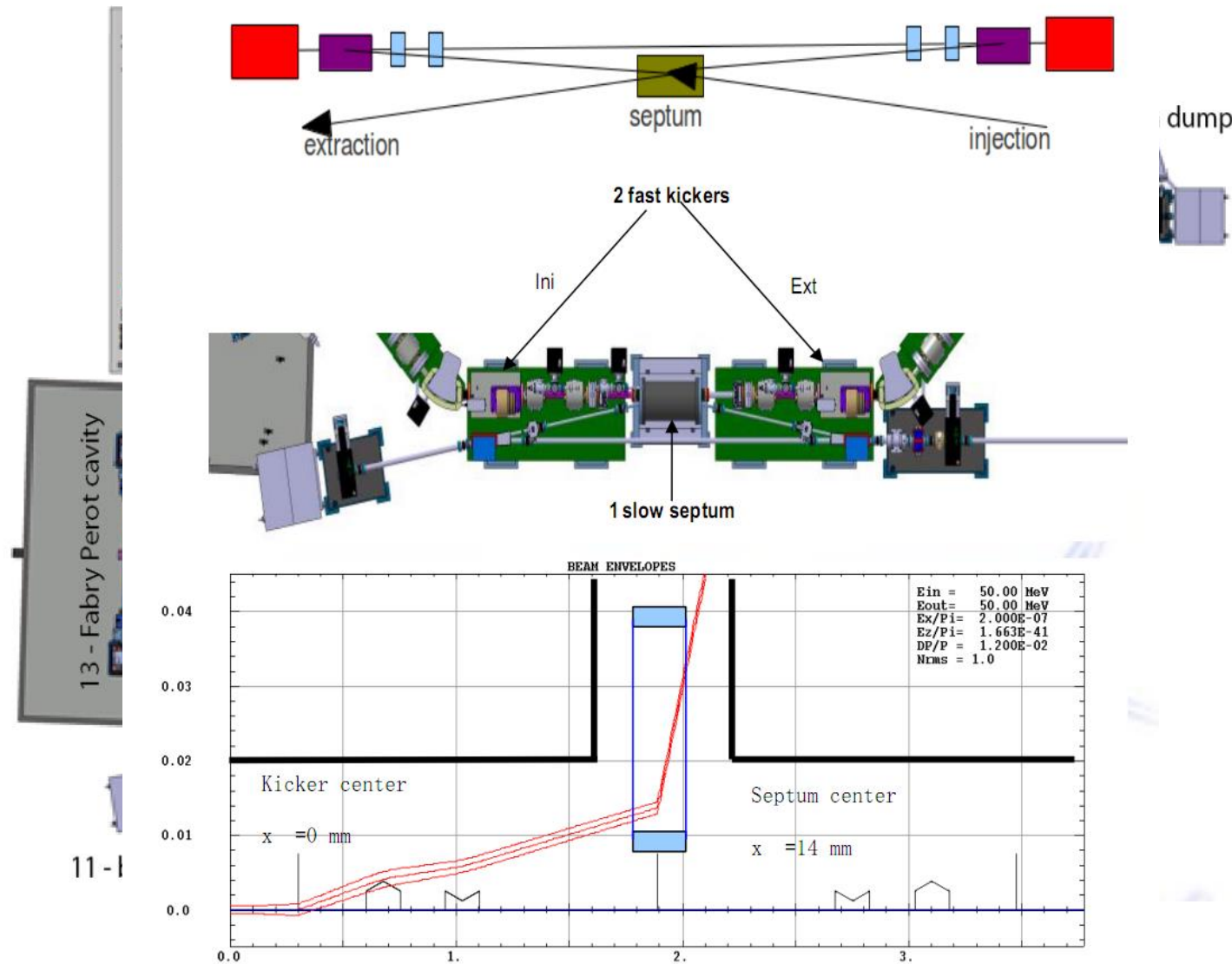


Sommaire

- ▶ Machine ThomX & schémas d'injection-extraction.
- ▶ Généralités & conception des éléments pulsés.
- ▶ Éléments pulsés : principales caractéristiques fonctionnelles.
- ▶ Spécificités des systèmes kickers.
 - Aimants & Pulsers.
- ▶ Spécificités du système septum passif.
 - Aimant & Pulser.
- ▶ Fonctionnement des cycles d'injection - extraction. Sécurités machine et personnes.
- ▶ Etat actuel de la fabrication & planning.
- ▶ Recettes / installation / commissionnings / contrôle-commande.
- ▶ Maintenances et pannes.
- ▶ Conclusions.

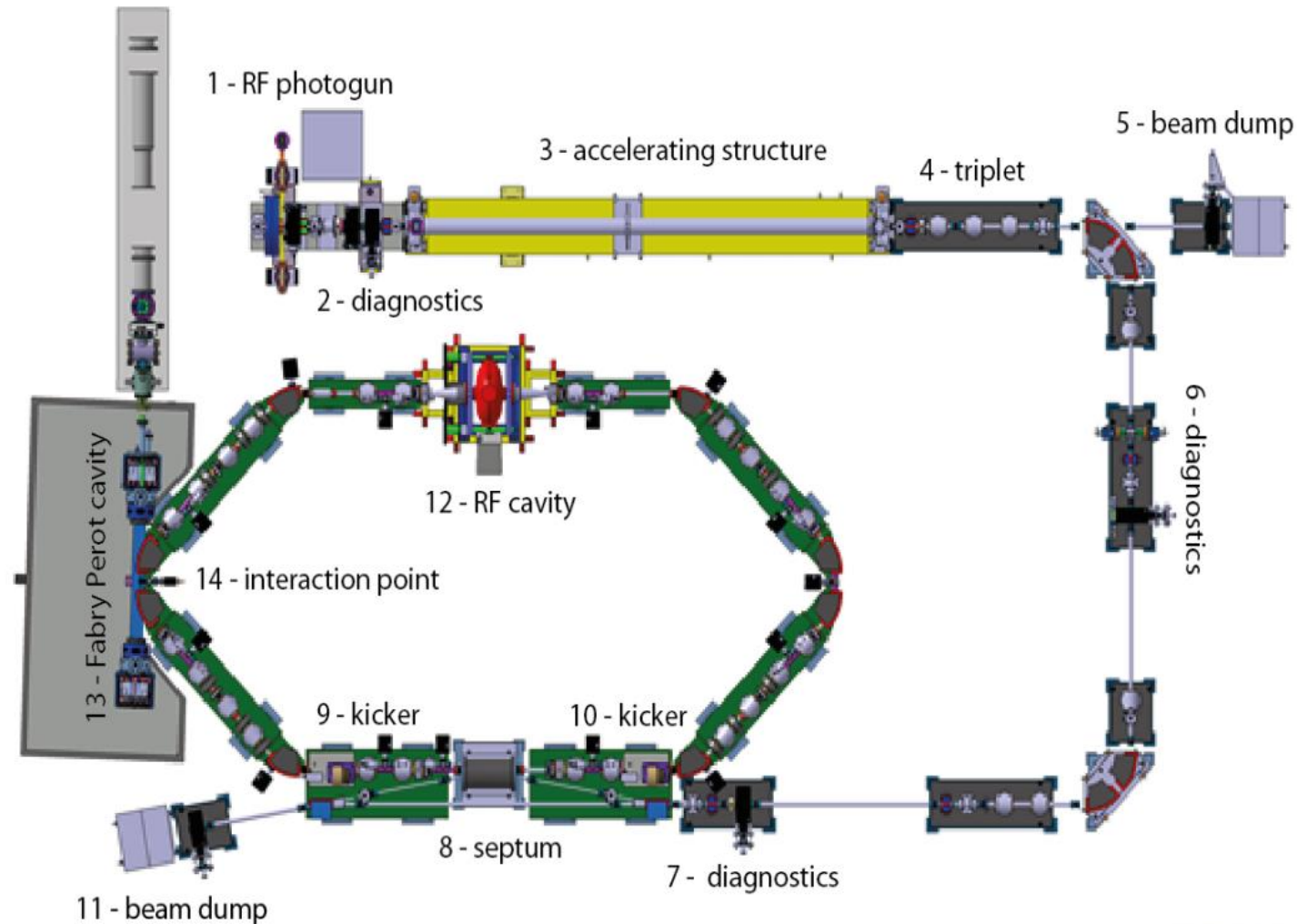


Machine ThomX & schémas d'injection-extraction.



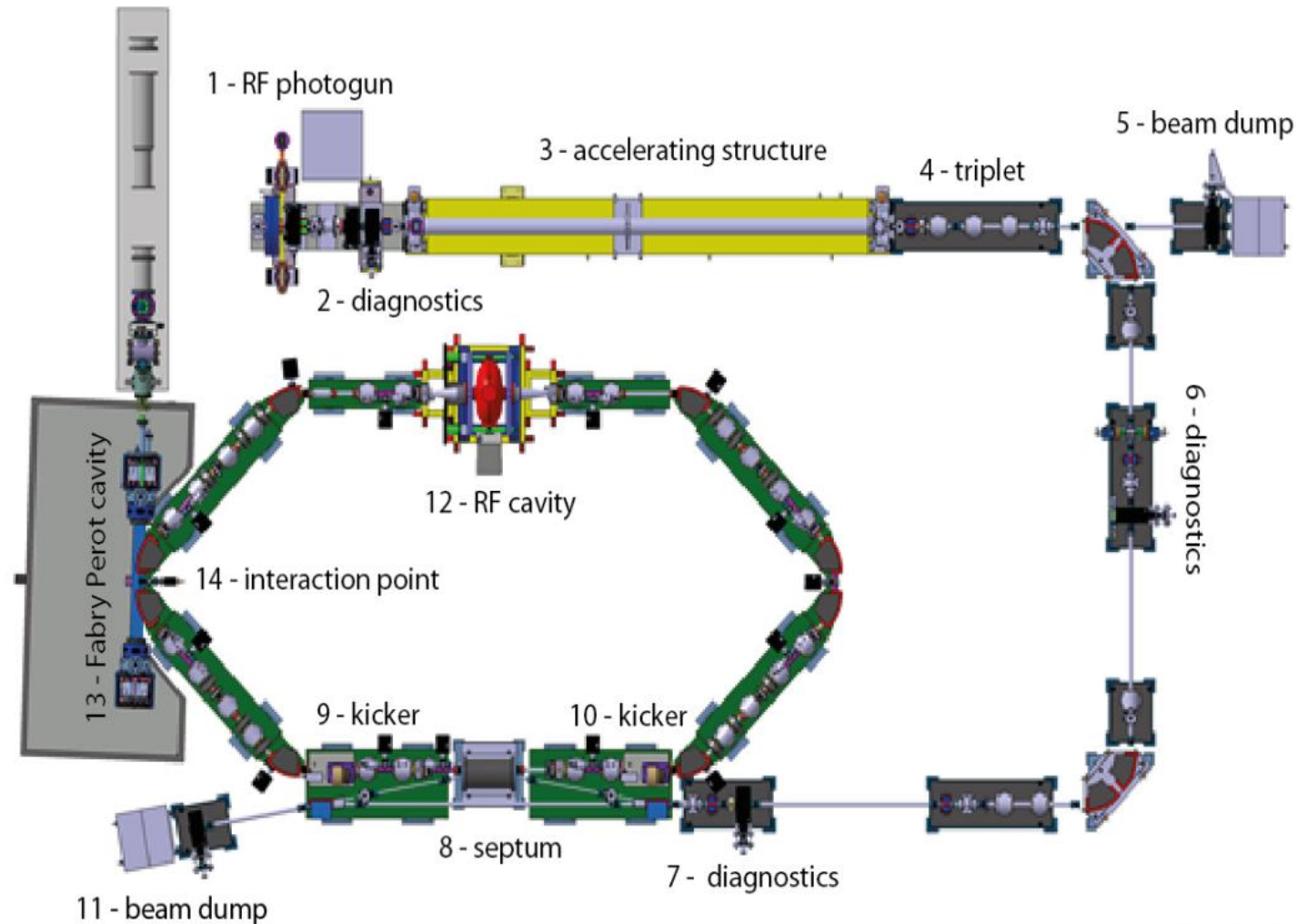
- Aimant à septum passif : champ magnétique dipolaire hors axe (~14 mm) et champ magnétique nul sur l'axe faisceau stocké.
- Aimants kickers : champ magnétique dipolaire dans tout l'espace. Champ magnétique si courant dans les spires de l'aimant.
- Le but : mettre le paquet frais sur l'axe de la machine, après extraction.
- Pourquoi pulsé ?

Machine ThomX & schémas d'injection-extraction.



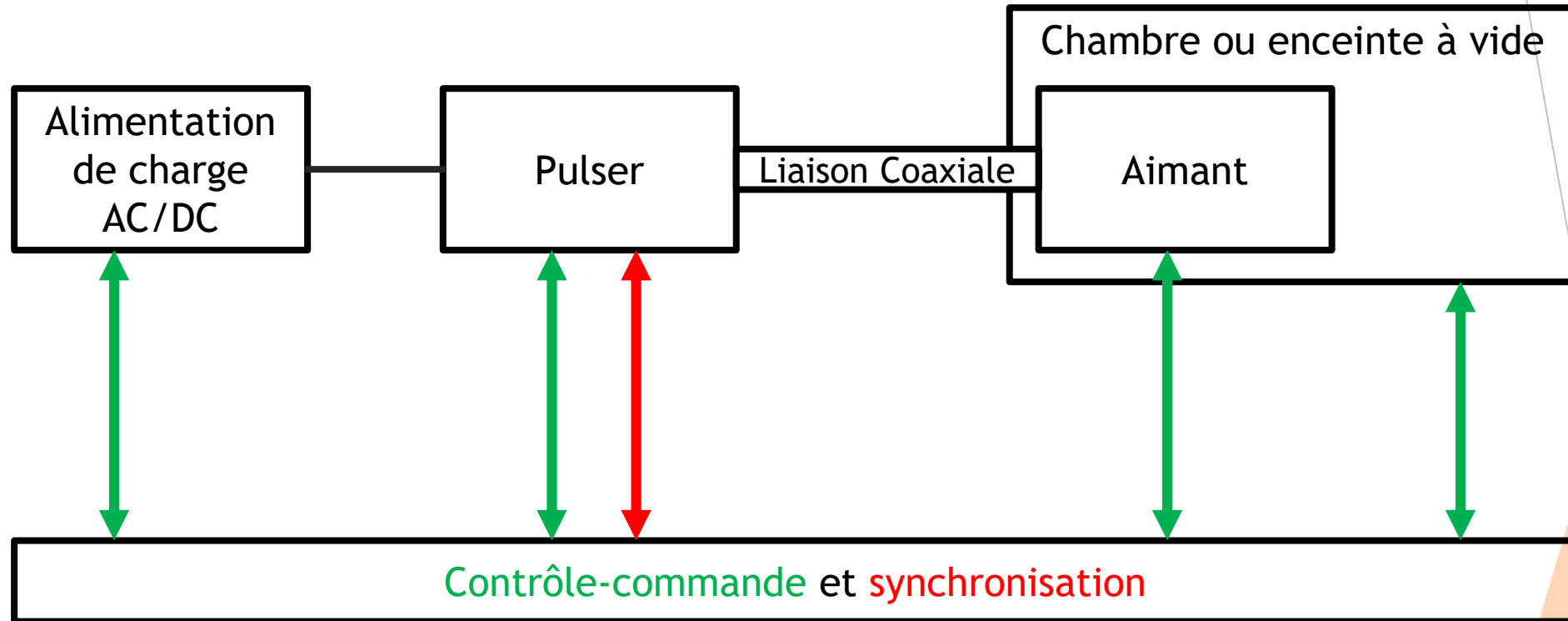
- **Kickers injection** : champ magnétique requis pour l'injection ! Mais le champ doit être éteint avant le retour du paquet, sous peine de nouveau kick !
- **Kickers extraction** : champ magnétique requis pour l'extraction ! Mais le champ doit monter de valeur nulle (tour n-1) à la valeur requise au tour n pour réussir l'extraction.
- **Dipôle classique** -> grosse inductance -> pas pratique pour ramper rapidement.
- Dipôle pulsé : spire à 1 tour et forts courants crête.
- Trise = Tfall = 60 ns, pour les deux aimants kickers.

Machine ThomX & schémas d'injection-extraction.



- Aimant à septum passif : sert pour l'injection et l'extraction.
- Par conception, pas de champ magnétique dans la chambre à vide faisceau stocké.
- Pour réaliser une séparation efficace, on procède à un écrantage par courants de Foucault, nécessitant des champs magnétiques variables.
- Pour obtenir à la fois un champ magnétique suffisant et qui varie suffisamment vite, l'aimant doit être peu selfique.
- **Donc : petite self + fort courant crête = pulsé.**

Généralités & conception des éléments pulsés



Généralités & conception des éléments pulsés.

CONCEPTION

- **Physique Machine** : position faisceaux injecté/extrait et stocké, intégrales de champ, ouvertures physiques...
- **Design magnétique** : simulation (DC & Transient : Opera & Matlab), effets du dépôt titane interne, inductance...
- **Etude thermique** : courant image & courants d'excitation, stress mécanique sur la CàV...
- **Design Ultra-Vide**: ouvertures (H&V), tracés rayonnement synchrotron, calculs des profils de pression, dégazage...
- **Design du pulser** : haute tension pulsée, choix des composants, stabilité & reproductibilité de l'impulsion de courant, alims de charge, CEM...
- **Design mécanique** : aimant, pulser & isolants HT, problématiques d'alignement et de métrologie, étude vibratoire, installation et manutention...
- **Choix des matériaux** : environnement avec rayonnements ionisants, haute tension, ultravide, disponibilité, rigidité mécanique, dilatation, etc...
- **Alignement et métrologie** : mesurer l'aimant pour bien le placer dans la machine.
- **Contrôle-commande** : triggers, pilotage (hard et soft), interlocks et sécurités...
- **Installation et commissioning** : quand et comment l'installer et le tester, étuvage...
- **Operation** : facilité d'utilisation, fiabilité..
- **Budget** : il n'est pas infini...

REALISATION

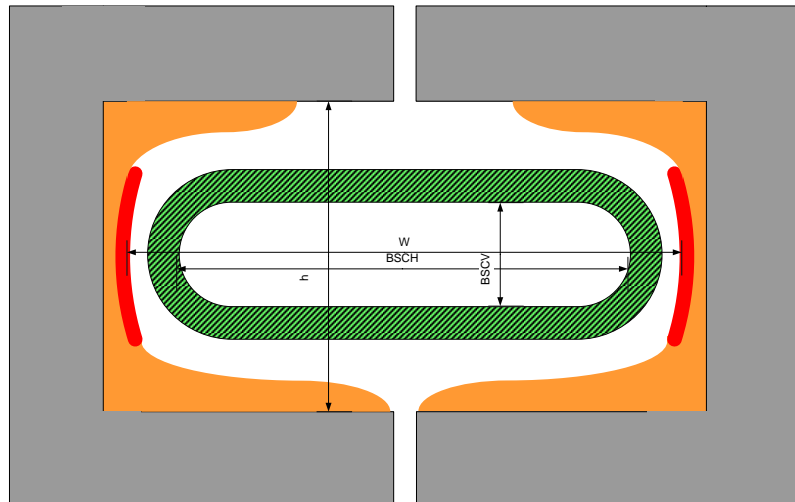
- **Fabrication par sous-traitance**: quels sous-éléments? contrôle qualité?
- **Fabrication à SOLEIL** : qui sait faire quoi ? planning et gestion du risque...
- **Prototypage** : quand faut-il en faire et jusqu'où? combien de tests et quelle pertinence ?
- **Gestion de la fabrication** : travaux en série/parallèle, recettes intermédiaires...
- **Tests finaux**: mesures magnétiques, tests électriques, tests longue durée, debugging..
- **Communication** : rapports sur la conception et la réalisation, présentations, procédures d'installation, de dépannage, revues de conceptions, papiers administratifs...

TRAVAIL ITERATIF!

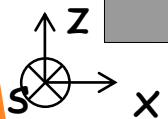
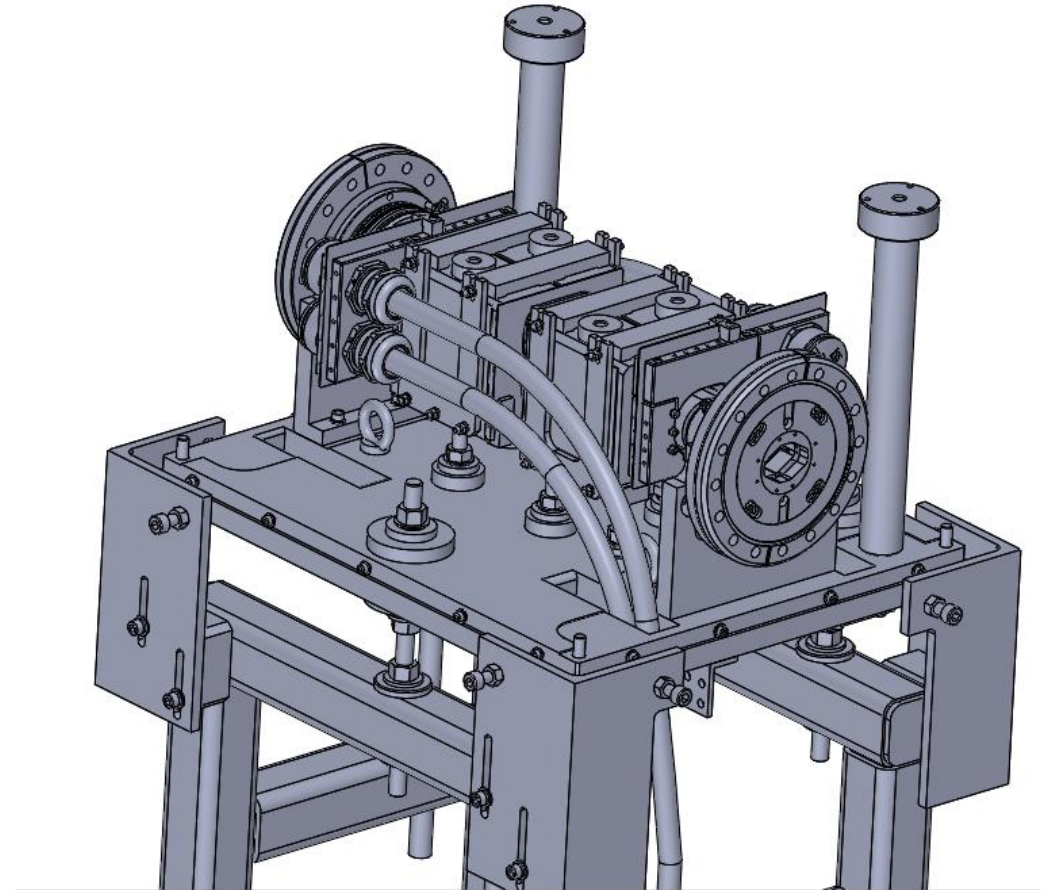
- **Conçoit une solution** qui remplit les specs de PM -> vérifier tous les autres aspects...
- **Vérifier la sensibilité du design aux erreurs de fabrication...**
- **D'autres problèmes s'ajouteront !** On ne voit pas tout du premier coup ...
- **Jusqu'à ce que le design remplisse toutes les spécifications implicites et explicites....**
- **Cela peut mobiliser beaucoup de personnes !**

Eléments pulsés : principales caractéristiques - Aimants kickers.

- ▶ Aimant dipolaire (type window frame),
- ▶ Chambre à vide en céramique, métallisée à l'intérieur par une couche très fine en nitrure de titane,
- ▶ Une unique spire en cuivre,
- ▶ Un circuit magnétique qui guide les lignes de champ magnétique pour avoir un champ magnétique vertical homogène *dans toute la chambre*.

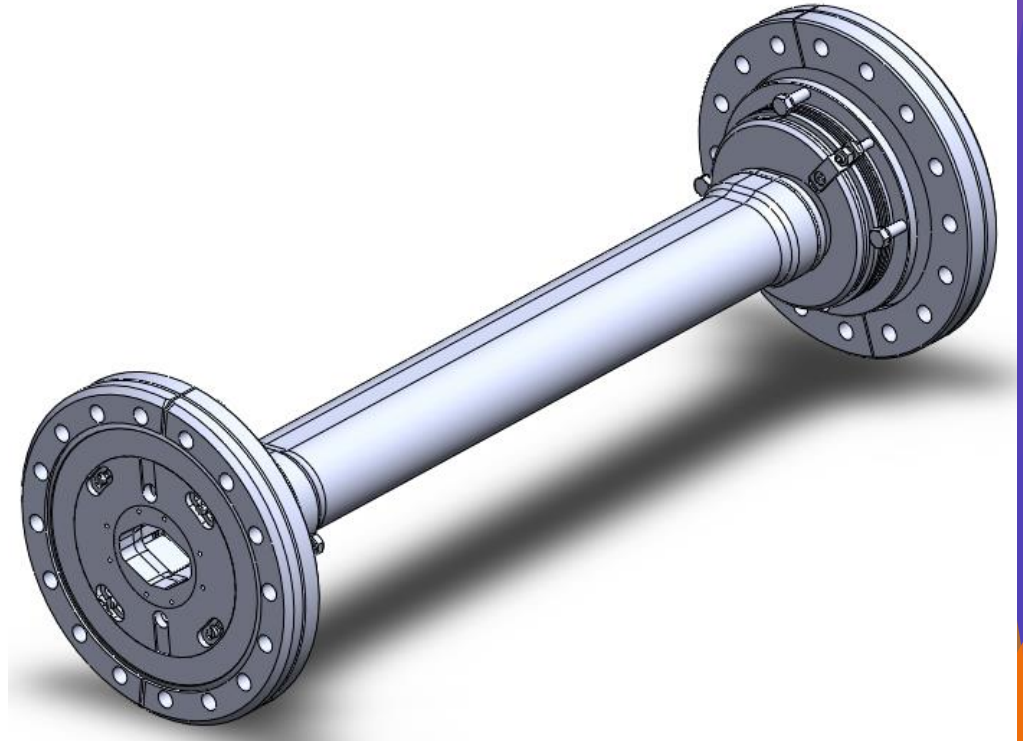


Gris : circuit magnétique
Vert : chambre à vide
Rouge : spire
Orange : support de spire



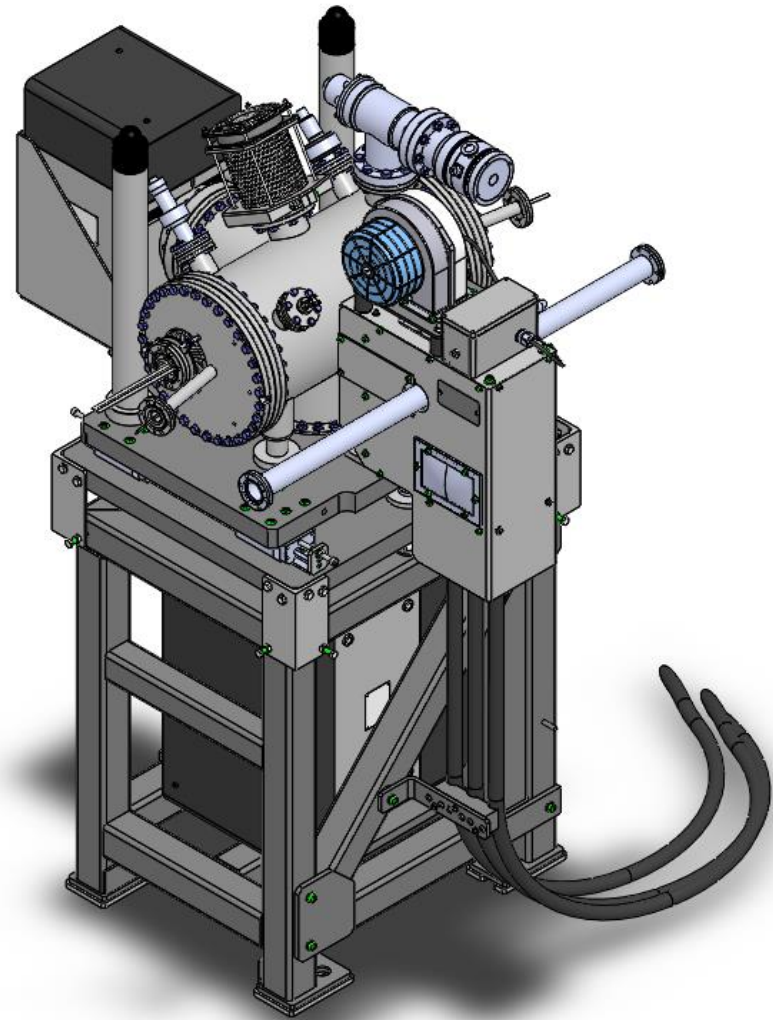
Eléments pulsés : principales caractéristiques - Aimants kickers.

- ▶ Chambres à vide des aimants kickers :
 - Corps en alumine (40 mm x 28 mm hippodrome) .
 - Viroles cuivre OFHC puis acier pour soudure des ensembles de brides.
 - Souffets internes (dilatation de la céramique).
 - Lames de contact internes (impédance).
- ▶ Pour assurer la conduction du courant image, on dépose une fine couche métallique (nitrure de titane). L'épaisseur doit limiter les échauffements.
- ▶ Les champs magnétiques pulsés doivent pénétrer dans la chambre. Une épaisseur trop élevée atténue et déforme les champs magnétiques pulsés.
- ▶ Compromis pour les chambres à vide des kickers : nitrure de titane d'épaisseur 50 nm.

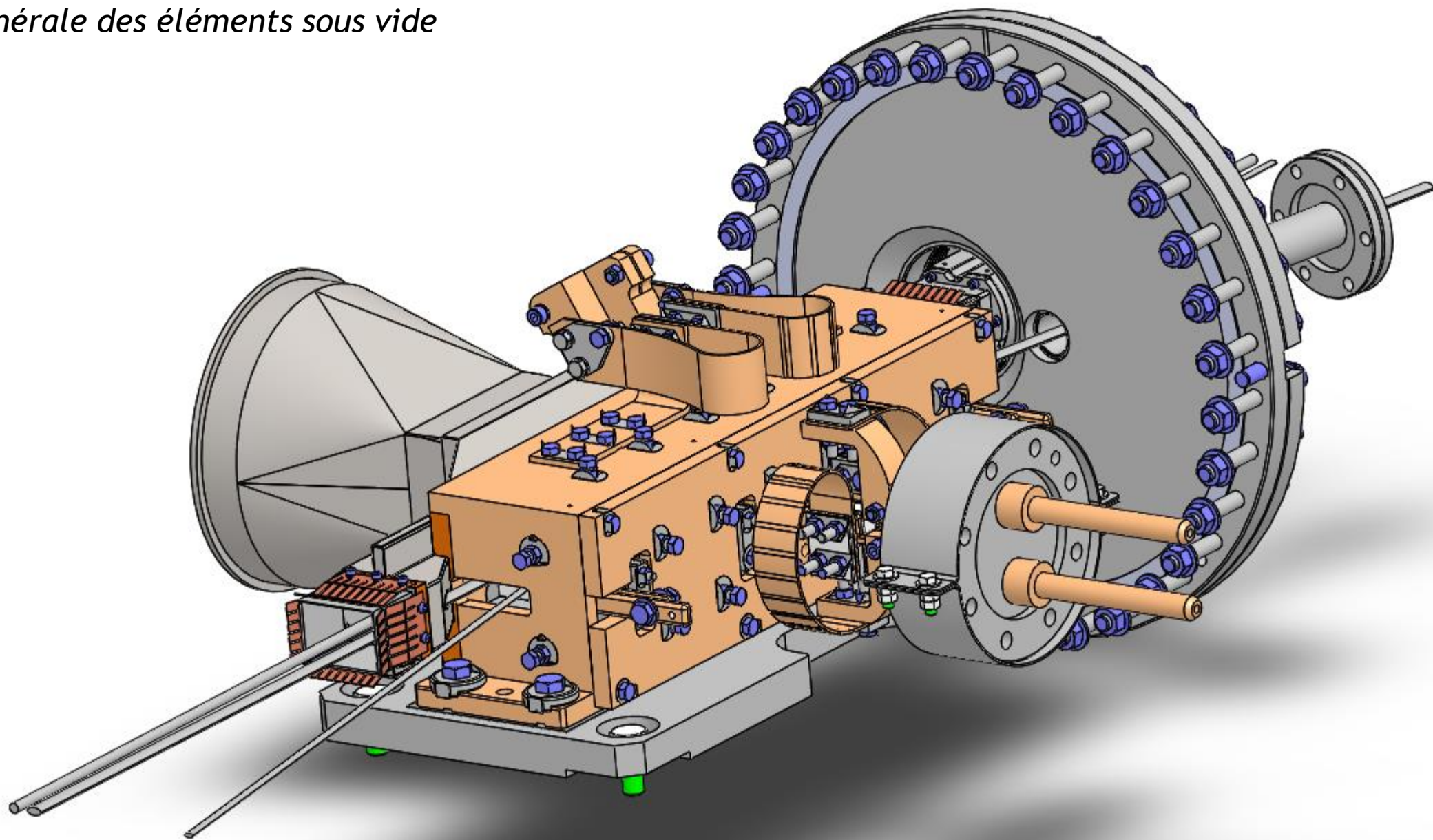


Eléments pulsés : principales caractéristiques - Aimant à septum passif

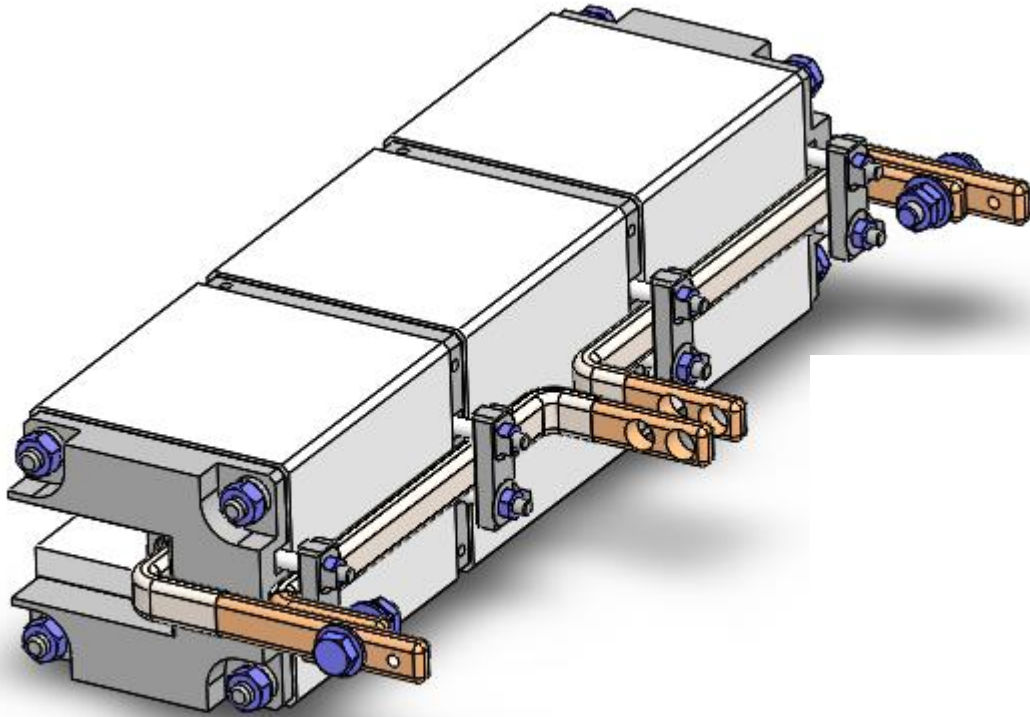
- Aimant sous ultravide.
- Deux zones importantes :
 - Chambre leurre où réside un très faible champ magnétique quand l'aimant est alimenté en courant électrique (faisceau circulant).
 - Entrefer de l'aimant où réside un fort champ magnétique quand l'aimant est alimenté en courant électrique (faisceaux injectés ou extraits).
- La séparation entre les deux zones étant faite par la lame séparatrice (septum).
- La qualité du champ quasi nul dans la chambre leurre dépend aussi du blindage supplémentaire autour de la chambre leurre.



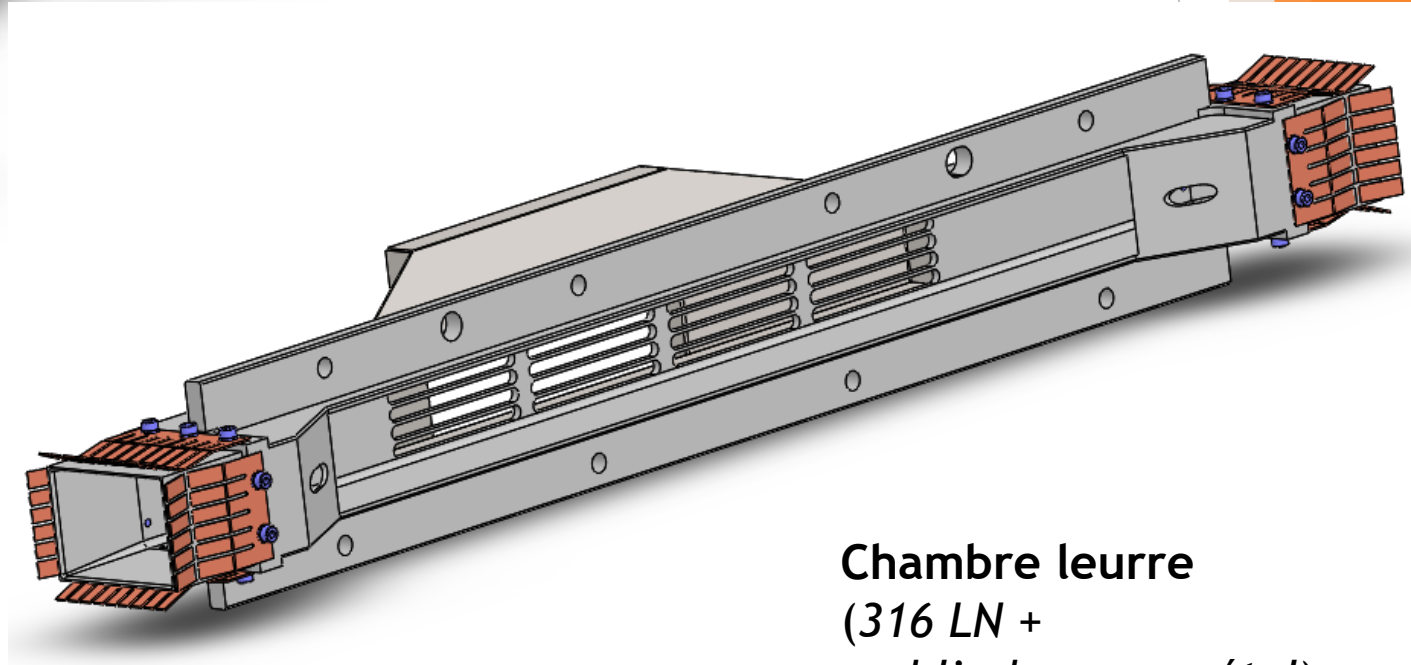
Vue générale des éléments sous vide



Éléments pulsés : principales caractéristiques - Aimant à septum passif



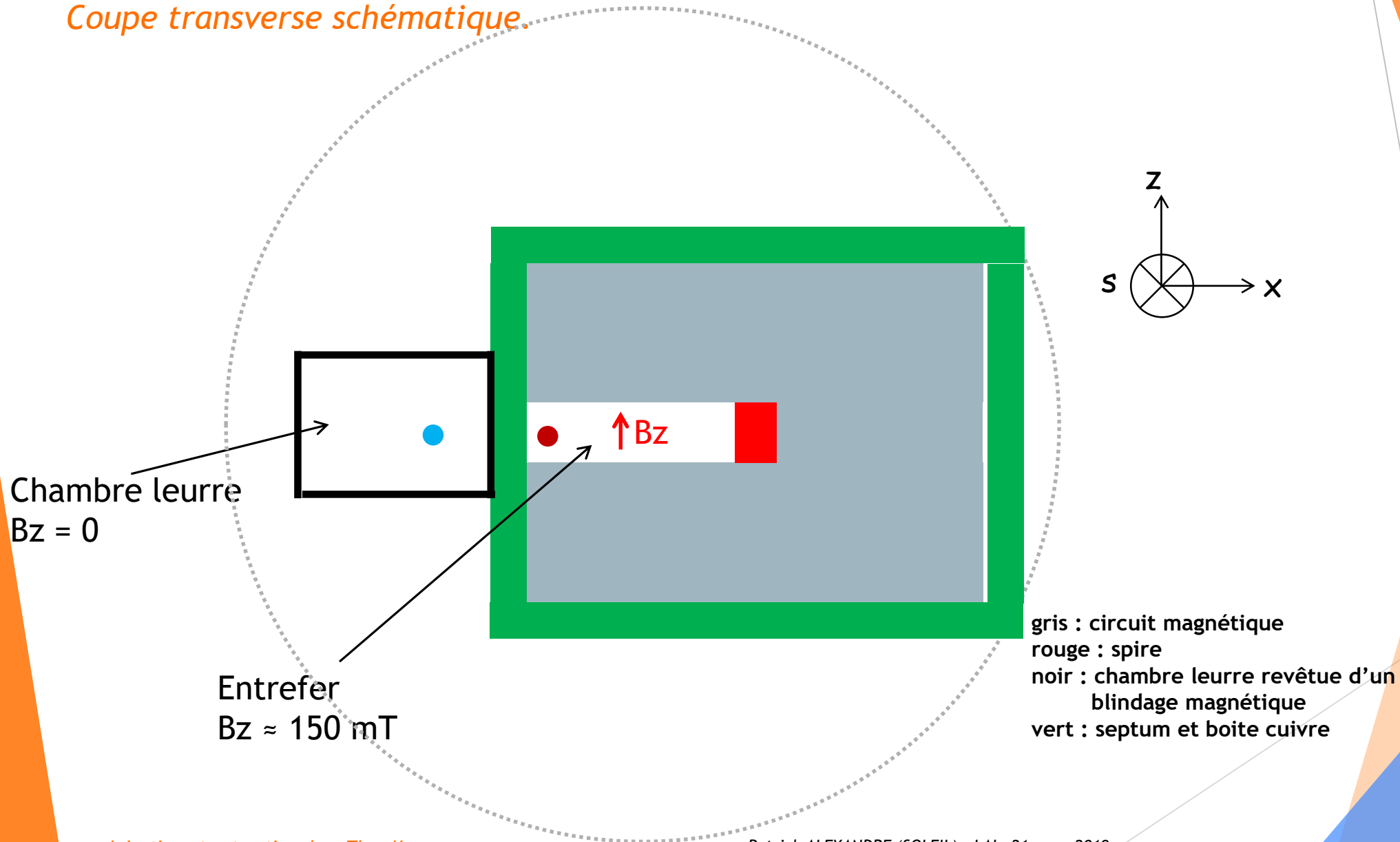
Aimant
Tôles FeSi
Calages (Aluminium)
Spire (Cu OFHC)



Chambre leurre
(316 LN +
surblindage mumétal)

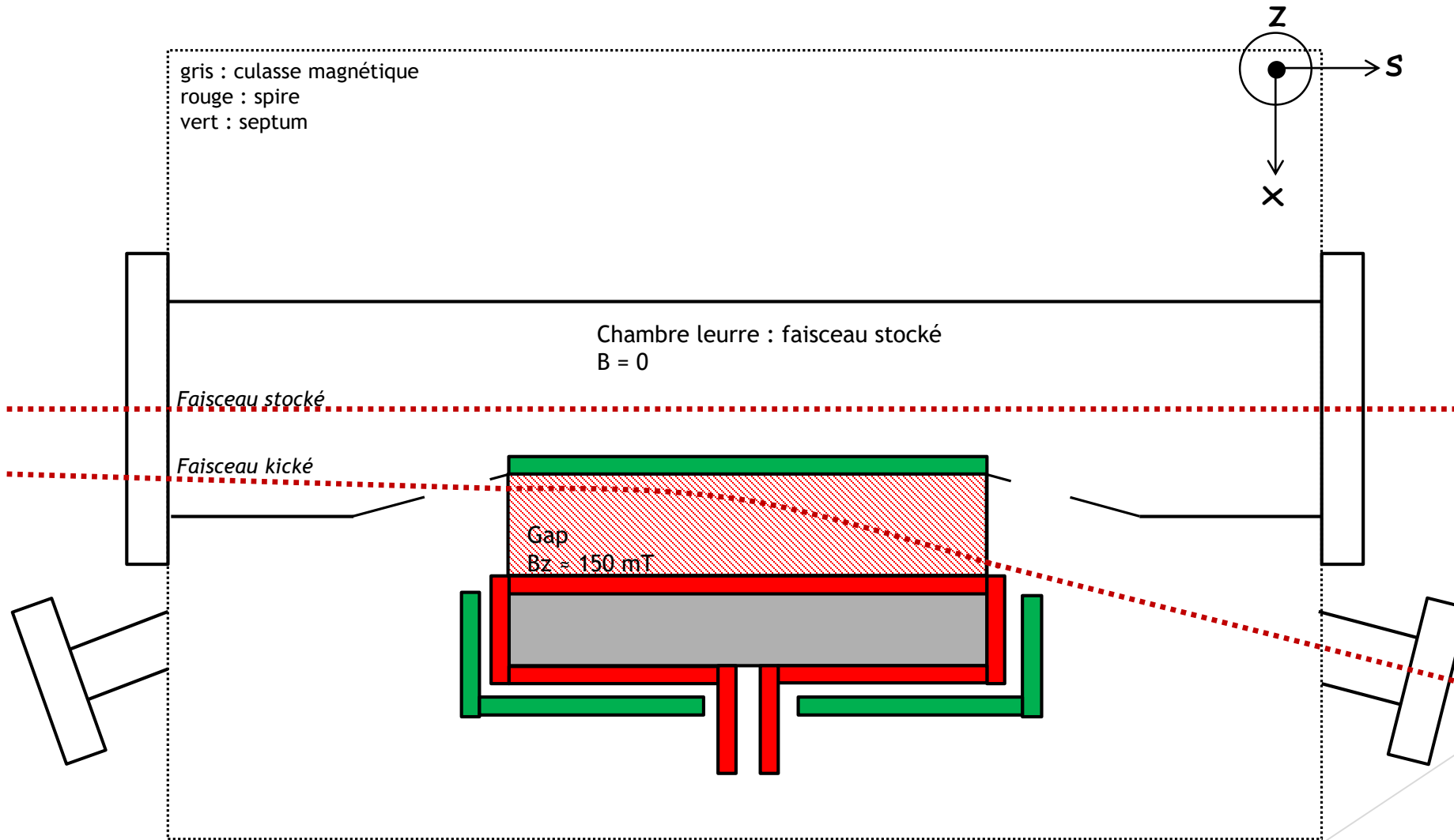
Eléments pulsés : principales caractéristiques - Aimant à septum passif

Coupe transverse schématique.



Eléments pulsés : principales caractéristiques - Aimant à septum passif

Coupe longitudinale schématique.



Eléments pulsés : principales caractéristiques - Aimants kickers.

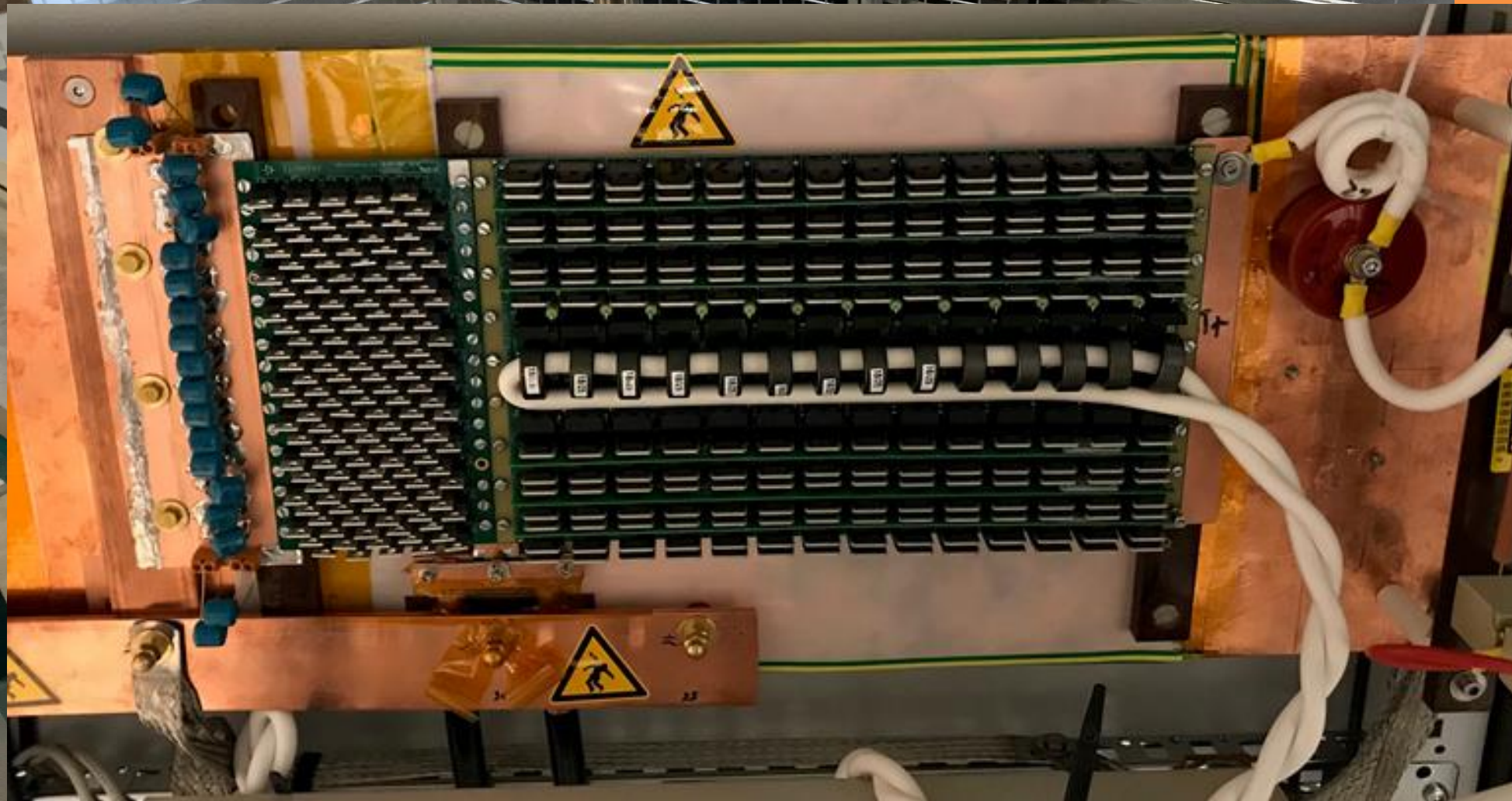
Energie du paquet	50 MeV	70 MeV
Rigidité magnétique (Bp)	166.66 10 ⁻³ Tm	233.33 10 ⁻³ Tm
Déviaton nominale (Θ)	13 mrad	
Déviaton maximale (Θ)	15 mrad	
Longueur utile de l'aimant (L _{utile})	2 x 0.100 m	
Champ magnétique requis, avec déviaton nominale	10.8 mT	15.2 mT
Champ magnétique requis , avec déviaton maximale	12.5 mT	17.5 mT
Beam Stay Clear Horizontal CàV	40 mm	
Beam Stay Clear Vertical CàV	28 mm	
Ouverture verticale ferrite (h)	52 mm	
Ecart entre spires (w)	52 mm	
Courant crête théorique (dév. nom.)	474 A	664 A
Courant crête théorique (dév. max.)	547 A	766 A
Inductance propre aimant (L)	2 x 152 nH	
Fréq. de répétition des impulsions	50 Hz	
Trise (& Tfall)	60 ns (impulsion semi-sinus)	
Tension max. pulser	14 kV	
Tension max. aimant	+/- 3.5 kV	
Ripple après impulsion	< 5 % Bcrête.	
Reproductibilité des impulsions	< 10 ⁻³	

Eléments pulsés : principales caractéristiques - Aimants à septum passif

Energie du paquet	50 MeV	70 MeV
Rigidité magnétique (Bρ)	166.66 10 ⁻³ Tm	233.33 10 ⁻³ Tm
Déviaton nominale (θ)	160 mrad	
Déviaton maximale (θ)	170 mrad	
Longueur utile de l'aimant (L _{utile})	0.250 m	
Champ magnétique requis, avec déviaton nominale	106.7 mT	149.3 mT
Champ magnétique requis , avec déviaton maximale	113.4 mT	158.7 mT
Beam Stay Clear H & V CàV	27.5 mm x 28 mm	
Longueur bride à bride (enceinte)	650 mm	
Gap aimant (HxV)	40 mm x 12 mm	
Courant crête théorique (dév. nom.)	1098 A	1537 A
Courant crête théorique (dév. max.)	1167 A	1633 A
Inductance propre aimant (L)	2 μH	
Fréq. de répétition des impulsions	50 Hz	
T _{pulse}	140 μs (impulsion sinus bipolaire)	
Tension max. système	300 V	
Champ de fuite faisceau stocké	< 10 ppm Bcrête	
Reproductibilité des impulsions	< 10 ⁻³	
Pressions finales (leurre & enceinte)	10 ⁻¹⁰ mbar	
Taux de fuite enceinte	< 10 ⁻¹⁰ mbar/l/s	

Spéc

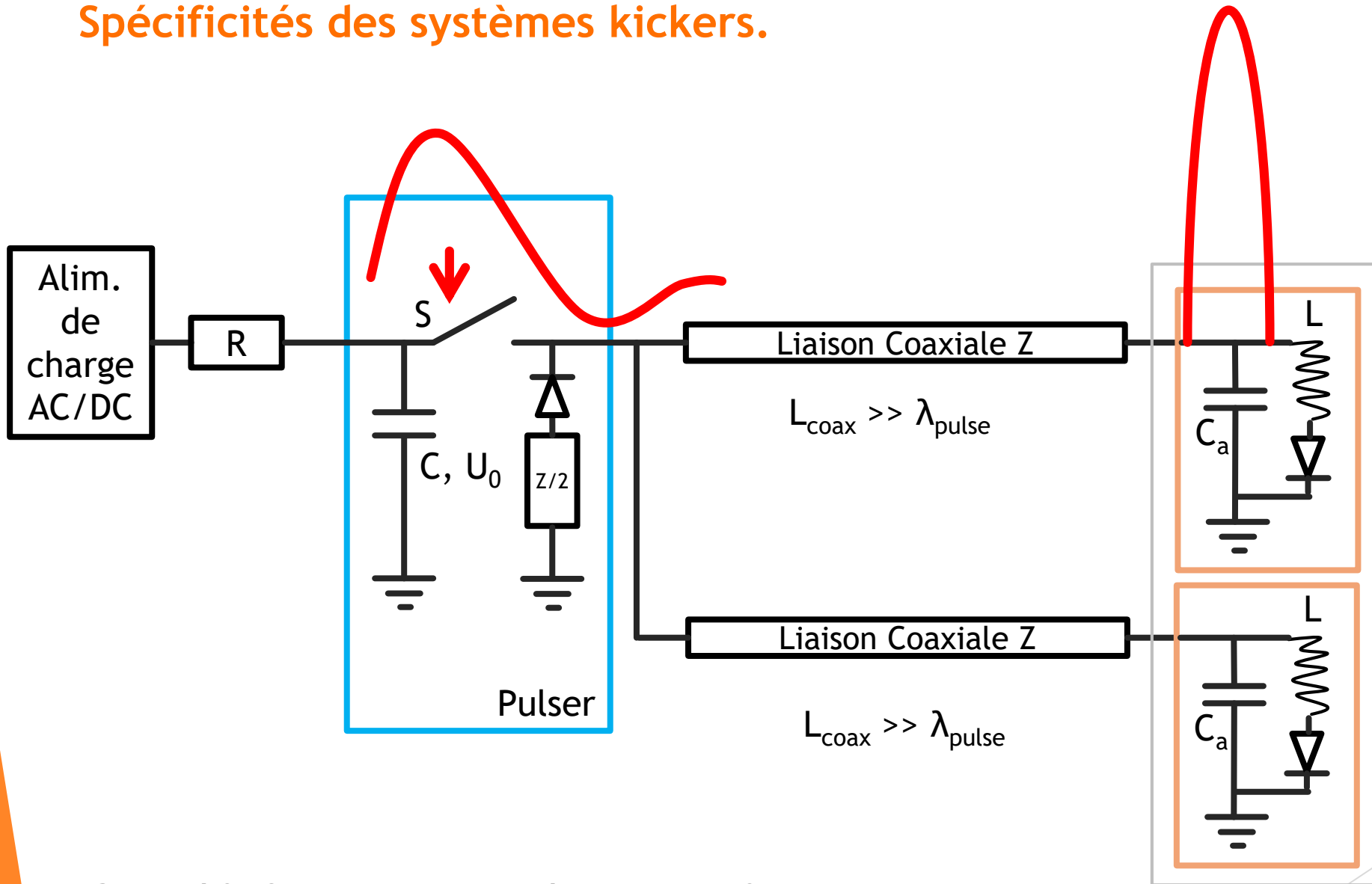
Alim.
de
charge
AC/DC



Injection



Spécificités des systèmes kickers.



$Z_{\text{aimant}} \ll Z_{\text{coax}}$
 Aimant = court-circuit HF

$I_{\text{aimant, max}} = k \cdot I_{\text{incident}}$
 avec $1 < k < 2$

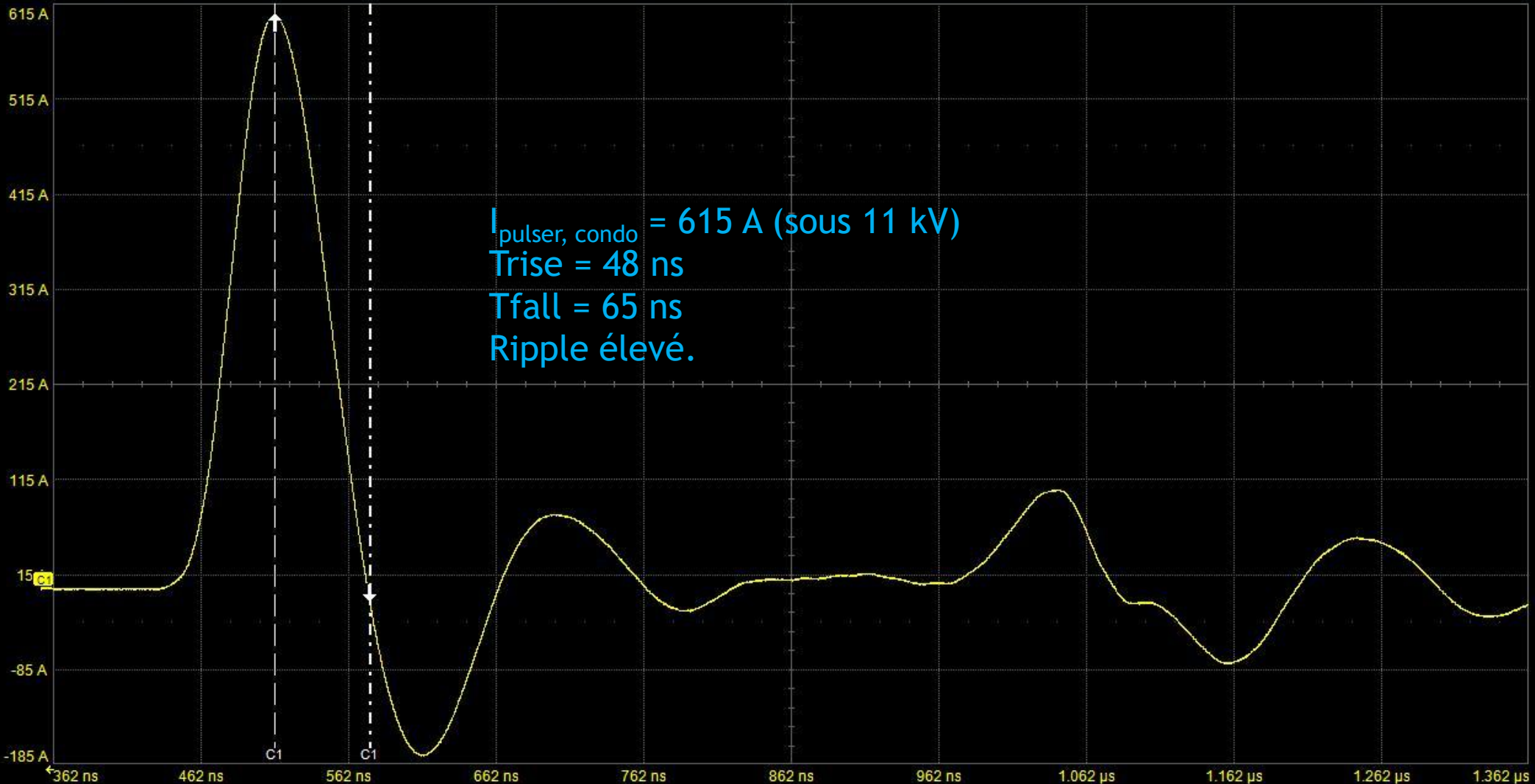
$L + C_a$ circuit résonant soumis à une impulsion. On accorde C_a pour que l'impulsion ré-oscille. Gain en Trise et Tfall et Icrête.
 La diode coupe pour obtenir un beau sinus.

Aimant 2

$R \sim 10 \text{ k}\Omega$, $C \sim 2.5 \text{ nF}$, $U_0 = 13 \text{ kV}$, $Z = 12.5 \Omega$,
 $L = 152 \text{ nH}$, $C_a = 1 \text{ à } 3 \text{ nF}$, $L_{\text{coax}} = 50 \text{ m}$.



S



$I_{\text{pulser, condo}} = 615 \text{ A (sous 11 kV)}$
 Trise = 48 ns
 Tfall = 65 ns
 Ripple élevé.

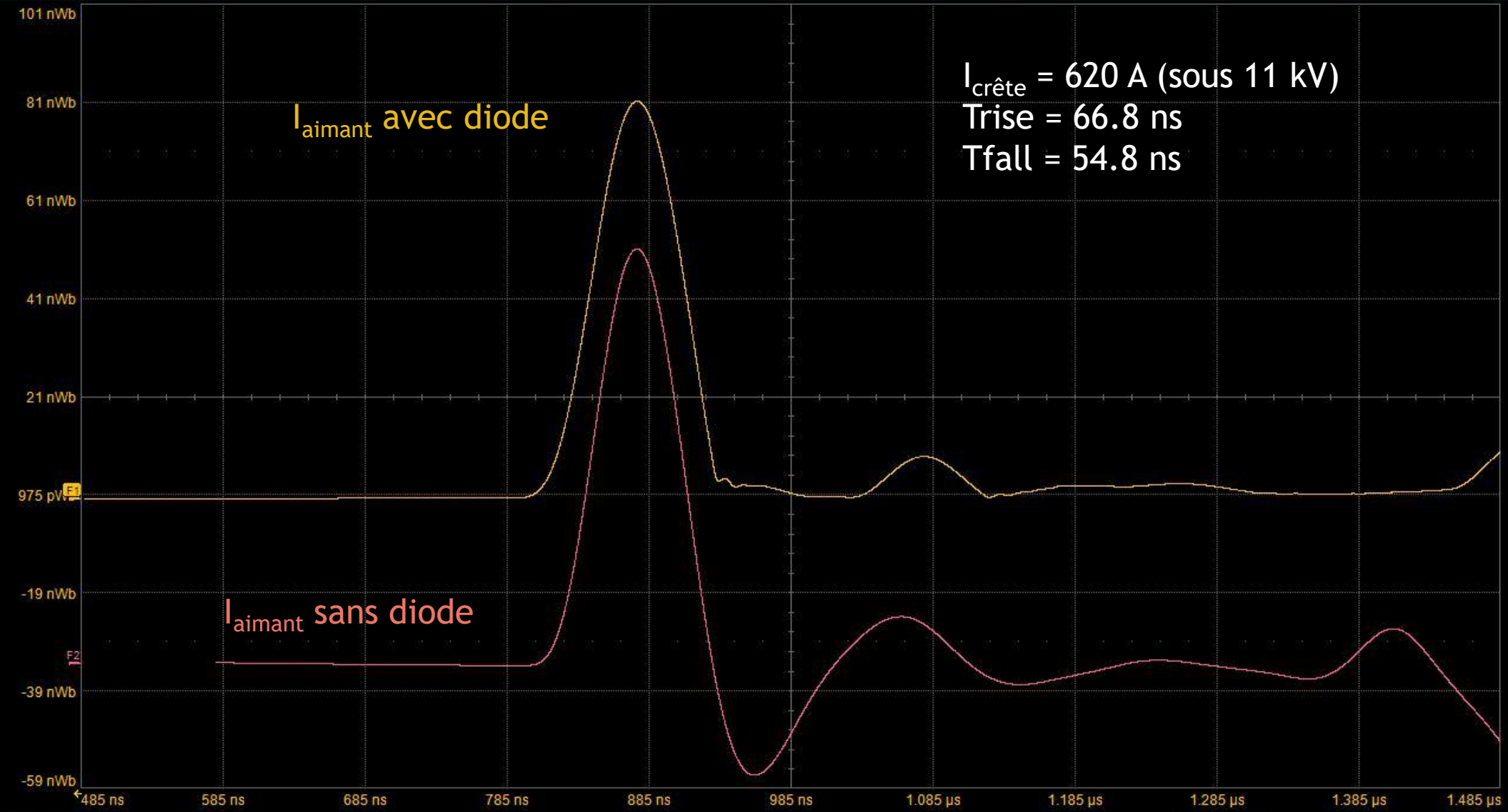
C1	100 A/div
	-215.00 A
	-15.04 A
	602.08 A
Δy	617.11 A

HD	Tbase	-862 ns	Déclench	Ext	DC
12 Bits	100 ns/div	10 GS/s	Arrêter	379 mV	
	10 kS	10 GS/s	Front	Positive	
X1=	576.8 ns	$\Delta X=$	-64.6 ns		
X2=	512.2 ns	1/ $\Delta X=$	-15.48 MHz		



S

Fichier Vertical Base de temps Déclenchement Affichage Curseurs Mesure Math Analyse Utilitaires Support



F1	intg(C3)	F2	intg(C4)	+
20.0 nWb	100 μWb			
100 ns/div	100 ns/div			

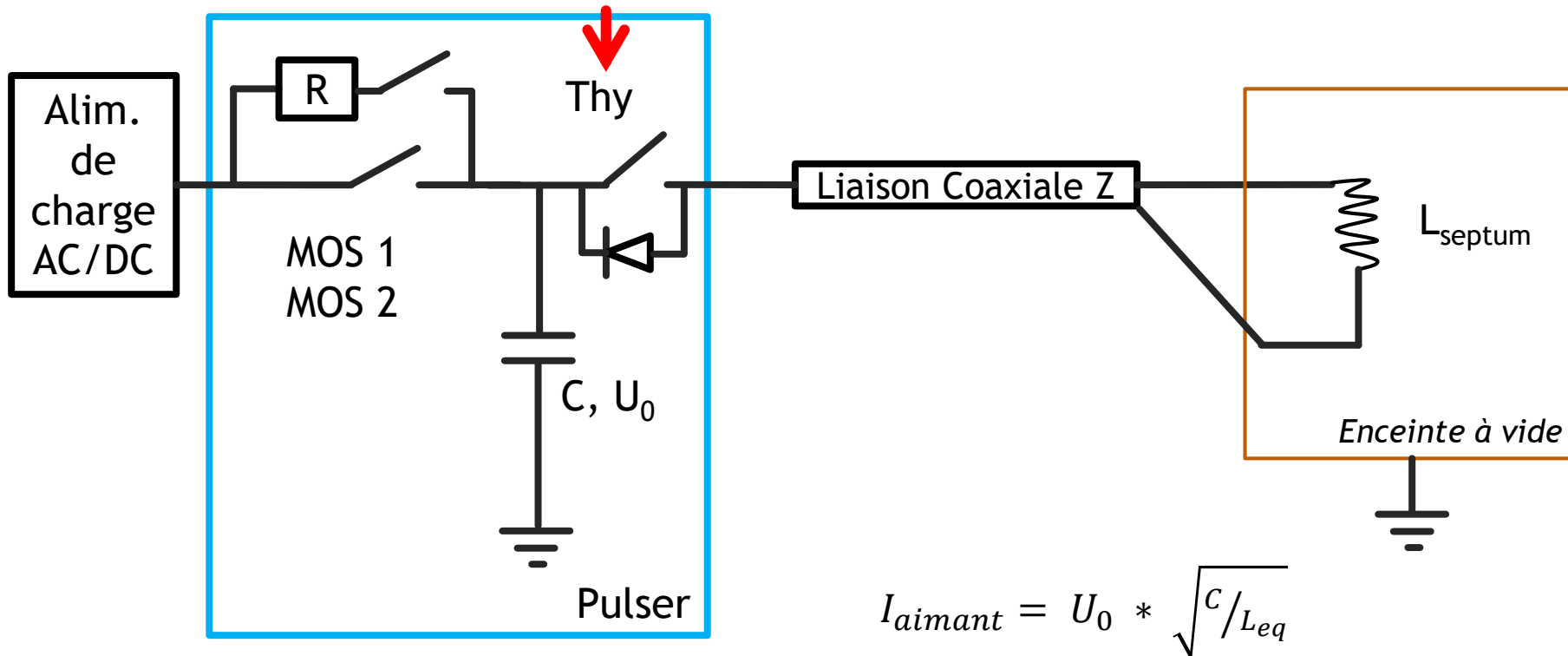
HD	Tbase	-988 ns	Déclend	Ext	DC
12 Bits	100 ns/div	Arrêter	397 mV		
10 kS	10 GS/s	Front	Positive		

TELEDYNE LECROY

21-Mar-19 10:35:24



Spécificités du système septum passif.

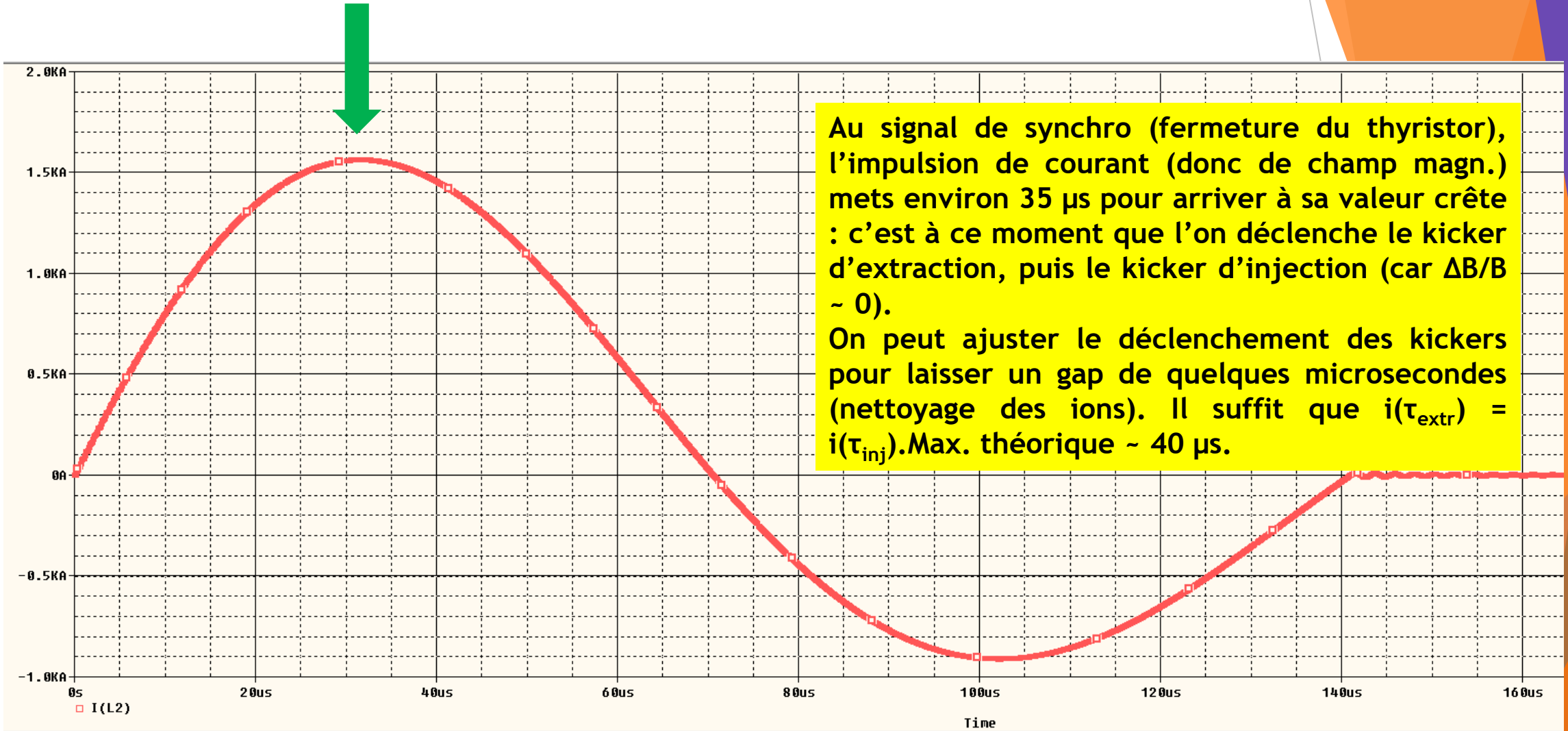


$$I_{aimant} = U_0 * \sqrt{C / L_{eq}}$$

$R \sim 5\Omega$, $C \sim 250 \mu F$, $U_0 = 300 V$, $L = 2 \mu H$, $L_{coax} = 10 \text{ à } 20 m$, $Z = 2 \Omega$



Spécificités du système septum passif.



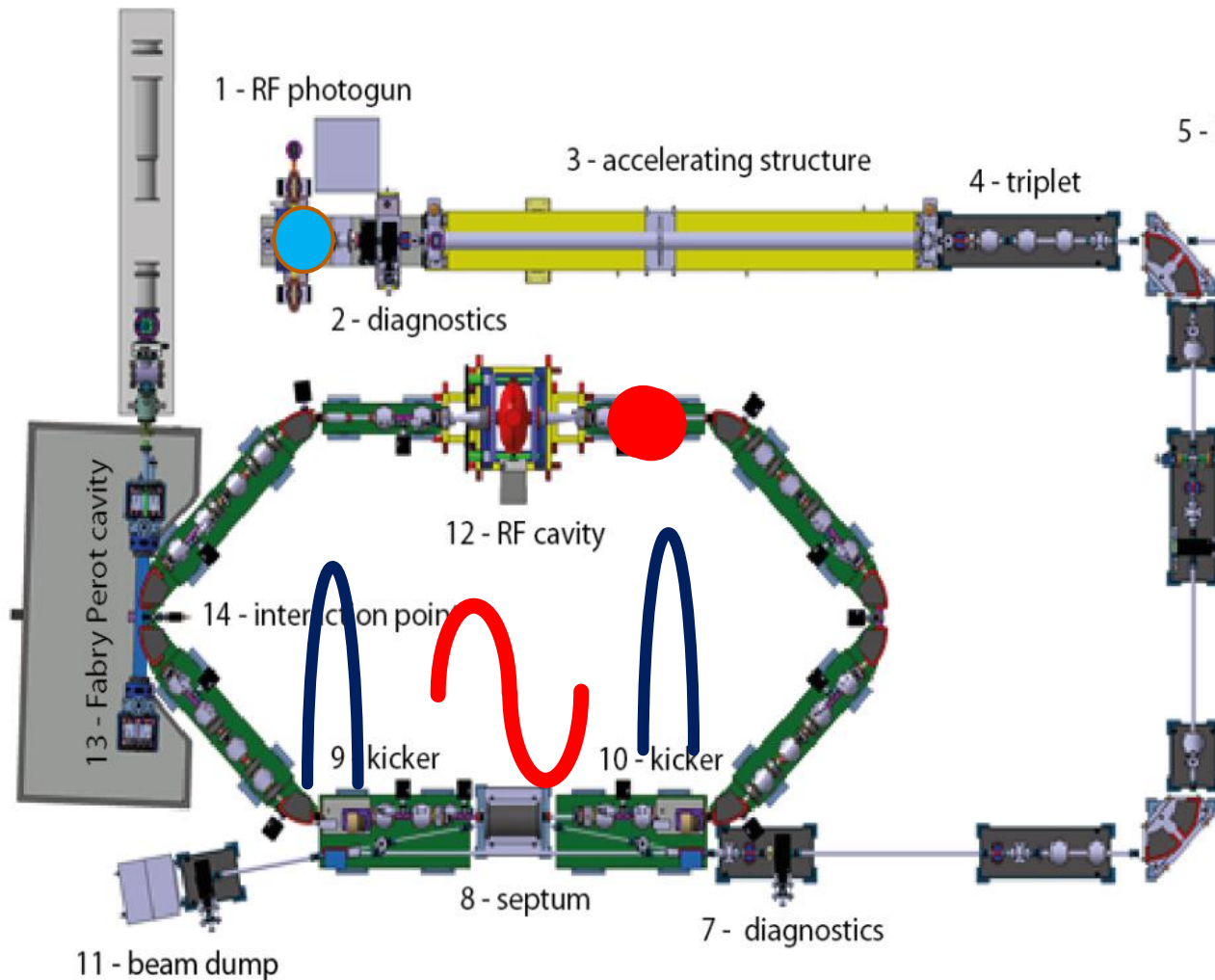
Au signal de synchro (fermeture du thyristor), l'impulsion de courant (donc de champ magn.) mets environ 35 μ s pour arriver à sa valeur crête : c'est à ce moment que l'on déclenche le kicker d'extraction, puis le kicker d'injection (car $\Delta B/B \sim 0$).
On peut ajuster le déclenchement des kickers pour laisser un gap de quelques microsecondes (nettoyage des ions). Il suffit que $i(\tau_{extr}) = i(\tau_{inj})$. Max. théorique $\sim 40 \mu$ s.



Fonctionnement des cycles d'injection - extraction.

- ▶ Un système pulsé (kicker ou septum) travaille en 2 phases :
- ▶ **Le tir** : phase « brutale » et rapide (décharge des condensateurs C de stockage d'énergie : kickers $< 1 \mu\text{s}$ & septum $< 200 \mu\text{s}$)
- ▶ **La recharge** : recharge lente des condensateurs, à la bonne valeur de tension, avant le tir suivant ($< 20 \text{ ms}$).
- ▶ Il faut tirer au bon moment pour dévier les électrons. **Synchro primordiale !**
- ▶ On va regarder un cycle complet d'injection-extraction dans la machine, en supposant qu'il y a déjà un paquet stocké.
- ▶ On fera donc une extraction, puis une injection.
- ▶ On laisse un gap entre les deux phases pour le nettoyage des ions.

Fonctionnement des cycles d'injection - extraction.



- ▶ On déclenche le pulser de septum passif. Temps de montée du champ magnétique 35 μ s.
- ▶ On déclenche le kicker extraction au tour n-1.
- ▶ Le faisceau est extrait.
- ▶ Gap pour nettoyage des ions (qq. μ s). Le kicker extraction s'éteint.
- ▶ Paquet généré par la photocathode et déclenchement kicker injection.
- ▶ Transfert et injection.
- ▶ Le kicker injection s'éteint en moins d'un tour.
- ▶ Début de la recharge des pulsers.
- ▶ C'est assez simple sur le papier...

Sécurités machine et personnes.

▶ Interlock PSS

- Coupure des alimentations AC/DC de charge des pulsers : élimine le risque électrique HT sur les baies de pulsers et sur les aimants. Sécurité du personnel vis-à-vis du risque électrique et radioprotection.

▶ Interlock Machine

- Inhibition de la synchronisation de déclenchement au niveau des pulsers. Interdit le tir pour l'injection.

▶ Conception vis-à-vis du risque électrique :

- Indice de protection : IP2X (BT) et IP3X(HTA).
- Procédures de travail pour interventions & travaux sur les alimentations AC/DC de charge, les pulseurs et les aimants.

Etat actuel de la fabrication.

- Nombreux sous-ensembles conçus d'après specs. SOLEIL et fabriqués par SigmaPhi (Vannes).

Sous-éléments	Etat
Mécanique hors vide aimant à septum passif	Reçue à SigmaPhi.
<u>Enceinte à vide</u>	<u>Deux défauts mécaniques de fabrication. Validation UHV à faire. Livraison fin Avril 2019.</u>
Aimant à septum passif	Testé électriquement. Mesuré magnétiquement partiellement.
Câbles coaxiaux	Reçus, prêts à tirer.
Pulser & alim. de charge	Assemblé, testé et validé chez SigmaPhi.

Sous-éléments	Etat
<u>Aimants kickers & châssis.</u>	<u>Reçus, validés électriquement et magnétiquement sans CàV.</u>
<u>Chambres à vide des kickers</u>	<u>Livraison fin Avril 2019.</u>
Câbles coaxiaux	Reçus, prêts à tirer.
Ensembles de commutation HT	Reçus et testés.
Baies de pulsers	Reçues.
Tiroirs de pulsers	Reçus.
Mécaniques des tiroirs	A fabriquer.
Sondes de mesures aimants.	A fabriquer.
Alimentations HT de charge.	A commander.
Cartes diodes aimants.	En cours de routage.

Planning résumé.

- ▶ SigmaPhi finalise l'assemblage de l'aimant à septum passif dans une enceinte validée mécanique et UHV (avril 2019).
- ▶ SigmaPhi doit livrer les chambres à vide des kickers : mesures magnétiques finales & métrologie des chambres par SOLEIL (mai 2019).
- ▶ SOLEIL doit assembler les baies & pulsers définitifs (mai à juin 2019).
- ▶ Métrologie des chambres à vide et enceinte septum passif en vue de l'installation, prévue courant juin / début juillet, permettant l'étuvage complet de ThomX au cours du mois d'août.
- ▶ Installation & câblage dans la foulée des pulsers et contrôle-commande.
- ▶ Tests électriques sans/avec contrôle-commande en septembre. Formation de M. Omeich.
- ▶ En attendant le faisceau !



Recettes sur les éléments pulsés.

- ▶ **Aimants** : vérifications des dimensions fonctionnelles, tests d'isolement électriques, tests en pulsé longue durée, mesures magnétiques avec CàV (mapping).
- ▶ **Chambres à vide et enceinte** : montage équipements vide (PI, jauges), pompages, étuvages, tests de fuite, RGA.
- ▶ **Pulsers** : vérifications sécurités électriques, tests en pulsé longue durée.
- ▶ **Métrologie** : mesurer les ouvertures & positions des chambres & enceinte et parties fonctionnelles des aimants en vue de les aligner sur la machine.

Installation (courant juin à juillet & septembre).

- ▶ **Installation des aimants** : châssis kickers & CàV, aimant à septum passif complet, pré-alignement & alignement, préparation à la mise sous vide & étuvage. Vérification d'alignement après étuvage ? Nécessite l'ouverture du toit de la casemate. Si zone activée, classement des personnels SOLEIL ?
- ▶ **Installation des pulsers** : préalablement testés à SOLEIL. Baies 30 à 33 dans l'igloo. Tirage des équipotentielles manquantes, tirages des câbles coax. de puissance, tirages des câbles de contrôle commande inter baies par SOLEIL.
- ▶ **Mise en service en local** : vérifications sécurités électriques, vérifications connexions terre. Mise sous tension des pulsers. Tests pulsés en contrôle local. Habilitations électriques des personnels SOLEIL ?
- ▶ **Mise en service avec contrôle-commande** : vérifications des remontées des signaux (analogiques & numériques), vérification du pilotage à distance des alimentations de charge, vérifications déclenchements des pulsers et mesures de synchro (*par exemple : délai réel entre départ trigger de déclenchement & courant dans un aimant*).

Commissioning avec faisceau

- ▶ Réussir à injecter, puis extraire :
 - C'est synchroniser le passage des électrons avec la crête des impulsions de champ magnétiques des EP.
 - C'est ajuster la valeur crête de champ magnétique pour bien injecter & extraire.
 - Les deux grandes variables : tensions de charge U_0 et les délais de synchro.
- ▶ Calcul des délais théoriques, mesures des délais réels avec synchro (« top départ » jusqu'à la crête des impulsions), scans avec faisceau.
- ▶ **Réglages fins** : formes d'ondes des kickers : effets des queues d'impulsions / rebonds dues aux erreurs d'adaptation d'impédance.
- ▶ **Intégrer le nettoyage des ions** -> trouver les bonnes valeurs de champs magnétiques septum et ajuster les délais des kickers.
- ▶ Vérifier les montées en température des chambres à vide kicker et septum passif.
- ▶ Vérifier les pertes à l'injection/extraction une fois les réglages définis.
- ▶ Préparer la montée en énergie : tracer $U_0 = f(E_{\text{faisceau}}, \text{rendements})$.

Contrôle-commande

▶ Synchro de déclenchement des EP :

- C'est primordial.

▶ Automate EP :

- Gère les signaux lents (analogiques, TOR) d'état des éléments pulsés (états contacts de porte, présence des alims auxiliaires, états AU, etc...).
- **Gère le contrôle des 3 alimentations HT AC/DC (Technix & FuG) par liaison Profibus.**
- Permet des remise à zéro des défauts.
- Traite les températures des CàV des kickers et du septum passif.
- Ne gère pas l'aspect UHV de l'enceinte du septum passif.

▶ Oscilloscope :

- Outil de supervision des allures des impulsions de courant dans les 3 aimants pulsés.
- Utilisés surtout pour le réglage d'injection/extraction.
- Vérifications périodiques des formes d'onde.
- *Pas nécessaire de faire l'acquisition et le traitement des 50 impulsions en fonctionnement normal.*

Maintenances et pannes

► Maintenance :

- Dépoussiérage annuel et vérifications serrages connectique de puissance.
- Shift : vérifier périodiquement l'allure des formes d'onde de courant.

► Pannes :

- Tiroirs pulsers complets de rechange.
- Diagnostic de panne suivant protocole:
 - Présence d'interlocks.
 - Fonctionnement de l'alim HT.
 - Charge des condensateurs.
 - Fonctionnement des semi-conducteurs et bon déclenchement.
 - Formes d'ondes dans l'aimant.

► *Les EP peuvent fonctionner très correctement mais l'injection/extraction ne pas réussir : erreur de consigne de tension, mauvaise énergie, erreurs de délais de synchro...*

Conclusions.

- ▶ **Les éléments pulsés d'injection-extraction de ThomX :**
 - C'est la confluence de presque tous les domaines technologiques des accélérateurs.
 - C'est en développement et fabrication depuis 2013, avec de très nombreuses péripéties.
- ▶ **2019 :**
 - Les systèmes kickers (pulsers + aimants) construits fonctionnent. En attente de finalisation avec les chambres à vide.
 - Le système septum passif (pulser + aimant) fonctionne. En attente d'intégration de l'aimant dans la CàV.
- ▶ **Encore des efforts à fournir pour avoir les EP installés à temps (recette des EP & contrôle-commande).**
- ▶ **Installation & mise en service prévus en juin et juillet 2019.**
- ▶ **Excitation du commissioning avec faisceau !**