



LES SOURCES DE NEUTRONS COMPACTES

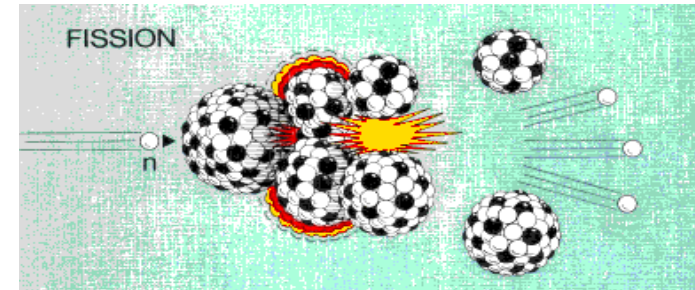
F. Ott

Laboratoire Léon Brillouin CEA/CNRS

Comment produire des neutrons ?

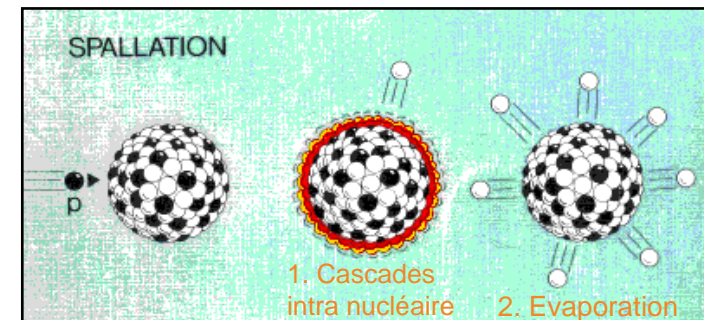
Réacteurs nucléaires

- A la limite de la technologie + risque nucléaire



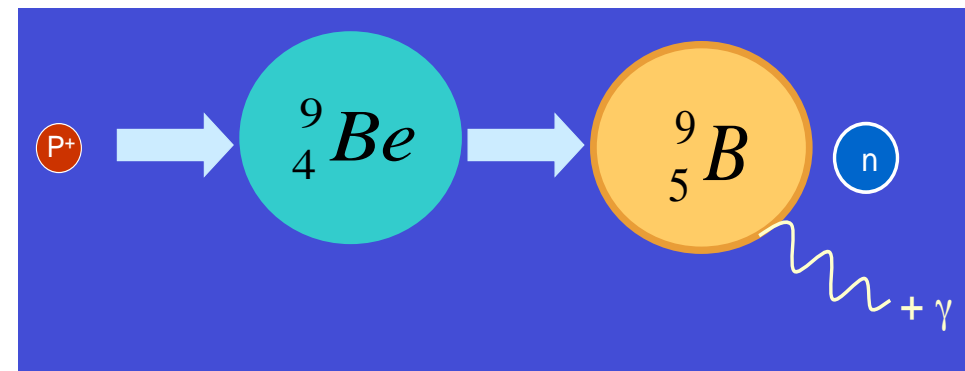
Spallation

- Des protons de haute énergie (1 GeV) excitent un noyau lourd (ex. W)
- Le noyau excité évapore des neutrons (**15 n/p**)



Stripping

- Des protons de basse énergie (3 – 60 MeV) arrachent un neutron à un noyau léger (ex. Be, Li)
- Efficacité (**0.01 à 0.1 n/p**)



QUID DU FLUX ?

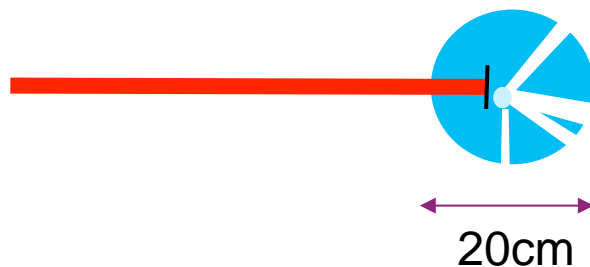
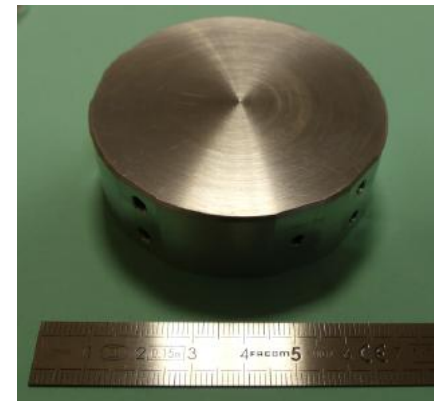
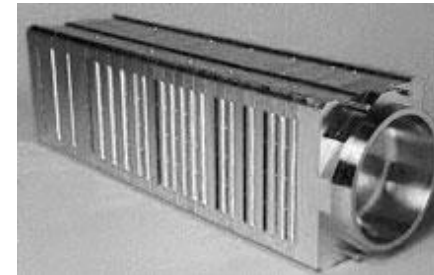
Comment on peut retomber sur nos pieds ?

Augmenter le courant de protons

- ISIS TS2 : $E = 0.8 \text{ GeV}$; $I = 50 \mu\text{A}$
- IPHI : $E = 3 \text{ MeV}$; $I = 100 \text{ mA}$

Optimiser l'ensemble cible-modérateur \rightarrow Maximiser la brillance

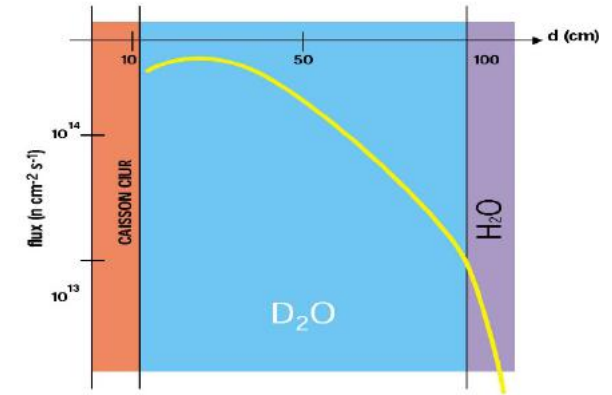
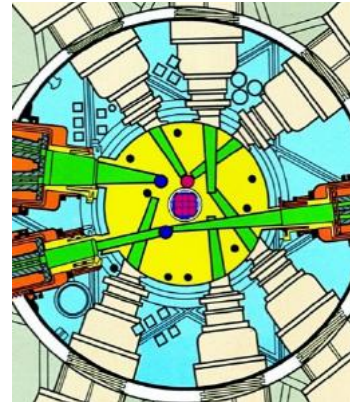
- ISIS target : $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$ (« tiny object »)
- IPHI : $50 \times 50 \times 1 \text{ mm}^3$ (1mm Be suffit)
- Rapport de volume : ~ 300
- Faire un ensemble cible modérateur aussi compact que possible \rightarrow maximiser la brillance



MAXIMISER LA BRILLANCE

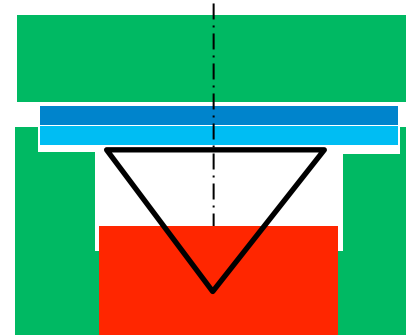
Réacteur

- cœur = 0.1 m³
- Bidon modérateur D₂O ~ 1m³



Spallation

- cible = 4 litres
- modérateur ~ 1 litre (faiblement couplé)



Réflecteur Be

Para-H2 thickness 1.5cm, diamètre $D_M = 15$ cm

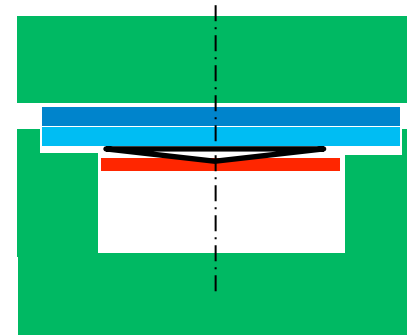
Premoderator H₂O

Thickness $e_{PM} = 2$ cm – diamètre $D_{PM} = 15$ cm

Angle solide = 1.2sr

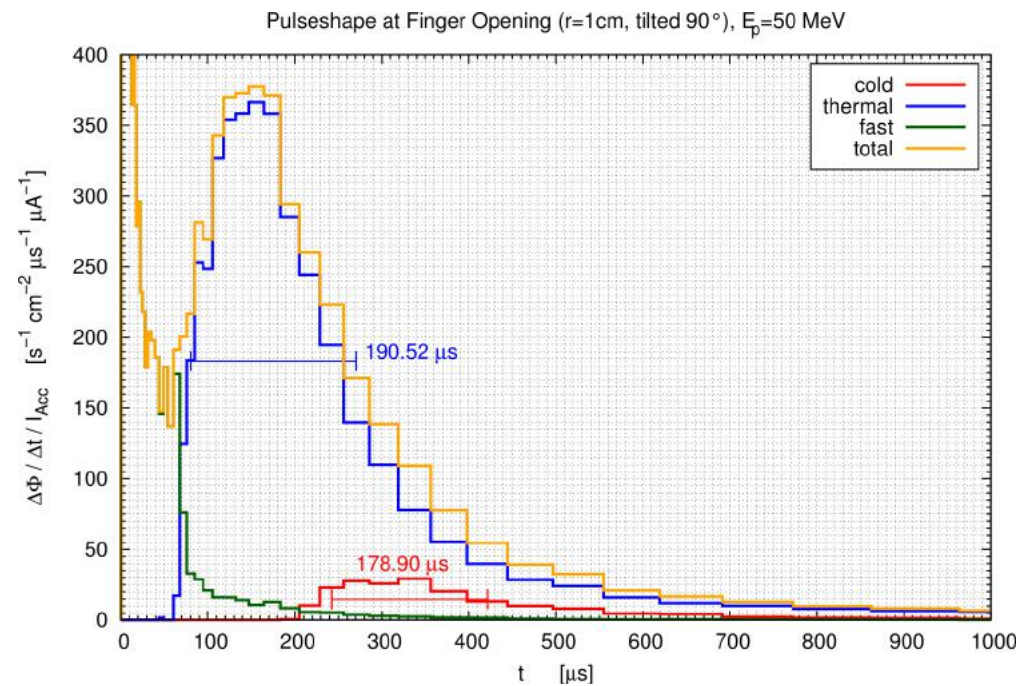
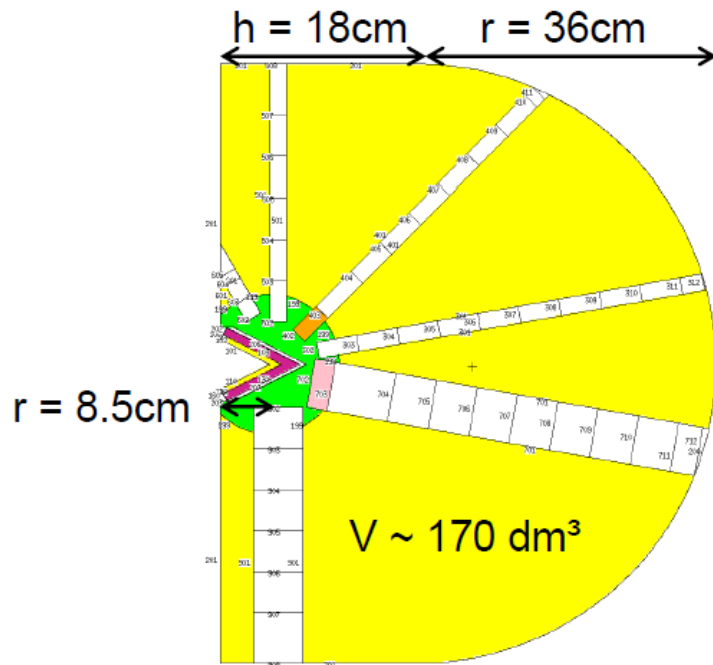
Stripping

- cible = 0.05 litres
- modérateur ~ 1 litre (couplé à 90%)



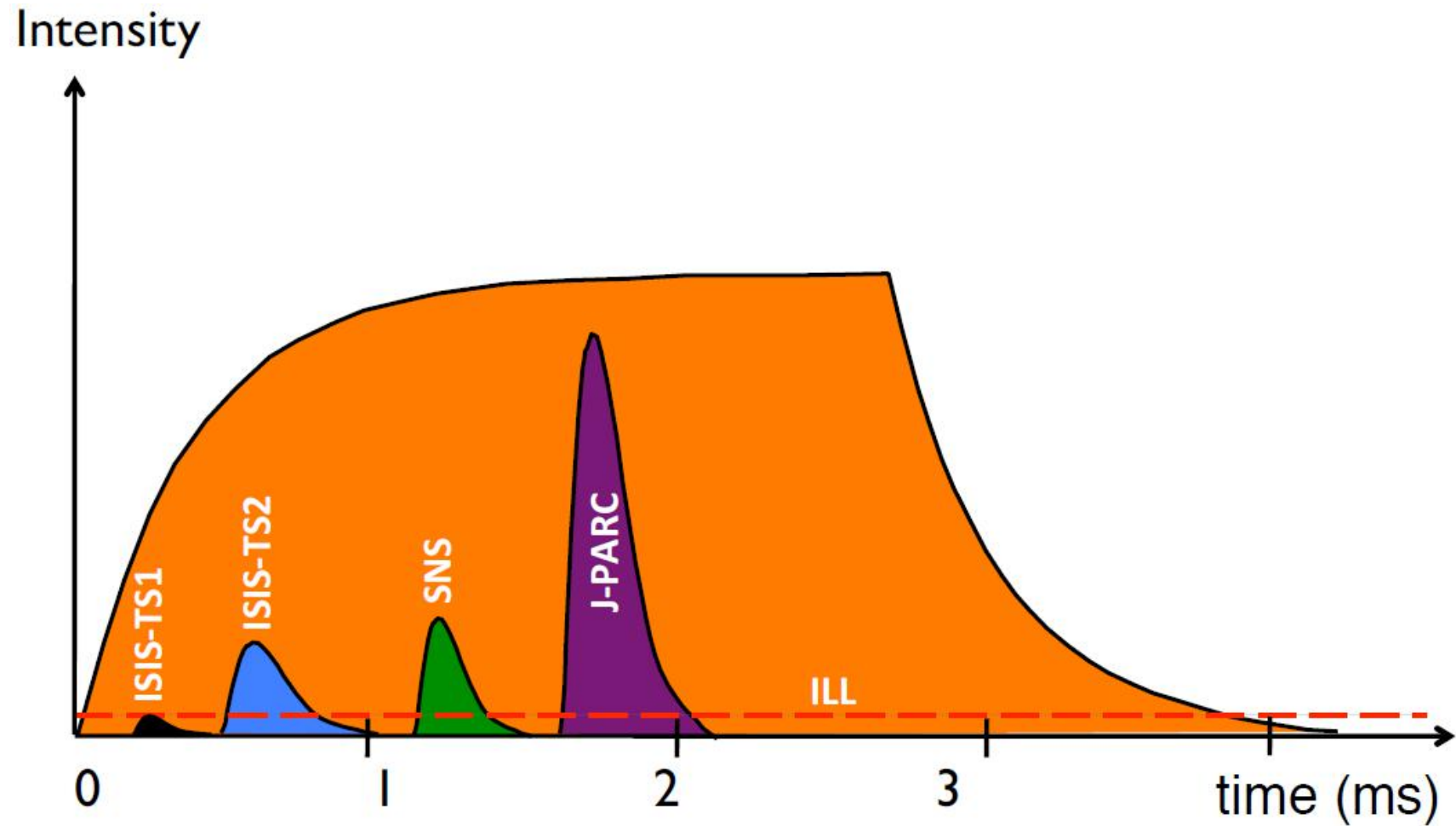
Angle solide = 6sr

MODERATEUR SUR UNE SOURCE COMPACTE



CONCEPT DE L'ESS

Sources à spallation à pulses longs



Avantages

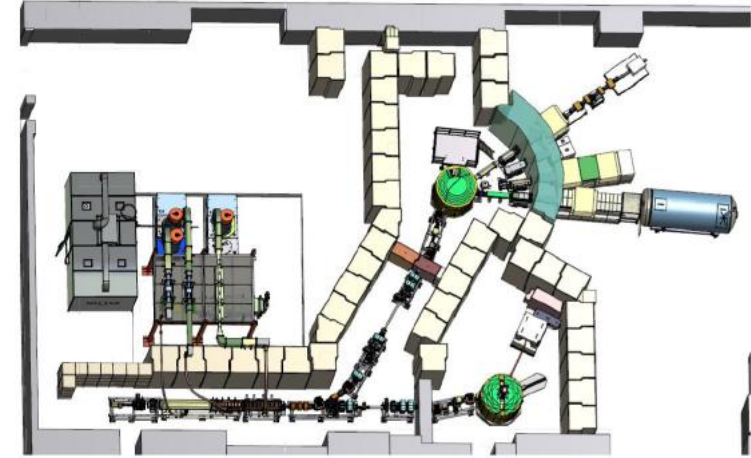
- Protons peu énergétiques (10MeV versus 1GeV)
 - Pas/peu de neutrons très rapides $E_n < E_p$
 - Spallation \rightarrow 1GeV / Stripping \rightarrow 30MeV
 - moins de bruit de fond secondaire
 - Blindage allégé (80cm au lieu de 6m)
 - La ligne échantillon démarre très prêt du modérateur
- Coûts réduits
 - Accélérateur de 10 à 20m versus 600m
- Probabilité de ne pas être INB (Installation Nucléaire de Base)

Inconvénients

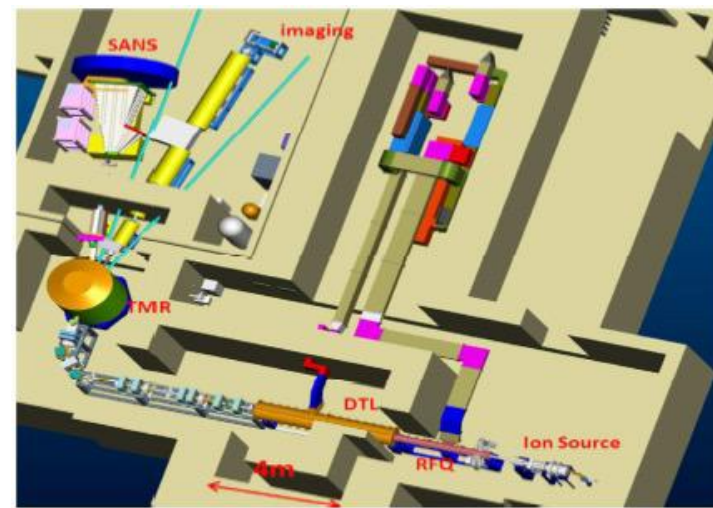
- Flux intrinsèquement limité: courant crête @100mA
- Difficulté de construire un accélérateur de fort courant

A QUOI CA PEUT RESSEMBLER ?

LENS (Univ Indiana)



CPHS (Chine)



RANS (Riken Japon)



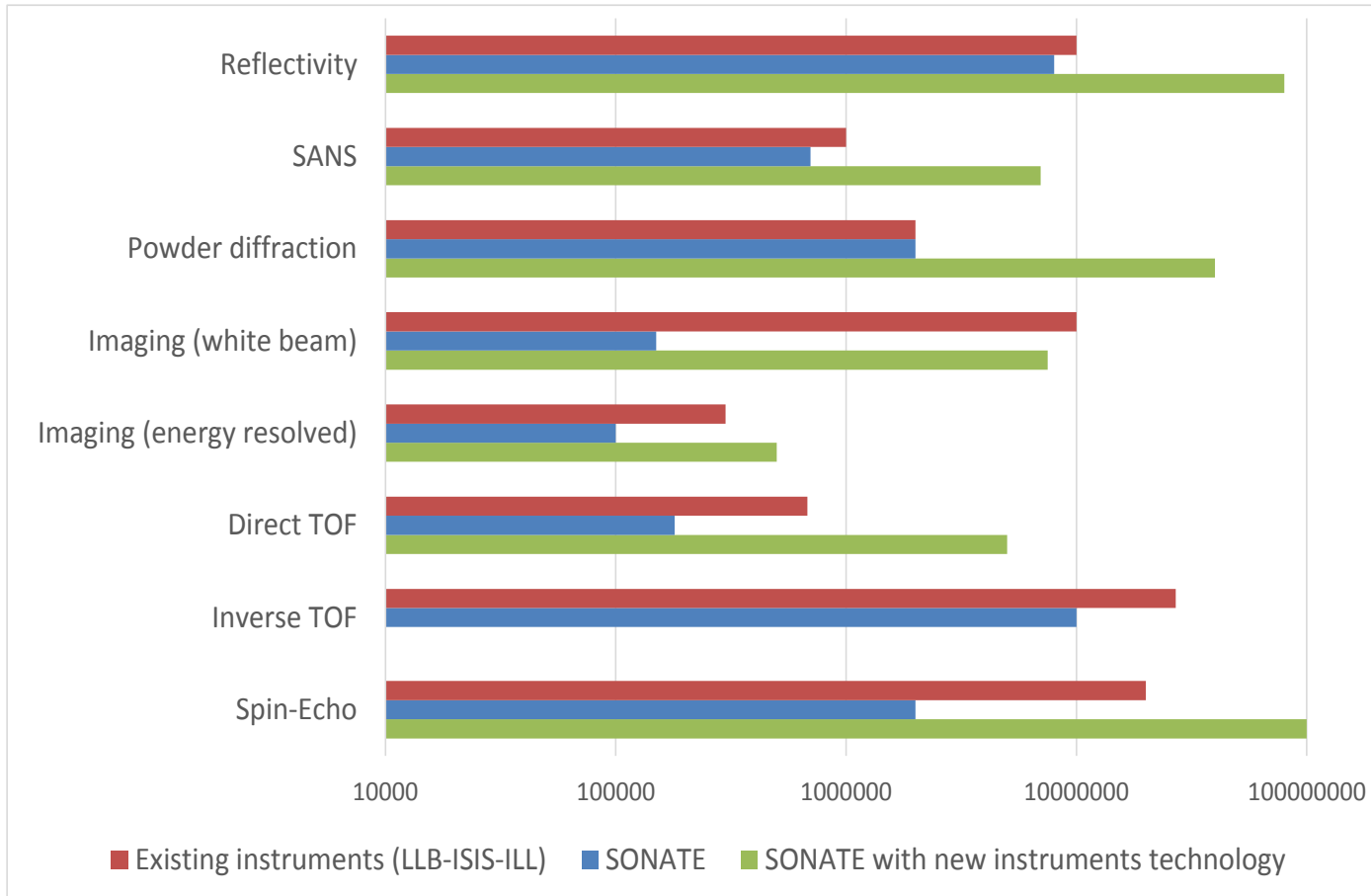
PERFORMANCES D'UNE SOURCE COMPACTE

Design de référence SONATE

■ $E_p = 20\text{MeV}$, $I_{\text{peak}} = 100\text{mA}$, duty cycle = 4%, $P = 80\text{kW}$

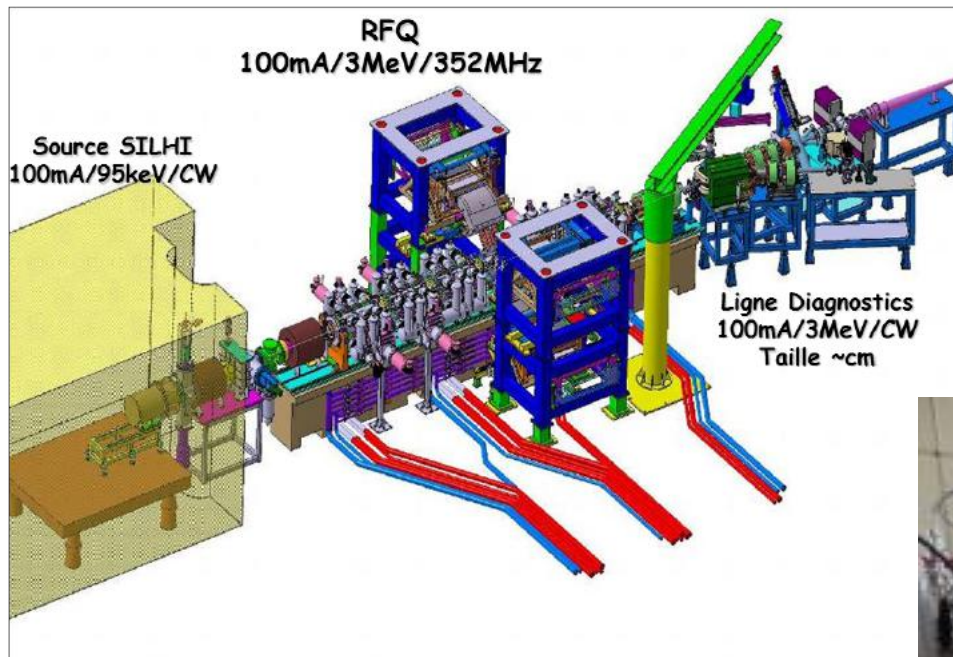
Technique	Flux on sample	Reference spectrometers	Potential gains
Reflectivity	0.8×10^7 n/s/cm ²	HERMES@LLB 1×10^7 n/s/cm ² POLREF@ISIS $\sim 1 \times 10^7$ n/s/cm ²	ESTIA@ESS concept x10 Advanced Deconvolution x3
SANS	0.7×10^6 n/s/cm ² (low Q) 2.2×10^6 n/s/cm ² (med Q) 6.7×10^6 n/s/cm ² (high Q)	PAXE@LLB (low Q) 0.7×10^6 n/s/cm ² SANS2D@ISIS 1×10^6 n/s/cm ²	Slit setup x10 Focusing optics for VSANS (small Q) x10
Powder diffraction	2×10^6 n/s/cm ²	G41@LLB 2×10^6 n/s/cm ²	Large solid angle detector (7C2 type) x20
Imaging (white beam)	1.5×10^6 n/s/cm ² (for L/D = 240) 1.3×10^7 n/s/cm ² (for L/D = 80)	ICON@PSI 1×10^7 n/s/cm ² CONRAD@PSI 1×10^7 n/s/cm ² (for L/D = 240)	MCP detectors x5 Coded Source Imaging x10
Imaging (time resolved)	1×10^5 n/s/cm ² (for L/D = 500) dI/I = 1%	ANTARES@FRM2 5×10^5 n/s/cm ²	
Direct TOF	3×10^4 n/s/cm ² (thermal) 1.8×10^5 n/s/cm ² (cold)	IN5@ILL 6.8×10^5 n/cm ² /s	MUSHROOM (LETx70 on single crystals)
Inverse TOF	1×10^7 n/cm ² /s	OSIRIS@ISIS 2.7×10^7 n/cm ² /s	
Spin-Echo	2×10^6 n/s/cm ²	MUSES@LLB 2×10^7 n/s/cm ² (at 5A°)	Multi-MUSES (x70)

■ Confirmé par des calculs indépendants (JNCS et ESS-B)



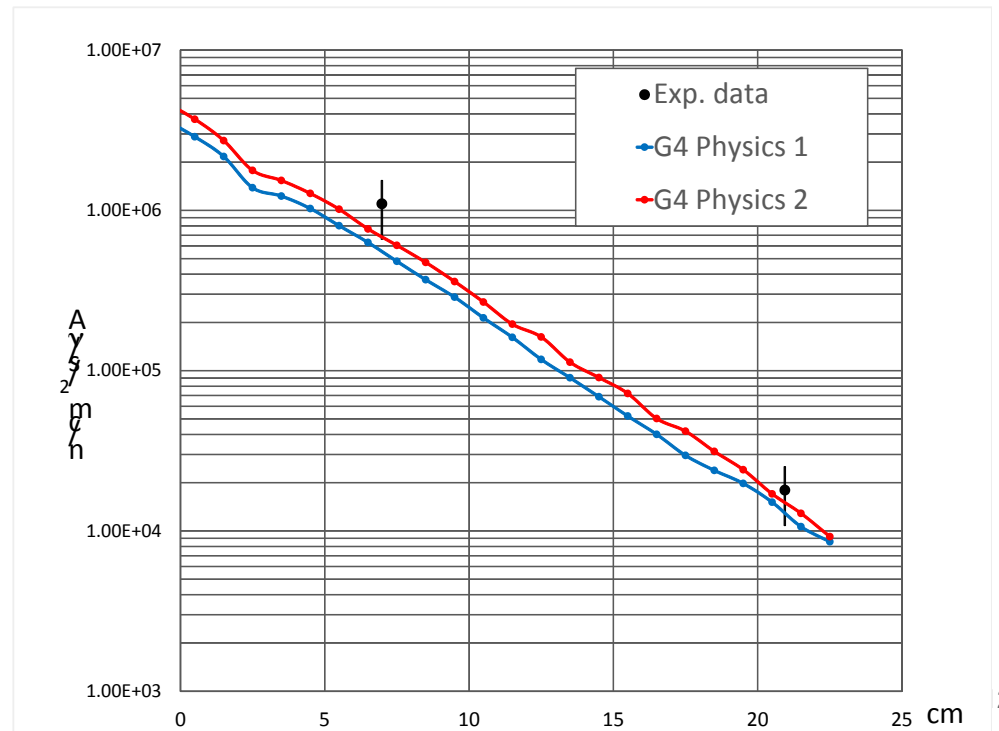
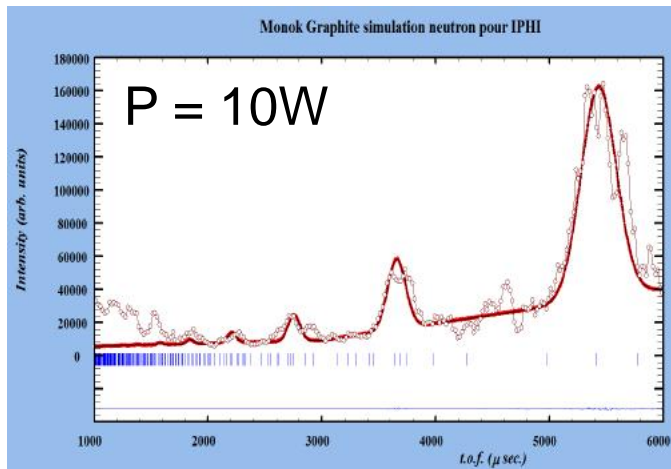
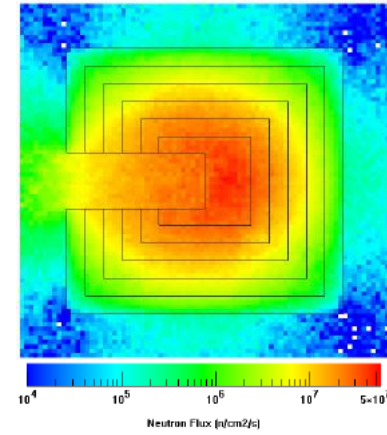
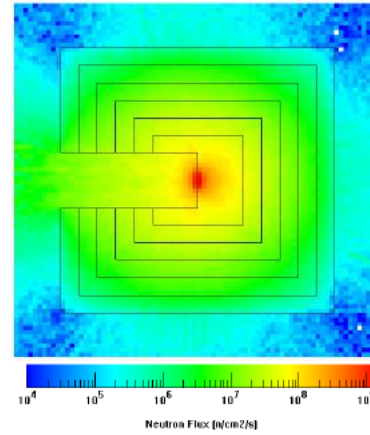
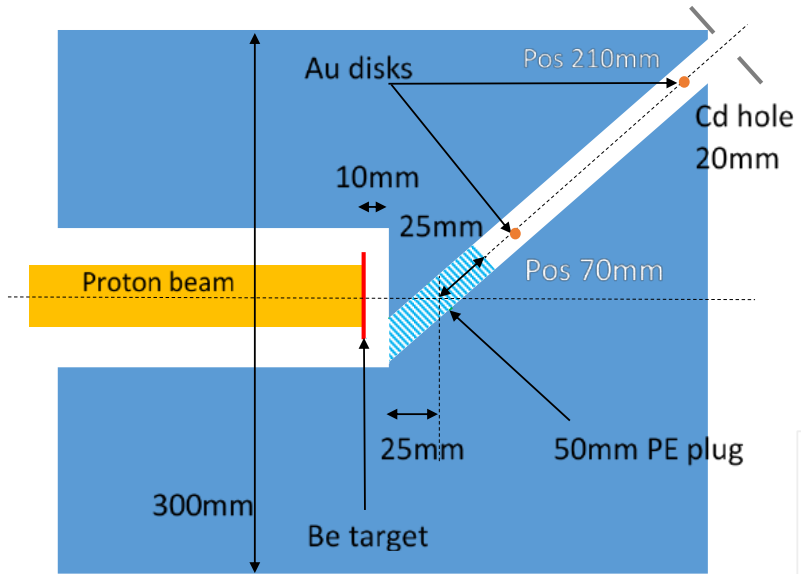
PREMIERS TESTS A SACLAY

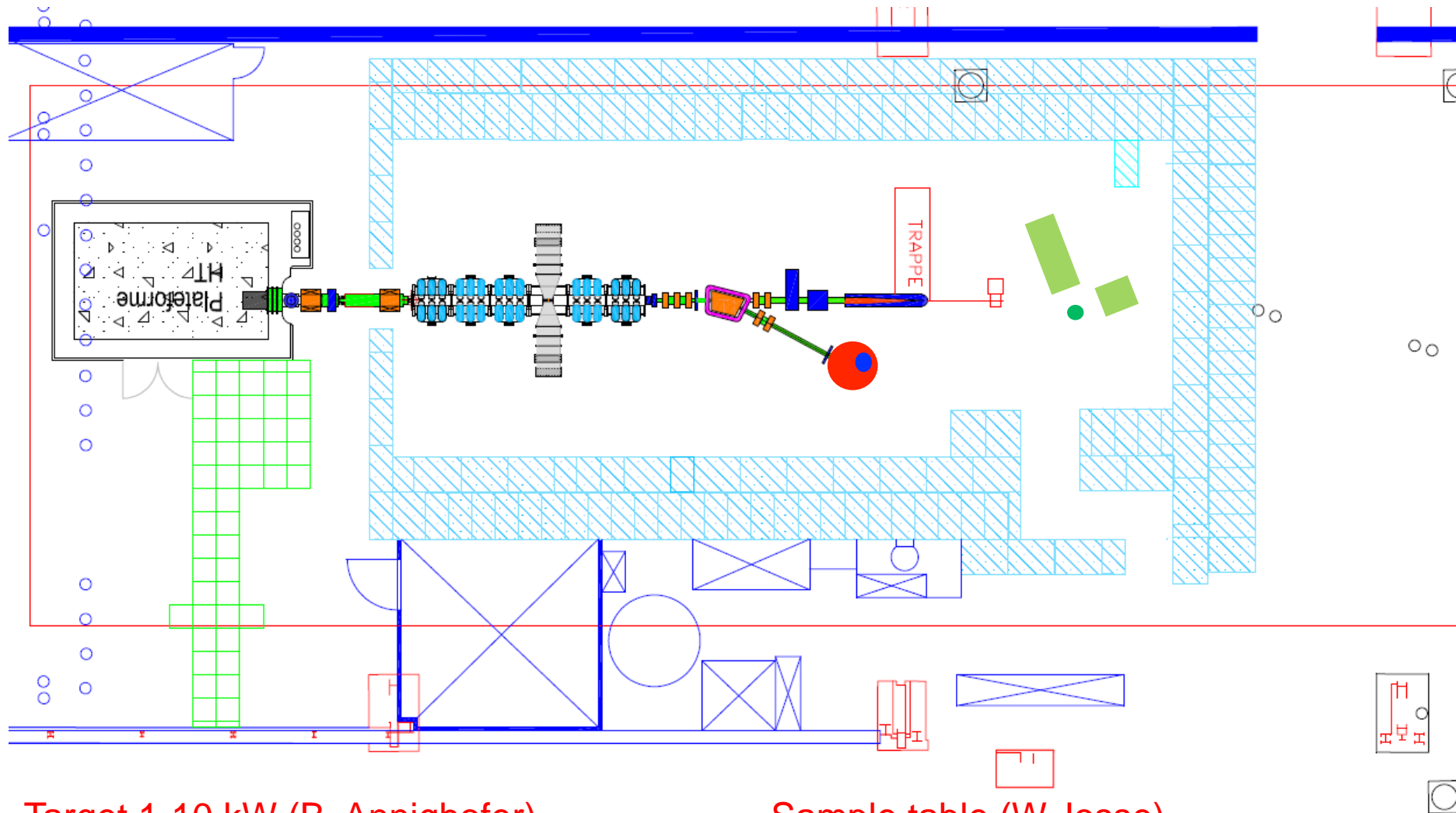
Accélérateur IPHI@Saclay: 3MeV - 100mA pic



Opération à **10W**
Pour ne pas produire trop de neutrons

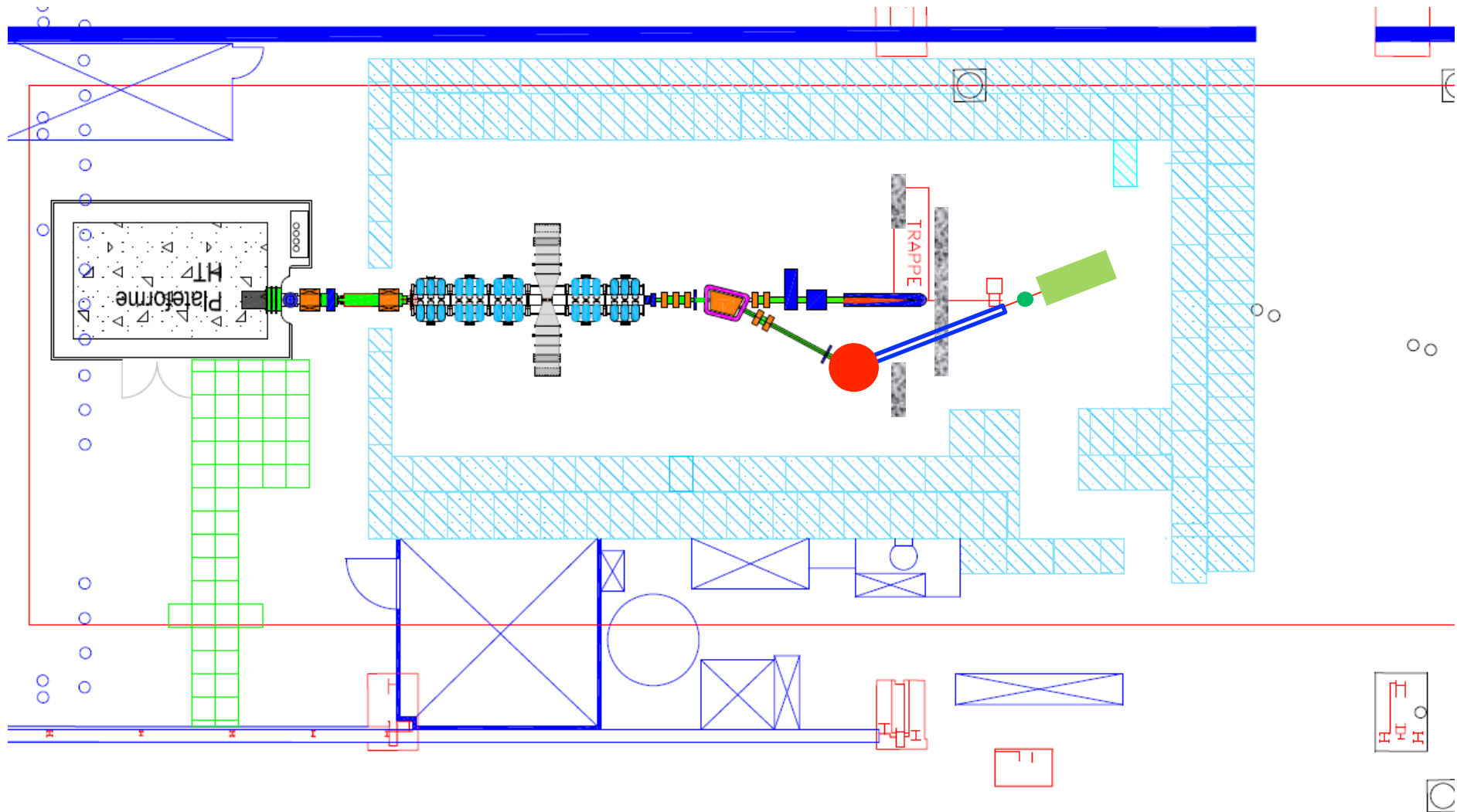






Target 1-10 kW (B. Annighofer)
 Optimized Moderator (J. Darpentigny)
 Cold Moderator (J-L. Meuriot)

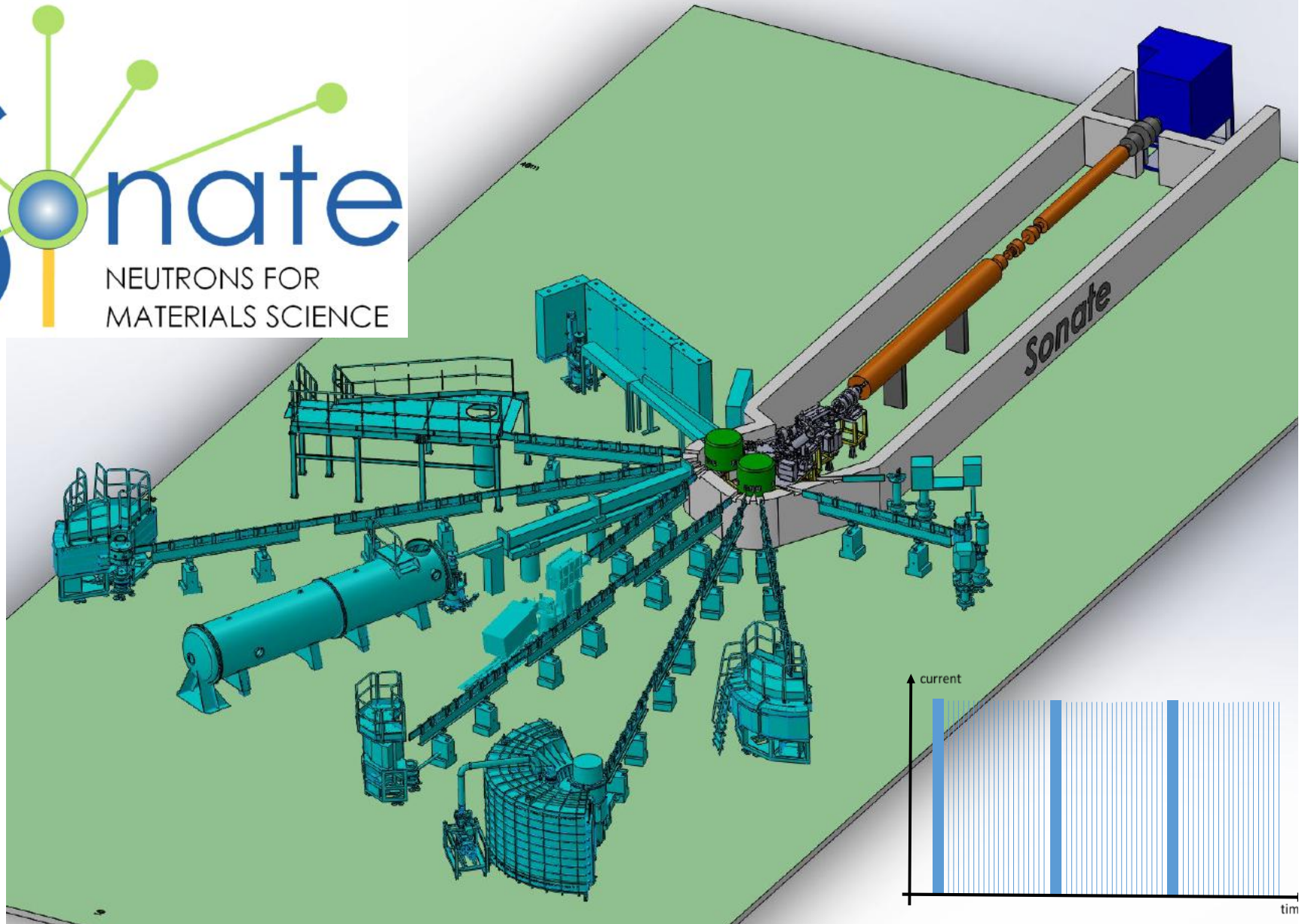
Sample table (W.Josse)
 Shielded Single Detector (F. Prunes)
 PSD MT32 (F.Prunes. - P.Lavie)



1 instrument « générique » : SANS, réflectomètre, imagerie, diffraction
Mesures sur des échantillons – Preuve de concept – Performances



2030: 10 INSTRUMENTS AUTOUR DE 2 CIBLES

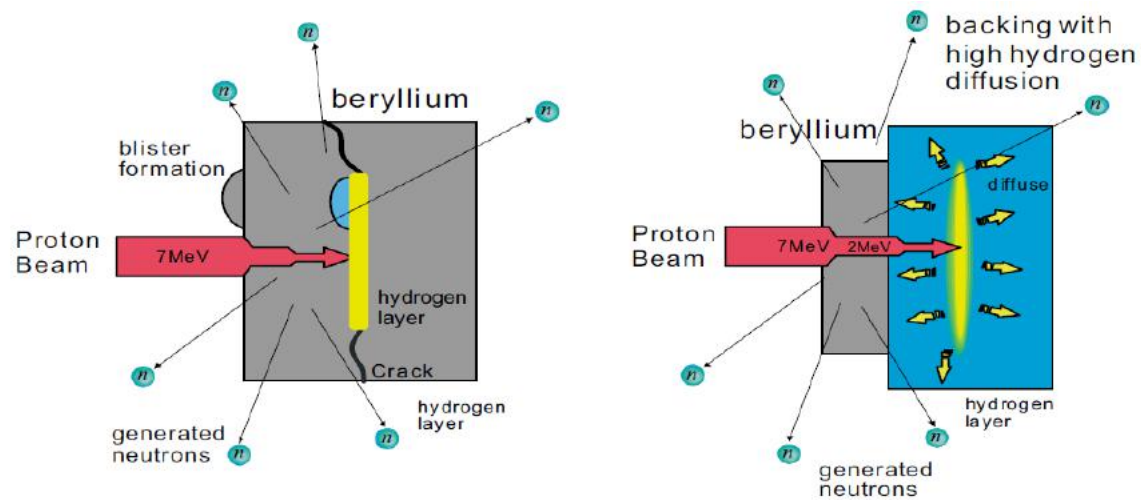


Tenues de la cible Be

- Fortes puissances surfaciques : $>1\text{kW}/\text{cm}^2$
- Embrittlement: fragilisation due à la formation de bulles d'hydrogène



Fig. 8 Mu



CONCLUSION

Les performances d'une source compacte sont potentiellement équivalentes à un réacteur de recherche de puissance moyenne

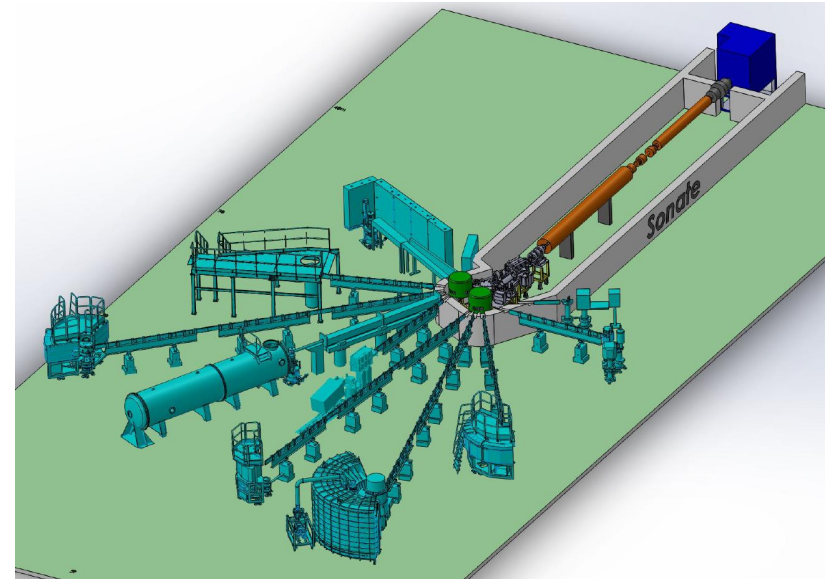
- Coût réduit / pas une INB

Technologiquement

- Accélérateur OK
- Cible → CMR50
- Modérateur OK / peut être modifié
- Instruments OK

Possibilité de bénéficier de l'écosystème Français

- Expertise scientifique et technique au LLB et à l'ILL
- Grande base d'utilisateurs
- Possibilité de réutiliser les efforts mis dans ESS
 - Designs d'instruments
 - Développements de détecteurs
 - Réduction et traitement des données
- Parc instrumental existant



SONATE a “Neutrons for Materials Science” platform

Monte-Carlo simulations

- H.N. Tran (IRFU/SPhN) (post-doc)
- A. Marchix (IRFU/SPhN)
- A. Letourneau (IRFU/SPhN)
- J. Darpentigny (IRAMIS/LLB)
- CEA/SPR (shielding / activation)
- TechnicAtome
- DEN/SERMA

IPHI

- J. Schwindling (IRFU/SACM)
- N. Chauvin (IRFU/SACM)
- IPHI personnel
B. Pottin, G. Perreu ...

Instruments simulations

- X. Fabrèges (IRAMIS/LLB)
- A. Menelle (IRAMIS/LLB)
- F. Ott (IRAMIS/LLB)

Target - modérateur

- N. Sellami (IRFU/SIS)
- B. Annighöfer (IRAMIS/LLB)
- P. Permingeat (IRAMIS/LLB)

Technical support

- K. Jiguet (IRAMIS/LLB)
- W. Josse (IRAMIS/LLB)
- B. Homatter (IRAMIS/LLB)
- P. Lavie (IRAMIS/LLB)
- J.-L. Meuriot (IRAMIS/LLB)
- F. Prunes (IRAMIS/LLB)
- ...

Strategic support

- C. Alba-Simionesco (IRAMIS/LLB)
- R. Duperrier (IRFU/SACM)
- A. Leservot (DRF/DCEPI)

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

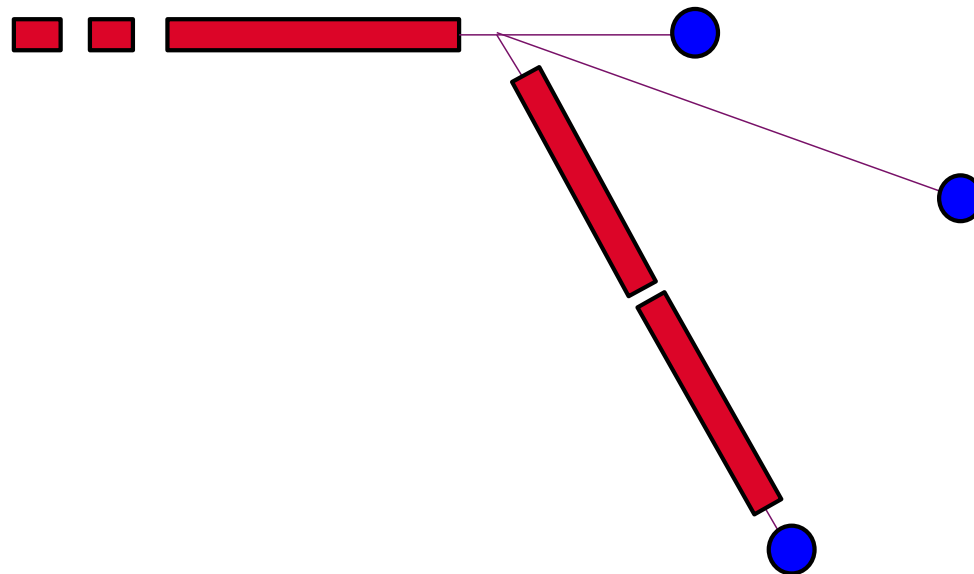


Possibilité d'installer plusieurs ensembles (cible/modérateur)

- Une cible pour les neutrons thermiques
- Une cible pour les neutrons froids

Si les finances le permettent, il est possible de passer de 20MeV à 60MeV, gain en flux x10, charge thermique x3

- Attention aux problèmes de shielding
- Plus de neutrons rapides

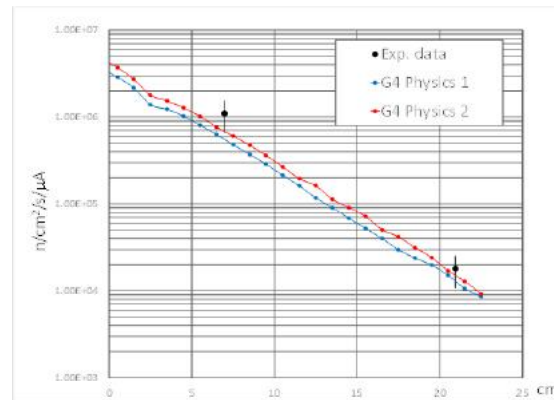


Modérateur polyéthylène + réflecteur

- Brillance is 3×10^7 n/cm²/s/μA/sr (at 20MeV)
(GEANT4 Monte-Carlo simulations)
- En accord avec des valeurs expérimentales (Allen, NIM A 1994)
mesurées à 10MeV / 30μA utilisant un modérateur PE
- Calculs cohérents avec des mesures à faible puissance sur IPHI (3MeV – 10μA)



Le dispositif de production et de modulation des neutrons ainsi que (au fond de la casemate) le détecteur Hélium



Comparaison des mesures de flux (points noirs) avec deux simulations GEANT4 en fonction de la distance à l'axe faisceau dans le modérateur

Neutrons production on the IPHI accelerator for the validation of the design of the compact neutron source SONATE

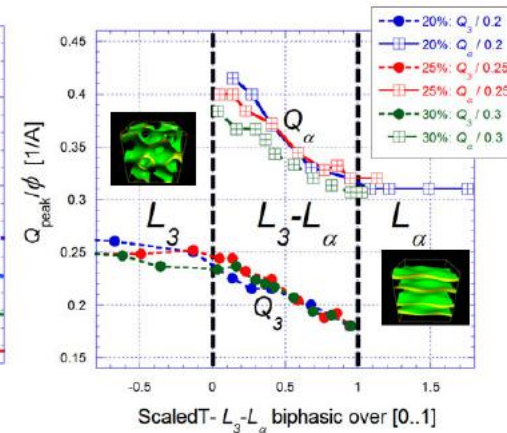
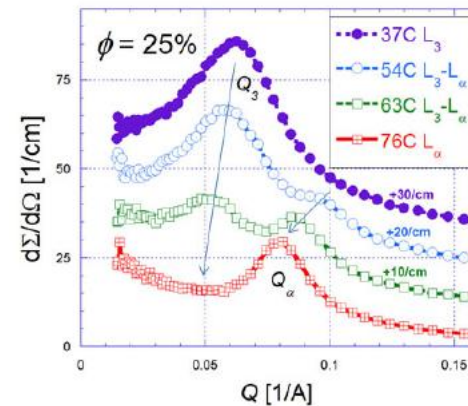
arXiv:1612.00237v2

Brillance de la source pour un courant moyen de 4mA

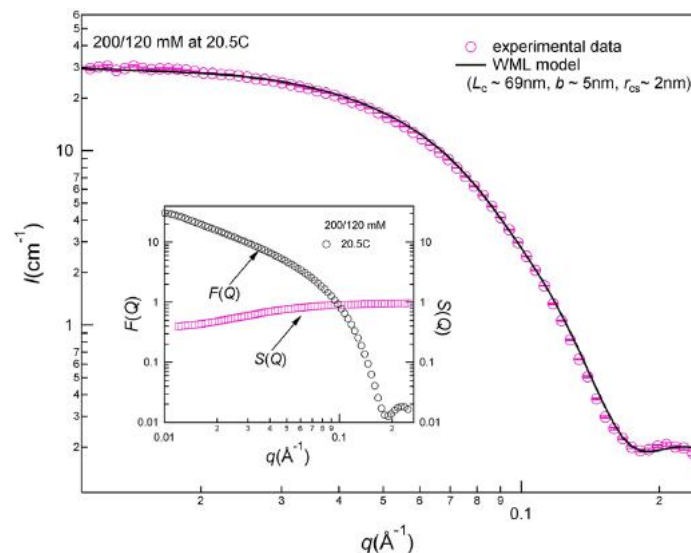
- 1.2×10^{11} n/cm²/s/sr (neutrons thermiques)
- Valeur utilisée pour les simulations Monte-Carlo

SANS at LENS Univ. Indiana 13MeV – 3 kW

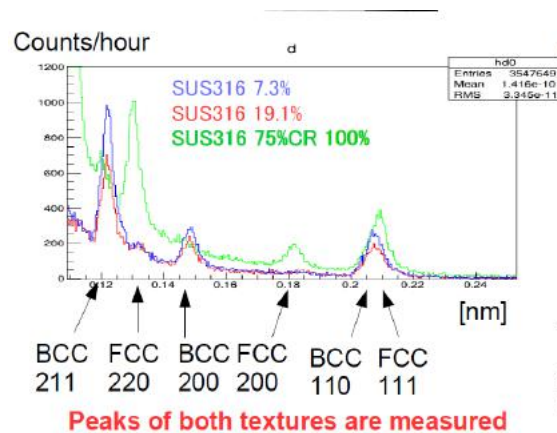
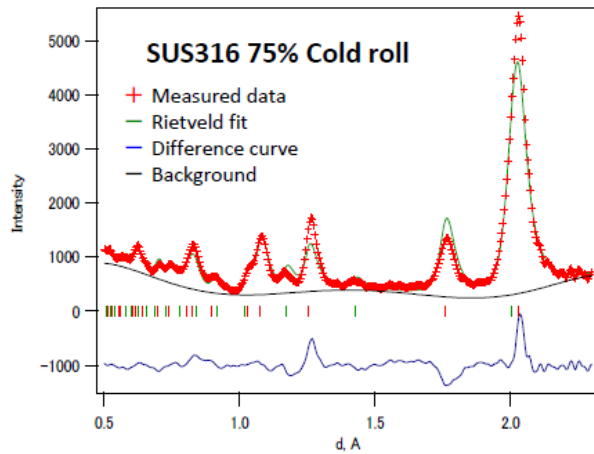
- SONATE → flux (x 30)
- Hamilton – Parnell



- Shape and Size of Highly Concentrated Micelles in CTAB/NaSal Solutions by Small Angle Neutron Scattering (SANS), Das et al, Langmuir 2014



RANS 7MeV – 100μA
SONATE → flux (x 200)

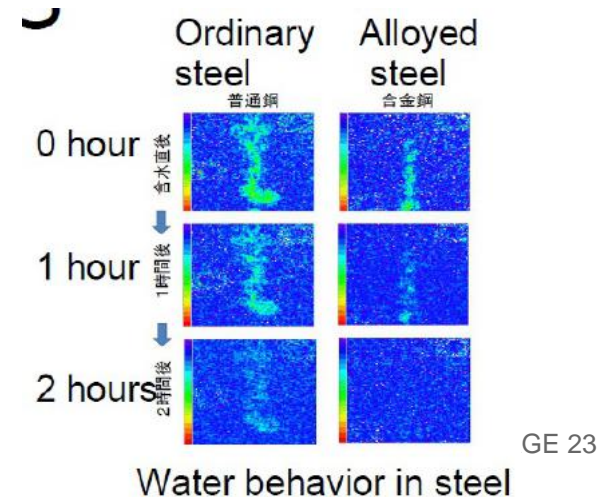
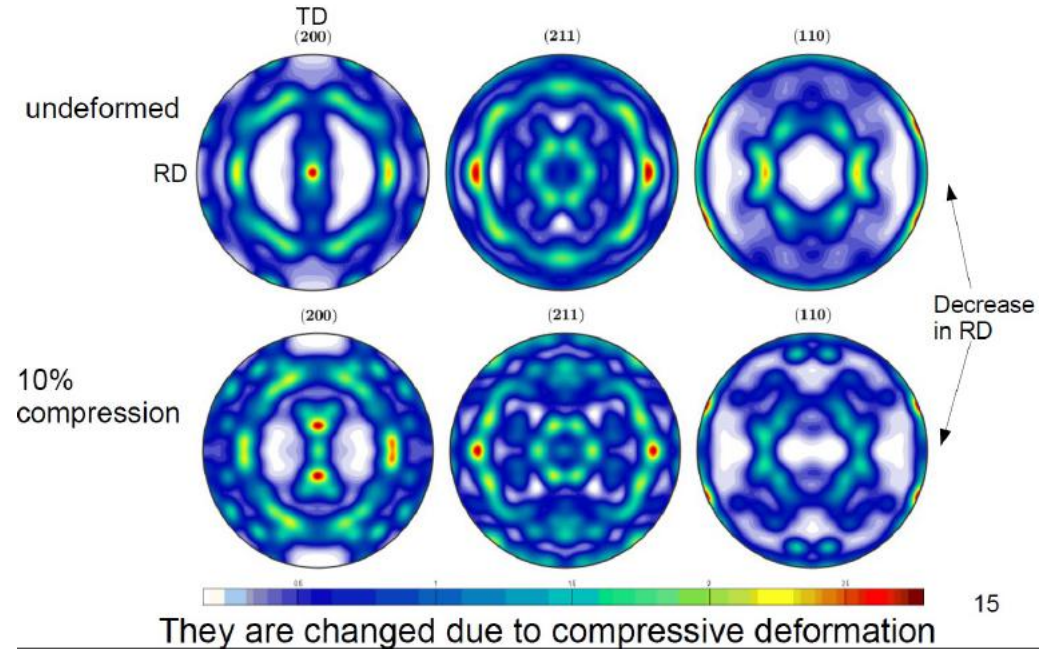


Austenite volume ratio
measured value (actual value)

$6.7 \pm 0.8\%$ (7.3%)
 $17.4 \pm 0.8\%$ (19.1%)

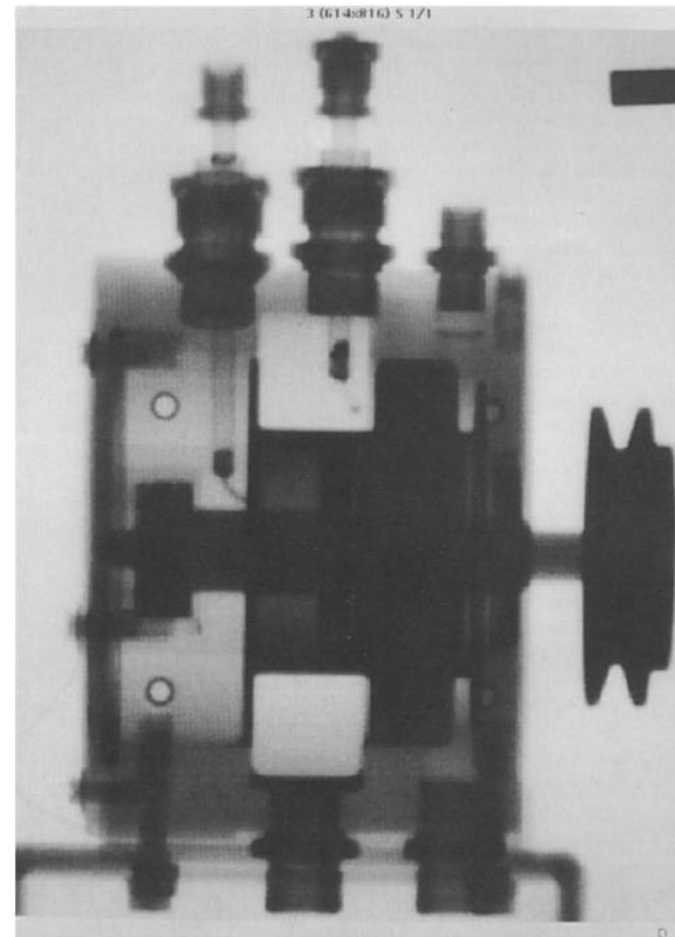
~1% of accuracy

•Rietveld analyzed by Dr.Suzuki
Z-Rietveld
R. Oishi et al, Rietveld analysis software for J-PARC
Nucl. Instrum. Methods, A 600 (2009) 94–96



NUFFIELD cyclotron, Univ. Birmingham / 12 MeV – 30 μ A
(Allen et al, NIM A 1994)

SONATE : flux (x 230)



6 secondes d'exposition

Remerciements pour la réflexion sur les instruments

- Xavier Fabrèges
- Jean-Marc Zanotti
- Sylvain Petit
- Fabrice Cousin
- Annie Brûlet

Contributeurs essentiels → IRFU

- Jérôme Schwindling (SACM)
- Anthony Marchix (SPhN)
- Nicolas Chauvin (SACM)
- Alain Letourneau (SPhN)

On a considéré une source continue

- Puissance 1.25MW (=PSI)
- Coût en électricité non négligeable (~1M€)
- Sur les appareils, on n'utilise qu'une petite partie des neutrons produits (1-10%)

Travailler avec une source pulsée est plus efficace

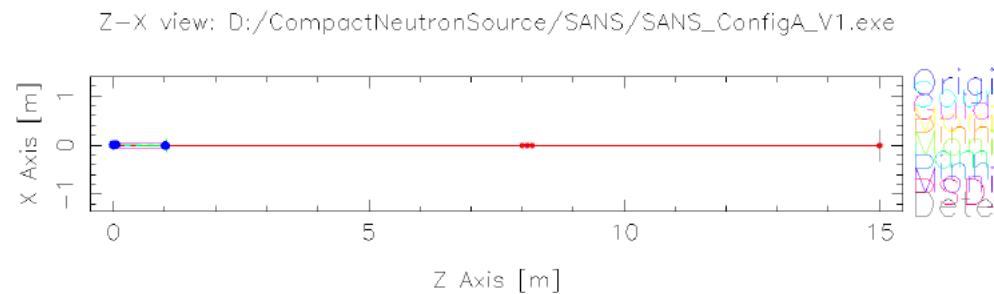
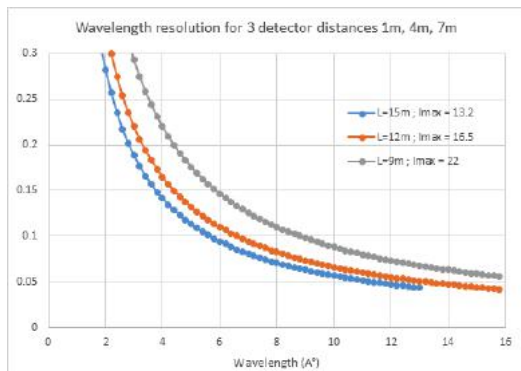
- On produit moins de neutrons mais on les utilise presque tous (70-90%)

Design de référence pour la suite : SONATE

- $E = 20 \text{ MeV}$
- $I = 60 \text{ mA}$
- Duty cycle 4% (exemple 20Hz, pulse de 2ms) : $I_{av} = 2.5 \text{ mA}$

Design de référence

- Cold source / $w = 2\text{ms}$ / $f = 20\text{Hz}$
- Source – sample distance = 8m.
- Sample – detector distance = 1 to 7m
- Total flight path L from 9 to 15m
- Useful bandwidth : 3Å to 16Å (depends on the total instrument length)



Comparaison avec PAXE :

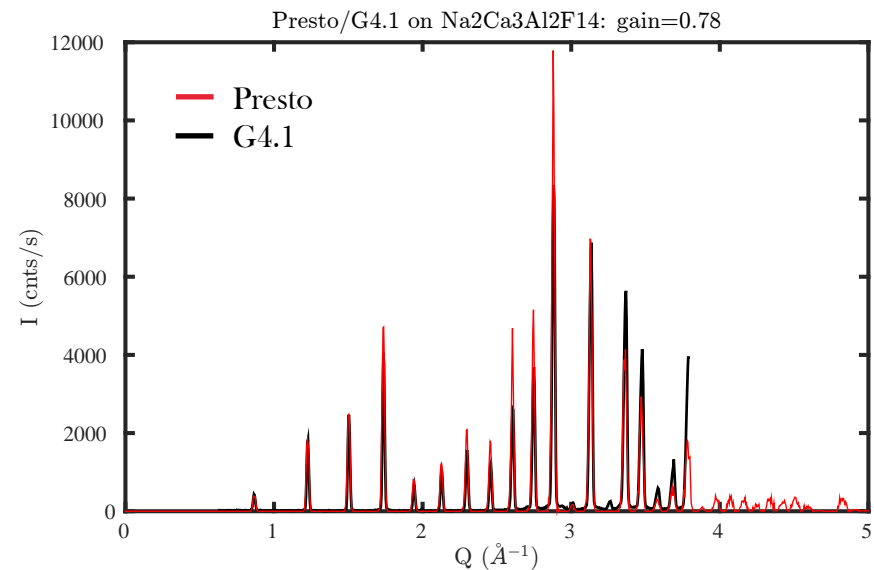
- PAXE : $7 \cdot 10^5 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ ($\lambda = 4\text{Å}$, $F1 = 12\text{mm}$, $F2 = 7\text{m}$, $L = 2.5\text{m}$)
- SONATE : $1 \cdot 10^6 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ (pulsé à 4%)

Design de référence

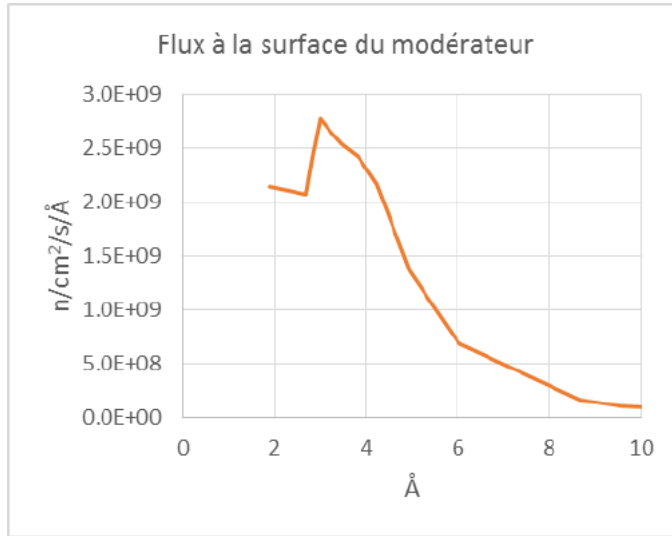
- Cold source / $w = 250\mu\text{s}$ / $f = 40\text{Hz}$ (1% duty cycle)
- Source – sample distance = 52m.
- Sample – detector distance = 1 m
- Total flight path $L = 53$ m
- Useful bandwidth : 1.4\AA° to 3.3\AA°
- $\Delta\lambda/\lambda$: 1.3% to 0.5%

Comparaison avec G4.1 :

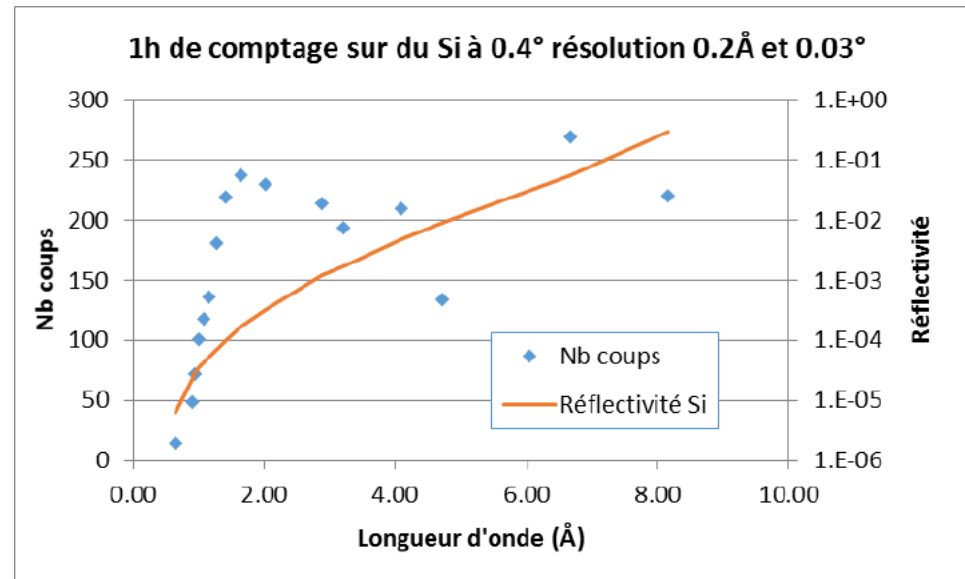
- G4.1:
 - Flux = $4\text{E}6$ n/cm²/s
 - Divergence: $\text{div}_h=0.3^\circ$, $\text{div}_v=3^\circ$
 - Detector: $80^\circ \times 3^\circ$ (35% eff.)
- PRESTO:
 - Flux: $2\text{E}6$ n/cm²/s
 - Divergence: $\text{div}_h = \text{div}_v = 0.6^\circ$
 - Detector: $80^\circ \times 3^\circ$ (35% eff.)
 - Gain: x0.7
 - Detector: $120^\circ \times 20^\circ$ (90% eff.) (7C2)
 - Gain: x20



REFLECTOMETRE



Réfectomètre TDV sur modérateur froid
 50Hz; pulses 400µsec (duty cycle 2%)
 Collimation 1.5m
 Détecteur à 8m du modérateur

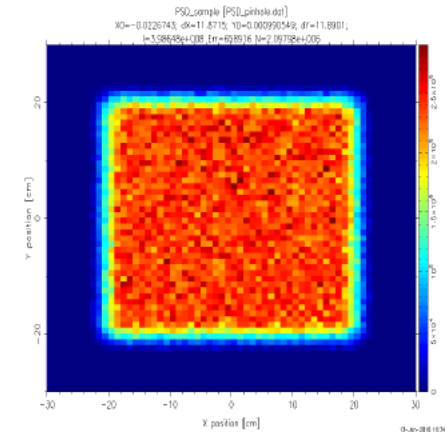


L' imagerie se fait essentiellement en faisceau blanc

- Une source pulsée est intrinsèquement handicapée

Design 1: Appareil court L/D = 250

- Flux $1 \cdot 10^6$ n/cm²/s
(versus $1 \cdot 10^7$ n/cm²/s sur IMAGINE = 10% de IMAGINE)
- Les temps de comptage sont courts (10-60s)
- La limitation est fixée par la cinétique de l' expérience
- Gains possible :
microchannel plate detectors (x5-10) – Coded Source Imaging (x10)



Design 2 : appareil long (50m) pour Bragg edge imaging

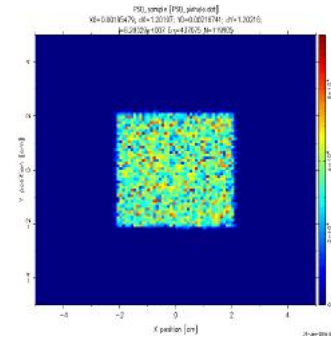
- textures – contraintes (IMAT@ISIS, ODIN@ESS)
- Le TOF permet d' utiliser au mieux la source
- Inconvénient : appareil très long

La technique de spin-echo utilise naturellement une très large bande en longueur d'onde (~20-30%)

- Elle est très efficace sur un réacteur

Design de référence

- Guide droit $L_g = 4\text{m}$ en $m=4$ section $100\times 100\text{mm}$
- Collimateur $L_1 = 4.6\text{m}$ avec pin-holes de 40mm (Divergence angulaire $\sim 1^\circ$)
- Detector at 3m from the sample
- Total length 12m .



Flux (polarisé) sur l'échantillon : $1.3 \cdot 10^6 \text{ n/cm}^2/\text{s}$

- A comparer à $2 \cdot 10^7 \text{ n/s/cm}^2$ at 5\AA sur MUSES
- C'est faible (15% de MUSES)
- Upgrade possible : multi-MUSES gain x70
- On peut avoir un instrument 10x plus efficace que MUSES actuel

Configuration en géométrie inverse (voir OSIRIS / IRIS @ ISIS)

Design de référence

- Distance de vol 30m
- Résolution en énergie $100\mu\text{eV}$
- Divergence angulaire (FWHM 1°)

- Le flux sur l'échantillon est de $3 \cdot 10^7 \text{ n/s/cm}^2$ (avant analyse en énergie)
- Pour mémoire OSIRIS@ISIS $3 \cdot 10^7 \text{ n/cm}^2/\text{s}$; IRIS $1 \cdot 10^7 \text{ n/cm}^2/\text{s}$
- Performances probablement comparables à LET@ISIS

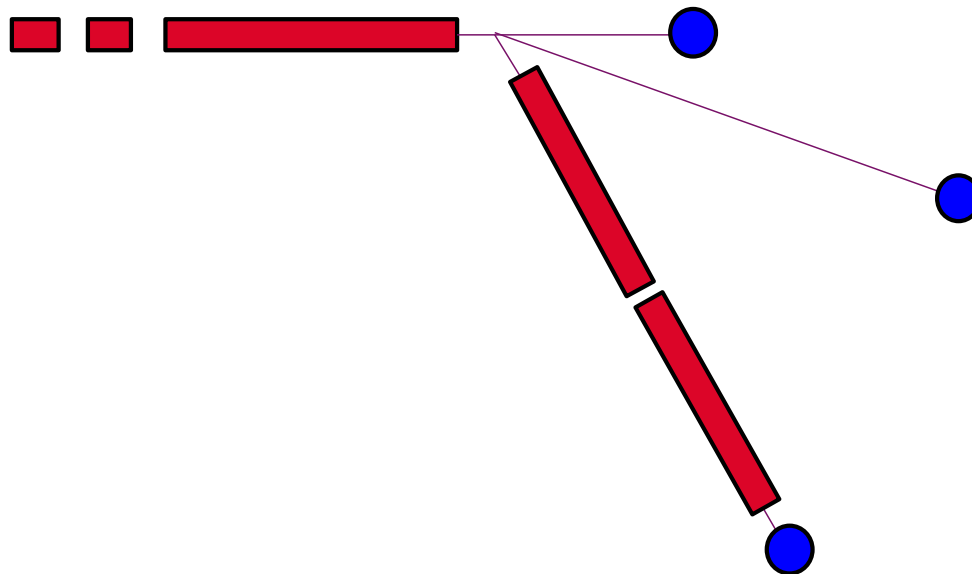
- Au doigt mouillé = 10% de IN5

Possibilité d'installer plusieurs ensembles (cible/modérateur)

- Une cible pour les neutrons thermiques
- Une cible pour les neutrons froids

Si les finances le permettent, il est possible de passer de 20MeV à 60MeV, gain en flux x10, charge thermique x3

- Attention aux problèmes de shielding
- Plus de neutrons rapides



A l'IRFU, embauche d'un post-doc sur un programme transverse du CEA pour travailler sur l'aspect modérateur

Dépôt d'une demande de Work Package (Source Compacte) dans NMI3-III (NEMO2020) au mois de Mars

- Implication du JCNS (1 ingénieur + 2PhD)
- Implication de ESS-Bilbao

Planning possible

- 2016 ensemble cible – modérateur PE (300W) pour avoir des data expérimentales
JCNS : modérateur D₂O + source froide à tester sur IPHI (300W)
- 2020 Ensemble Cible-Modérateur 50kW sur IPHI à 3MeV
Imagerie industrielle + SANS → validation du concept
- 2024 Montée à 20MeV (flux x 200)
6 spectromètres (SANS – reflecto – imagerie x2 – poudres HF – Spin-Echo)
- ... 2ième cible (thermique + froids) – spectromètres supplémentaires
(TOF – monocristaux – SANS – poudres HR – textures/contraintes)

Un faisceau d'estimations suggère qu'il est possible de construire une source ayant les performances actuelles d'Orphée

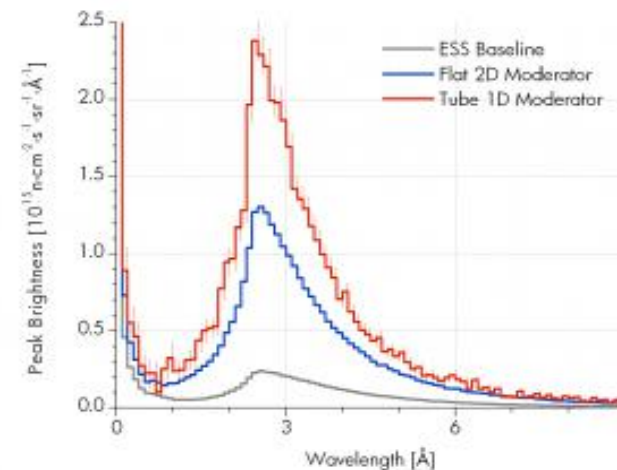
Inconnues

- Performances du modérateur
- Référence / bloc de polyéthylène
- Maîtrise de la longueur du pulse ?

- Gains sur l'optique

Gain sur le design des spectromètres

- Références : appareils « basiques » d'utilisation simple
- RRM Repetition Rate Multiplication (CSPEC x7) → analyse des data?
- Réflectivité : ESTIA@ESS en réflectivité x20 (?)
- SANS : Slit collimation (x5) / Multi-slit collimation (x5)
- Imaging : coded source imaging (x10)
- Multi-MUSES (x70)
- Diffraction : Détecteurs peu honéreux ? (développements ESS)



+

Ne pas raisonner en terme de flux absolu

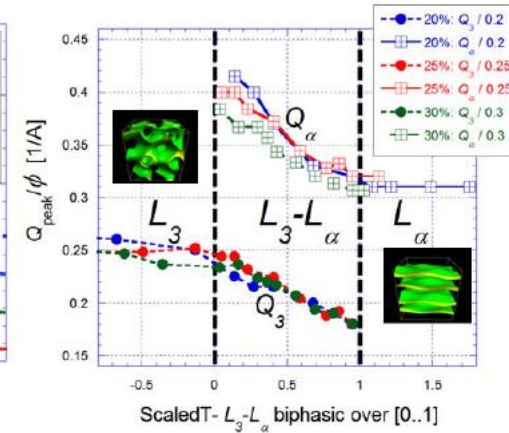
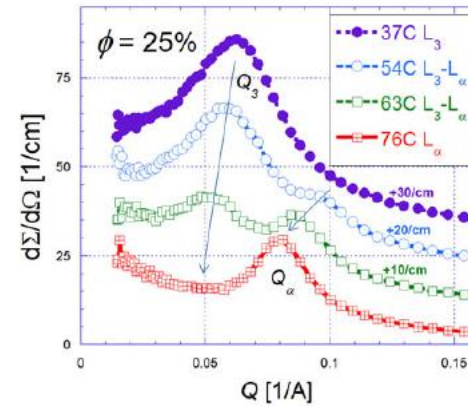
- Les performances (annoncées) de ESS sont hors échelle.
- Prendre comme référence Orphée.

La question : est-ce que cela a un sens scientifique de construire une installation aux perfs d' Orphée pour 2025?

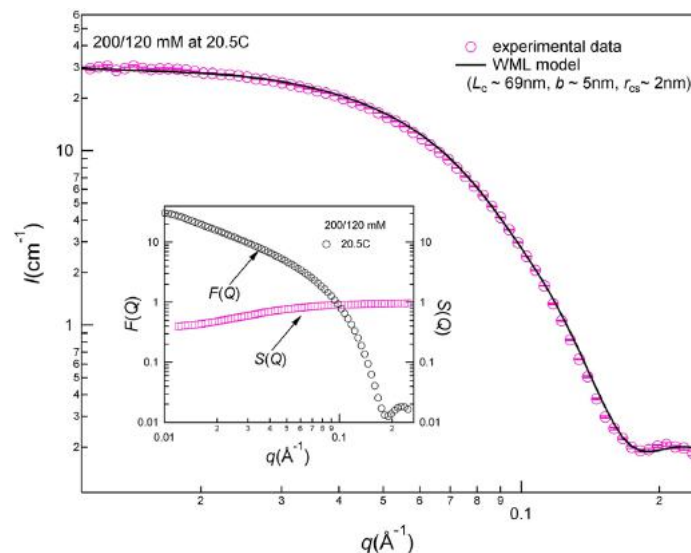
- Est-ce que dans 10 ans les équivalents des instruments d' Orphée seraient encore compétitifs pour faire de la bonne physique? (Les réponses sont variables)
 - SANS – Réflectivité : oui assurément
 - Imaging : oui
 - Diffraction : oui pas mal
 - Inélastique matériaux : oui pas mal
 - Inélastique monocristaux : dépend de l' évolution des thématiques
- Se donner comme références (1996, 2006, 2016)
 - Qu' est ce que vous faites de « mieux » qu' en 1996, en 2006 ?
 - Est-ce un saut quantitatif ou qualitatif (ou rien) ?

SANS at LENS Univ. Indiana 13MeV – 3 kW

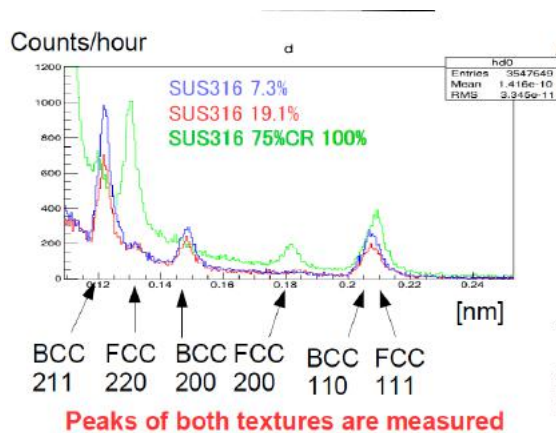
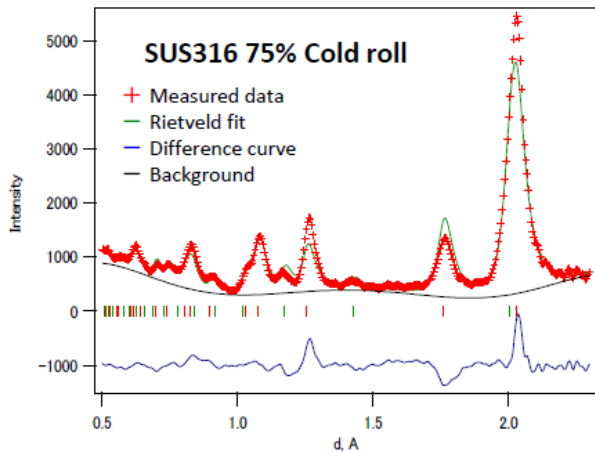
- SONATE → flux (x 30)
- Hamilton – Parnell



- Shape and Size of Highly Concentrated Micelles in CTAB/NaSal Solutions by Small Angle Neutron Scattering (SANS), Das et al, Langmuir 2014

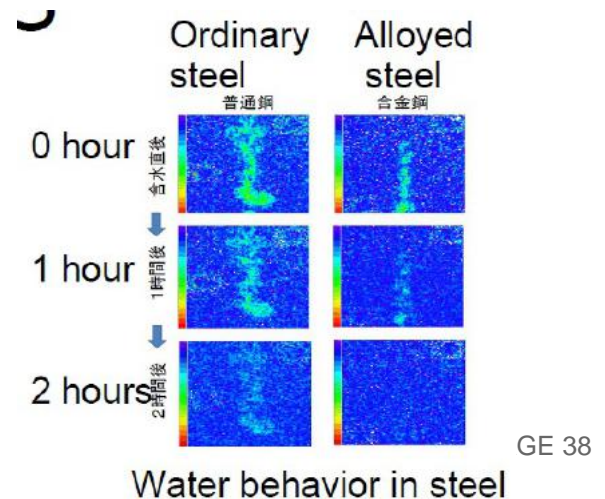
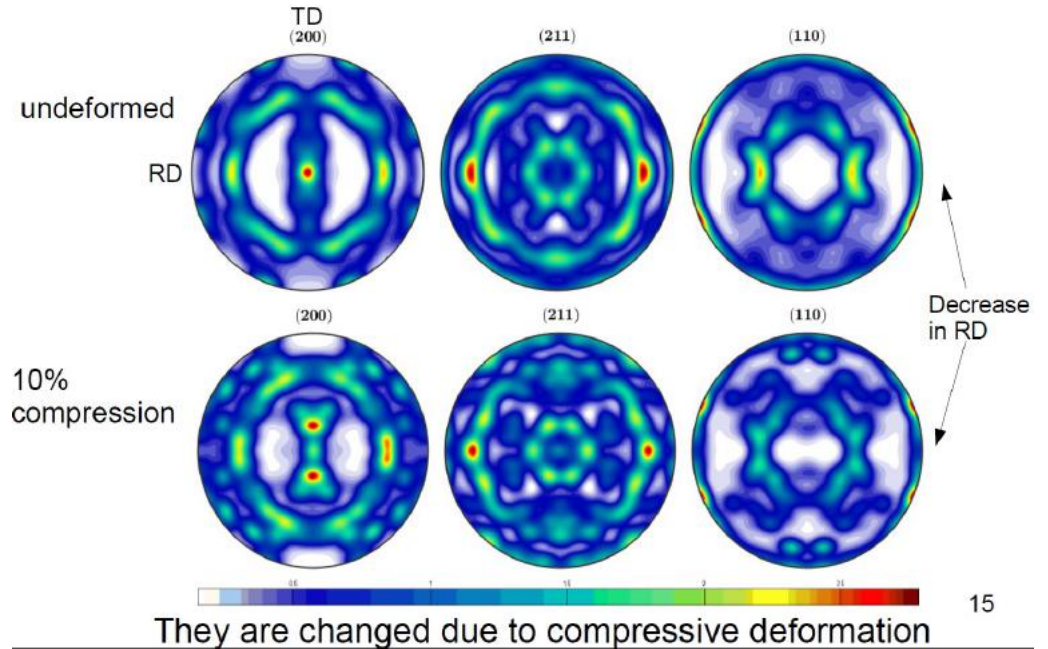


RANS 7MeV – 100μA
SONATE → flux (x 200)



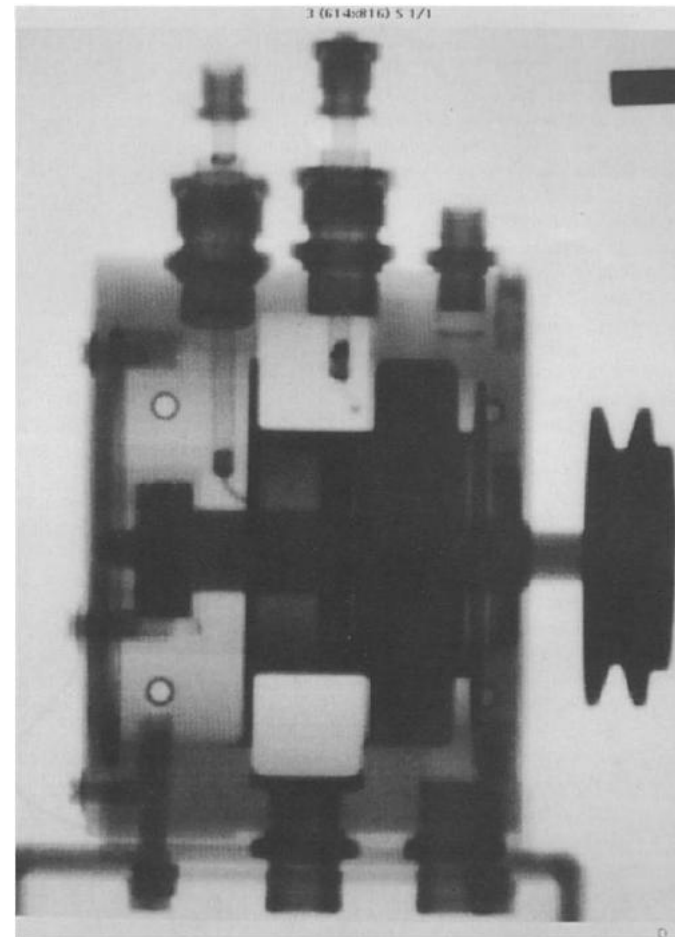
Austenite volume ratio
 measured value (actual value)
 $6.7 \pm 0.8\%$ (7.3%)
 $17.4 \pm 0.8\%$ (19.1%)
 ~1% of accuracy

•Rietveld analyzed by Dr.Suzuki
 Z-Rietveld
 R. Oishi et al, Rietveld analysis software for J-PARC
 Nucl. Instrum. Methods, A 600 (2009) 94–96



NUFFIELD cyclotron, Univ. Birmingham / 12 MeV – 30 μ A
(Allen et al, NIM A 1994)

SONATE : flux (x 230)



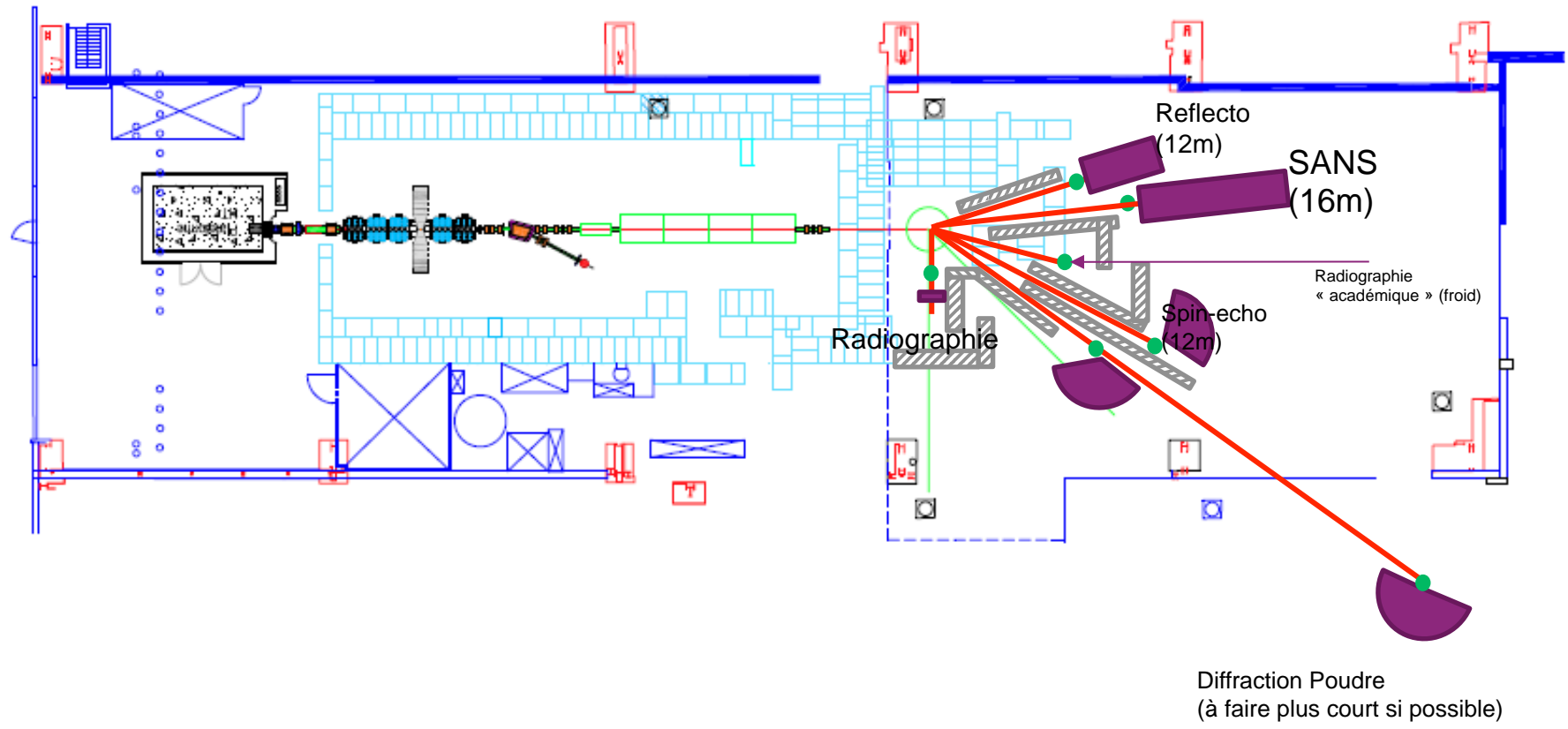
6 secondes d'exposition

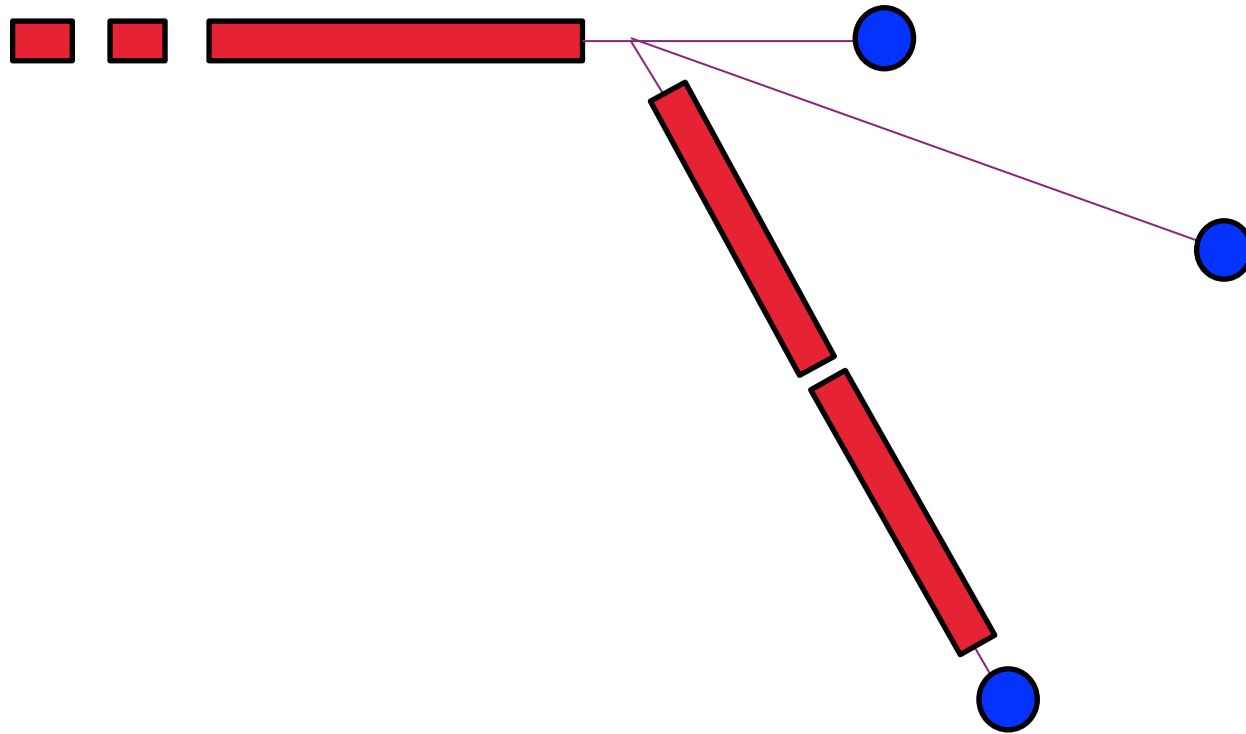
Remerciements pour la réflexion sur les instruments

- Xavier Fabrèges
- Jean-Marc Zanotti
- Sylvain Petit
- Fabrice Cousin
- Annie Brûlet

Contributeurs essentiels → IRFU

- Jérôme Schwindling (SACM)
- Anthony Marchix (SPhN)
- Nicolas Chauvin (SACM)
- Alain Letourneau (SPhN)

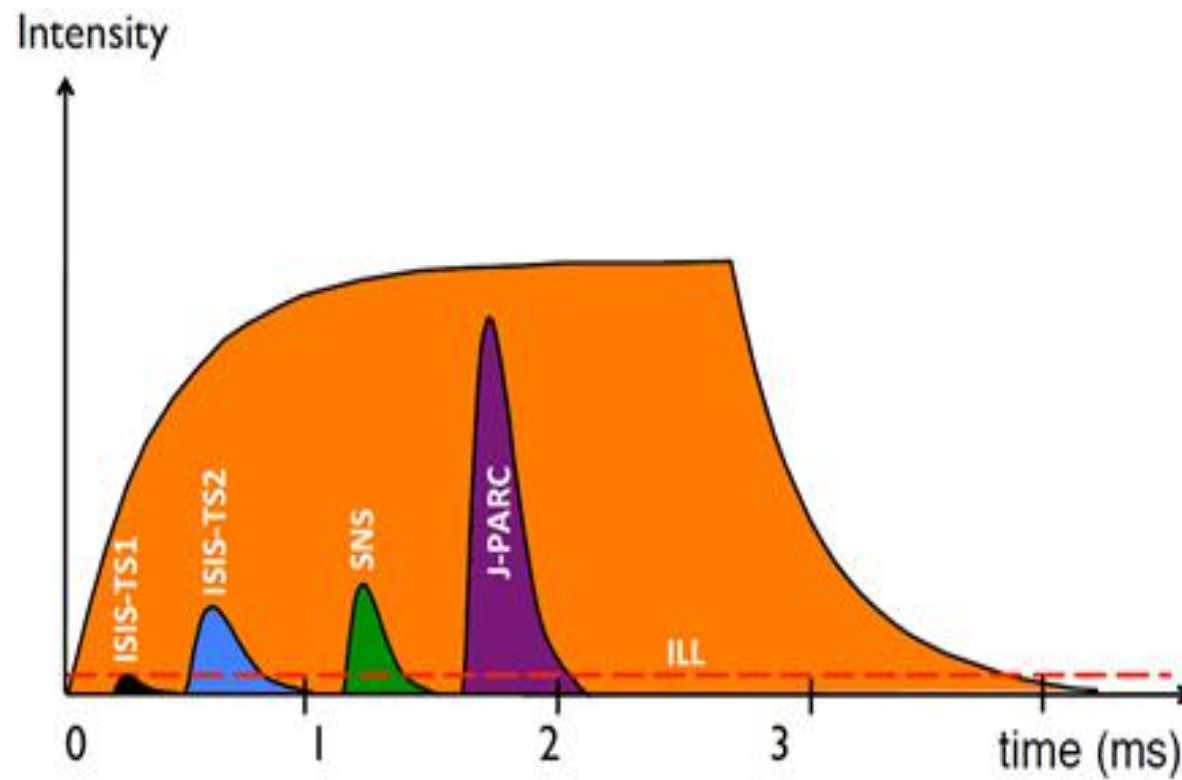




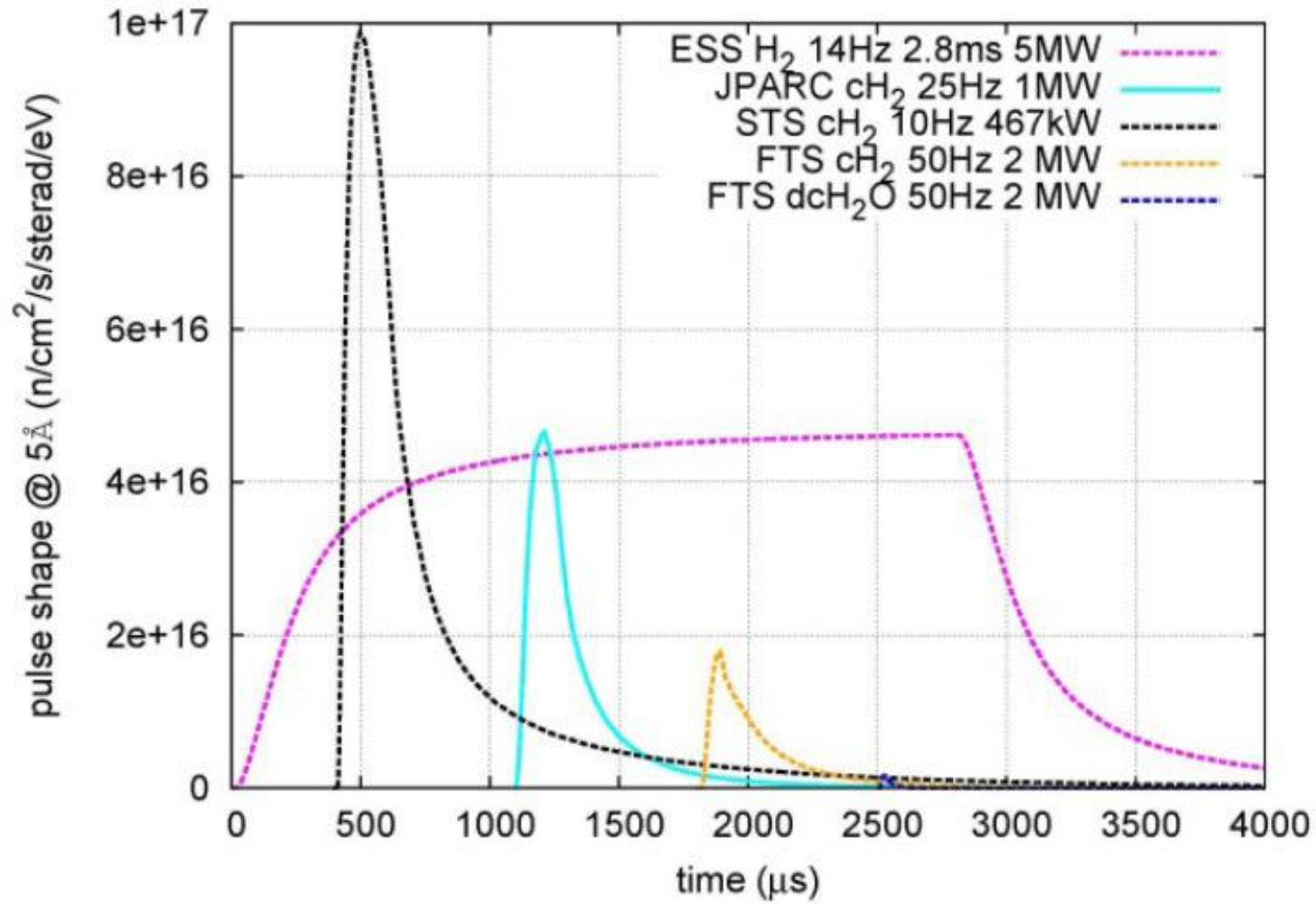
ESS-BILBAO Target Station TDR

	Power	Rep Rate Hz	Viewed Suf. [cm ²]	N. intensity [n/cm ² · s · sr]	N. intensity [n/cm ² · pl · sr]
JSNS C. hydrogen	300	25	10 w x 10 h	$1.3 \cdot 10^{12}$	$5.1 \cdot 10^{10}$
	1000	25	10 w x 10 h	$4.5 \cdot 10^{12}$	$1.8 \cdot 10^{11}$
SNS C. hydrogen	1000	60	12 w x 10 h	$2.1 \cdot 10^{12}$	$3.5 \cdot 10^{10}$
	1400	60	12 w x 10 h	$3.0 \cdot 10^{12}$	$4.9 \cdot 10^{10}$
ISIS-TS2 H/CH ₄ , gro.	48	10		$5.0 \cdot 10^{11}$	$5.4 \cdot 10^{10}$
ISIS-TS2 H/CH ₄ , hyd.	48	10	12 w x 11 h	$3.0 \cdot 10^{11}$	$3.0 \cdot 10^{10}$
ESS-BILBAO 50 MeV 50 MeV	112	20	12 w 10 h	$1.3 \cdot 10^{11}$	$6.6 \cdot 10^9$
ESS-BILBAO 100 MeV	150	40	12 w 10 h	$1.0 \cdot 10^{12}$	$2.6 \cdot 10^{10}$

Neutron pulse structure of the leading spallation sources around the world. The respective LINAC powers (per pulse) are (ISIS TS1 3.6kW, ISIS TS2 3.6kW, SNS 16.7kW, J-PARC 40kW, ESS 360 kW)



MODERATOR UPGRADES



Pas INB

- Orphée : Bidon D20 → 240 GB/l (2-6 Curies)

Fonctionnement ON-OFF (arrêt pendant le week-end)

Upgrade possible

Multi-cible

