

Production de champ magnétique hautement uniforme pour l'expérience n2EDM à l'Institut Paul Scherrer (PSI)

P. Flaux, T. Lefort, G. Ban, D. Goupillière, Y. Lemiere, B. Dechenaux

Journées de Rencontres Jeunes Chercheurs

27 Novembre 2017

La Pommeraie



Summary

I. L'expérience n2EDM à l'institut Paul Sherrer ————— 3 - 18

- Motivations
- Etat de l'art
- nEDM à l'Institut Paul Sherrer
- Principe de la mesure
- Les Neutrons Ultras Froids
- Première phase de l'expérience : nEDM
- Deuxième phase de l'expérience : n2EDM

II. Design et performance de la bobine B_0 ————— 19 - 25

- Exigences sur l'uniformité du champ
- Design de la bobine B_0
- Uniformité du champ produit par la bobine B_0
- Décomposition Harmonique & Décomposition en valeurs singulières (SVD)

III. Etudes de l'influence des défauts mécaniques sur l'uniformité du champ ————— 26 - 28

- Solutions mécaniques
- Influence de la position des fils
- Imperfections mécaniques
- Bobines Correctrices

Motivations



Processus symétrique : autant de matière que d'antimatière

Réaction d'annihilation : $m + \bar{m} \rightarrow 2\gamma$

Univers de lumière !!

Motivations

Observations : on existe (et on est constitué de matière)

Antimatière presque absente de l'univers



Credit image : CERN Document Server



Motivations

Conditions de Sakharov (1967)¹:

- Violation de B

Autorise $B = 0 \rightarrow B \neq 0$

- Phase de non-équilibre thermique

Evite une « marche arrière »

- Violation de C et CP

Favorise la disparition d'antimatière

¹A.D. Sakharov. *Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe.* JETP Letters, 5:24-27, 1967



Motivations

- Violation de C et CP

Favorise la disparition d'antimatière

Observations¹ : $\eta_{\text{exp}} = (n_B - n_{\bar{B}})/n_\gamma \sim 10^{-10}$

Avec les sources CP connues aujourd'hui dans le MS (secteur électrofaible) : $\eta \sim 10^{-19}$

- Kaons² K⁰
- Mésons³ B

Extensions du SM apportent de nouvelles sources

→ nécessité de chercher de nouvelles sources de violation CP

¹G. Steigman, *Primordial Nucleosynthesis in the Precision Cosmology*, Era. Annu. Rev. Nuc. Part. Sci., 57:463-491, 2007

²J. H. Christenson, et al., *Evidence for the 2π Decay of the K^0 Meson System.*, Physical Review Letters, 13 (4): 138., 1964

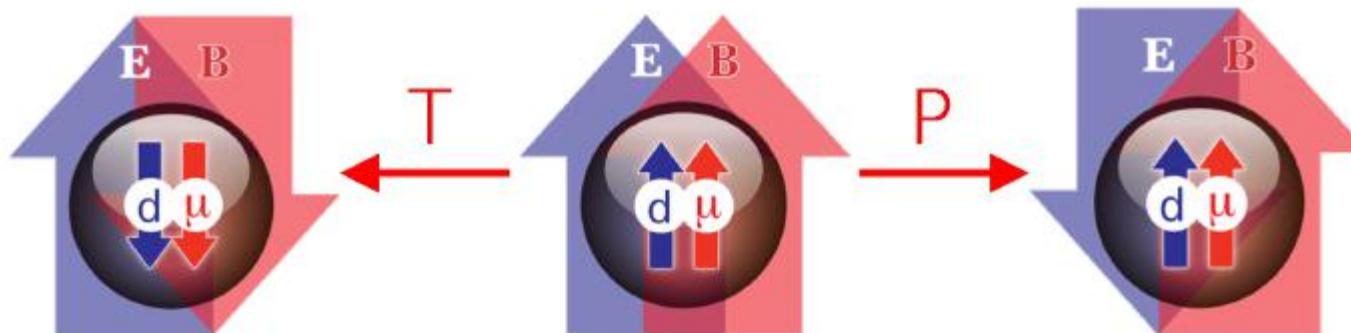
³R. Aaij et al. (LHCb Collaboration), *First Observation of Violation in the Decays of Mesons.*, Physical Review Letters, 110 (22): 221601., 2013

Motivations

Moment Dipolaire électrique du neutron d_n (nEDM)

$$H = -\vec{d}_n \cdot \vec{E} - \vec{\mu}_n \cdot \vec{B}$$

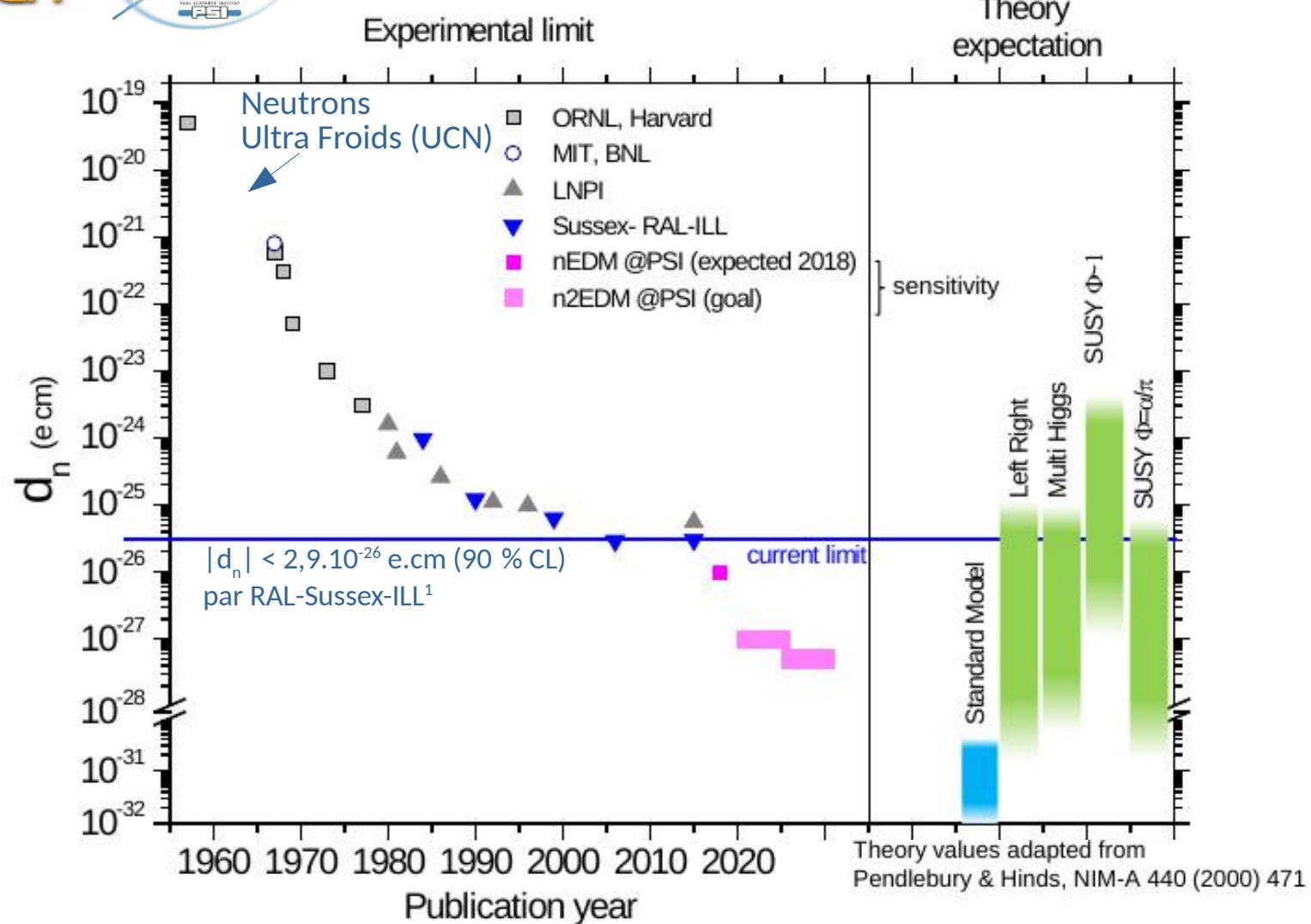
$$\begin{aligned} -\hat{\vec{d}}_n \cdot \vec{E} &\xrightarrow{P} \hat{\vec{d}}_n \cdot \vec{E} & -\hat{\vec{\mu}}_n \cdot \vec{B} &\xrightarrow{P} -\hat{\vec{\mu}}_n \cdot \vec{B} \\ -\hat{\vec{d}}_n \cdot \vec{E} &\xrightarrow{T} \hat{\vec{d}}_n \cdot \vec{E} & -\hat{\vec{\mu}}_n \cdot \vec{B} &\xrightarrow{T} -\hat{\vec{\mu}}_n \cdot \vec{B} \end{aligned}$$



Violation de P et de T (donc CP) si d_n non-nul



Etat de l'art



¹C. A. Baker et al., Improved experimental limit on electric dipole moment of the neutron., Phys. Rev. Lett., 97:131801, 2006

La collaboration nEDM à l'Institut Paul Sherrer (PSI)



M. Burghoff, A. Schnabel



E. Chanel, F. Piegza



C. Abel, N. Ayres, C.W. Griffith, P. Harris, J. Thorne



G. Ban, P. Flaux, T. Lefort, Y. Lemiere, O. Naviliat-Cuncic



K. Bodek, D. Rozpedzik, J. Zejma



A. Kozela



Z. Grujic, A. Weis



L. Ferraris, G. Pignol, A. Leredde, D. Rebreyend



V. Bondar, P. Koss, N. Severijns, E. Wursten



C. Crawford



W. Heil



D. Ries



S. Roccia



G. Bison, P.-J. Chiu², M. Daum, N. Hild², B. Lauss, P. Mohan Murthy², D. Pais², P. Schmidt-Wellenburg, G. Zsigmond



S. Emmenegger, K. Kirch¹, H.C. Koch, S. Komposch, J. Krempel, M. Rawlik

also at: ¹Paul Scherrer Institut, ²Eidgenössische Technische Hochschule

Physikalisch Technische Bundesanstalt, Berlin



Universität Bern, Bern

University of Sussex, Brighton

Laboratoire de Physique Corpusculaire, Caen

Institute of Physics, Jagiellonian University, Cracow

Henryk Niedwodniczanski Inst. Of Nucl. Physics, Cracow

Département de physique, Université de Fribourg, Fribourg

Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, Grenoble

Katholieke Universiteit, Leuven

University of Kentucky, Lexington

Inst. für Physik, Johannes-Gutenberg-Universität, Mainz

Inst. für Kernchemie, Johannes-Gutenberg-Universität, Mainz

Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse, Orsay

Paul Scherrer Institut, Villigen

Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich

La collaboration nEDM à l'Institut Paul Sherrer (PSI)



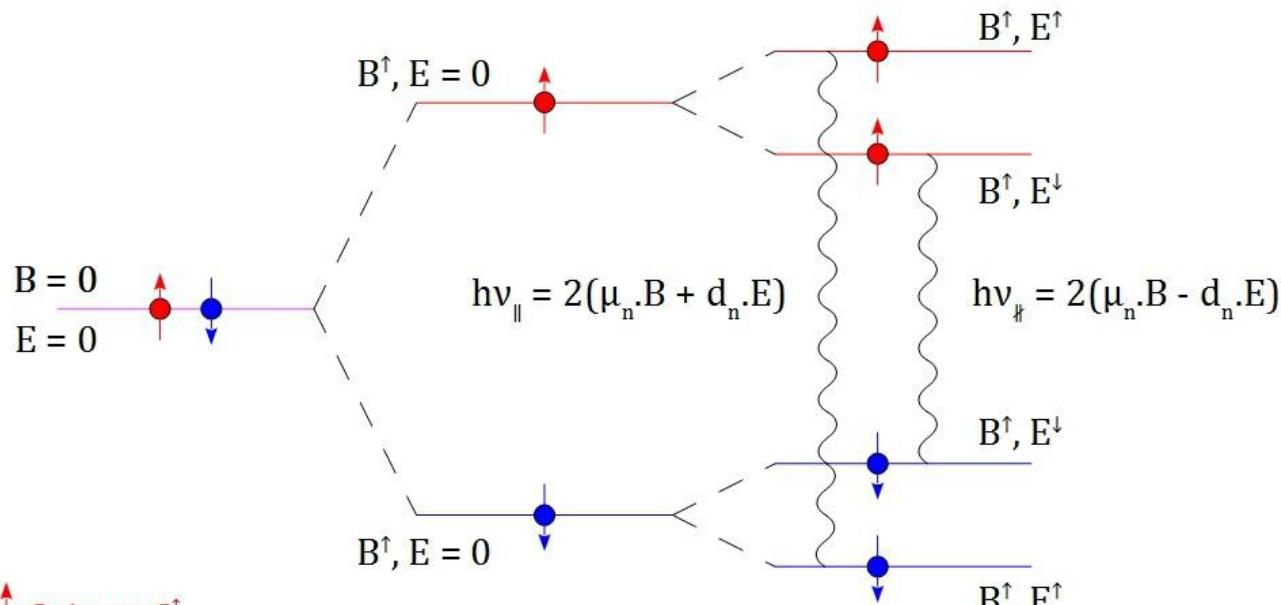
Leuven, 16-18/11/2017

Bern, 11-13/05/2017



Principe de la mesure

$$\mathcal{H} = -\mu_n \cdot \vec{B} \cdot \vec{s} - d_n \cdot \vec{E} \cdot \vec{s}$$



À mesurer !

$$d_n = \frac{h(v_{||} - v_{\#})}{4E}$$

$$\sigma(d_n) = \frac{\hbar}{2\alpha ET\sqrt{N}}$$

→ Nécessité de mesurer la polarisation des neutrons et de les compter

→ Stabilisation et contrôle de B indispensable !

Inhomogénéités de B → erreurs statistiques

→ erreurs systématiques

Les neutrons ultra-froids (UCN)

$T < 3,5 \text{ mK} \rightarrow E_c < 300 \text{ neV}$



Figure 2.11: Parabolic UCN trajectories simulated using GEANT4-UCN, as an example of the gravity effect on ultra cold neutrons.
[Extrait de la thèse de V. Hélaine, 2014]

→ On peut stocker les Neutrons Ultra Froids !

Première phase de l'expérience : nEDM

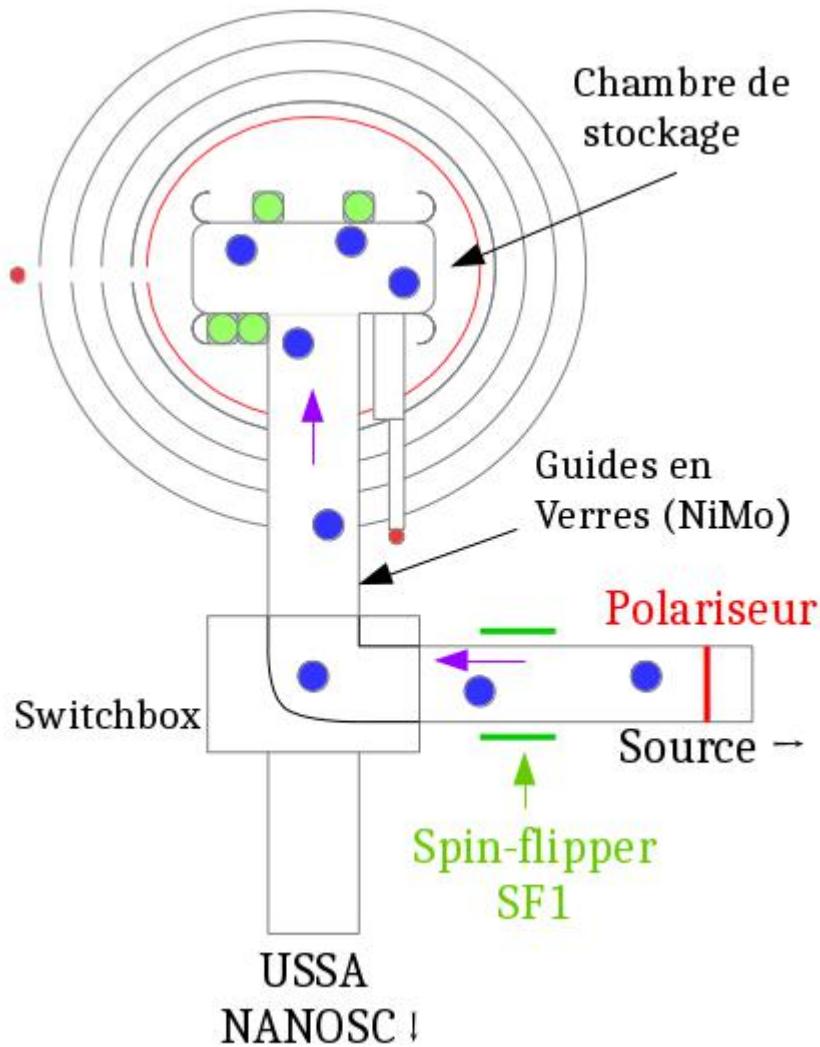


Dispositif expérimental

Blindages magnétiques
et chambre de stockage



Première phase de l'expérience : nEDM



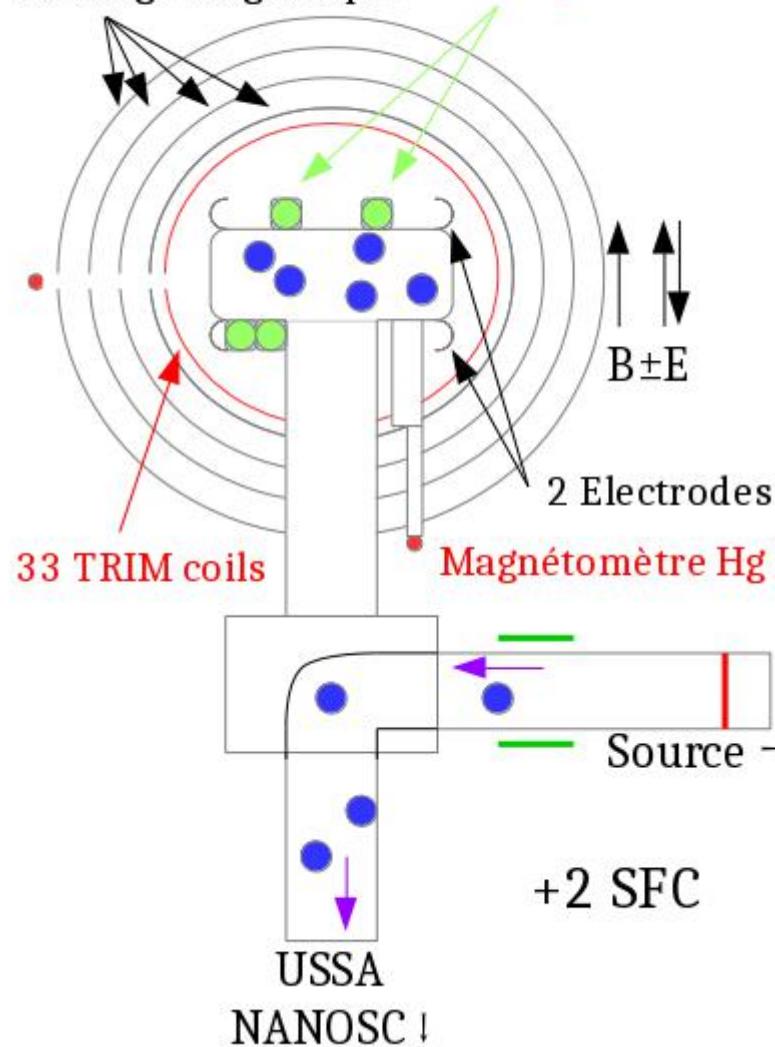
Remplissage : $0 \rightarrow 30\text{ s}$

Les neutrons sont polarisés et envoyés dans la chambre de stockage

Première phase de l'expérience : nEDM

4 couches de
blindage magnétique

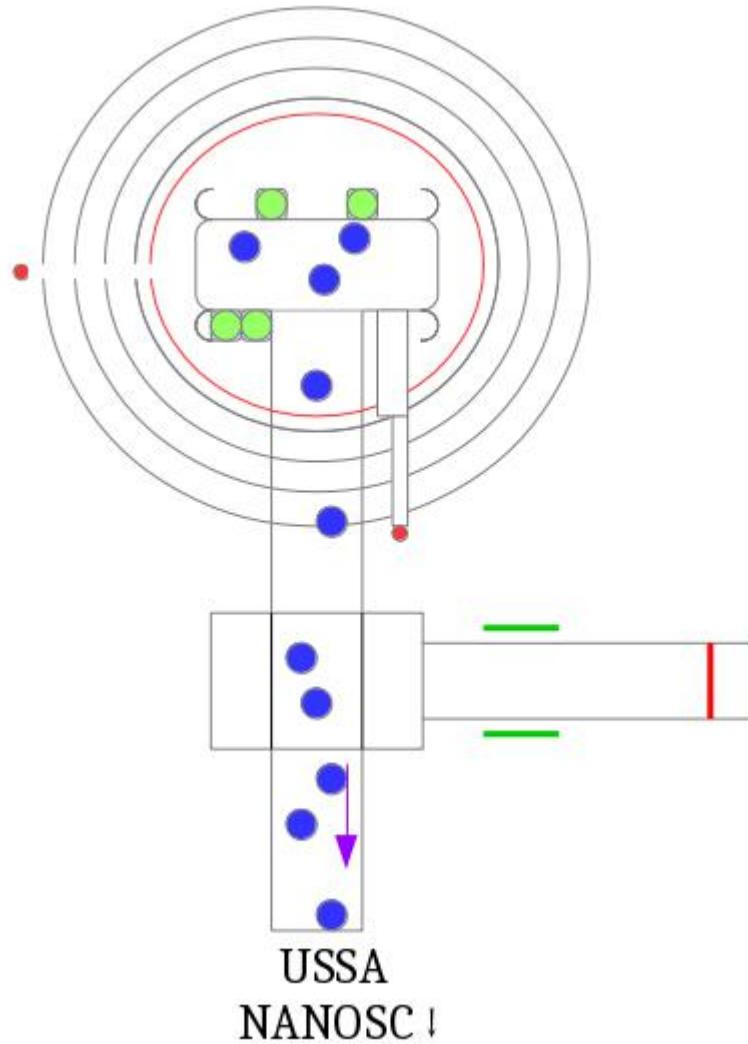
16 Magnétomètres Cs



Stockage : $30 \rightarrow 220$ s

- Champ B et E appliqués sur les neutrons stockés

Première phase de l'expérience : nEDM



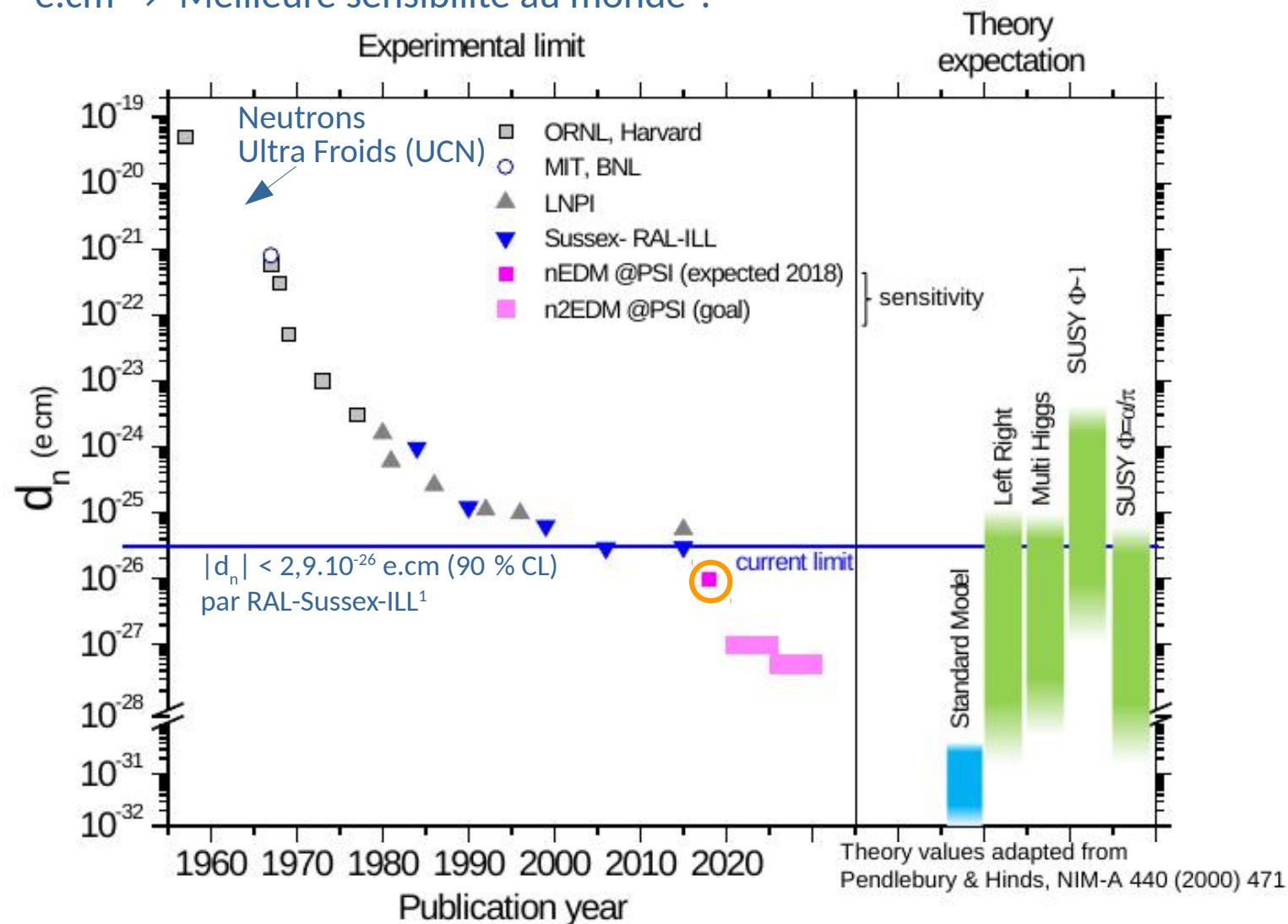
Vidage : $220 \rightarrow 280$ s

Détection des neutrons de la chambre de stockage et analyse de leur polarisation

Première phase de l'expérience : nEDM

Prise de données entre 2015-2016-2017

$\sigma(d_n) \sim 1.10^{-26} \text{ e.cm} \rightarrow$ Meilleure sensibilité au monde !



Deuxième phase de l'expérience : n2EDM

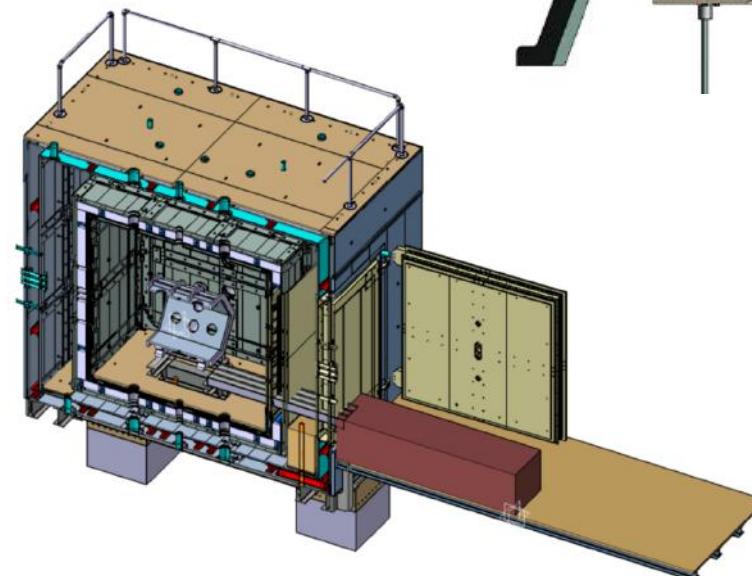
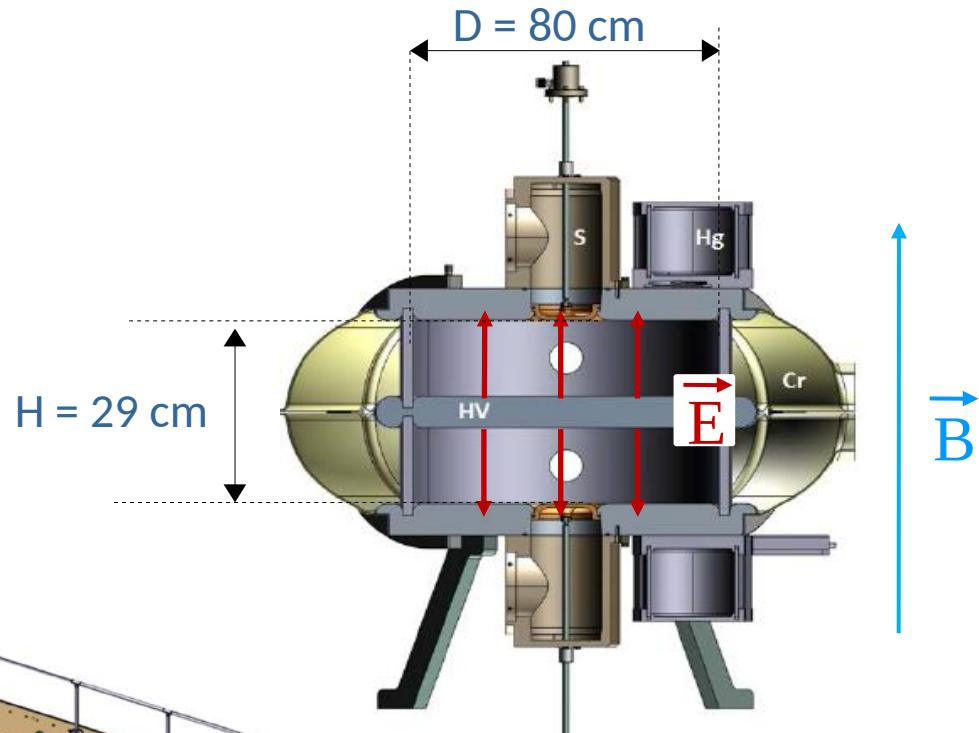
Phase II : n2EDM

But : $\sigma(d_n) \sim 10^{-27} \text{ e.cm}$

Améliorations :

- Double chambre de précession, plus grande
 - + Plus de statistique
 - + Limiter certains effets systématiques

- Nouveau blindage
- Nouvelles bobines



Exigence sur l'uniformité du champ pour n2EDM

Bobine B0 qui produit le champ principal vertical

Champ au centre de la bobine	$B_0 = 1 \mu\text{T}$
Uniformité du champ dans la chambre	$< 10^{-4}$

Comment est produit le champ B_0

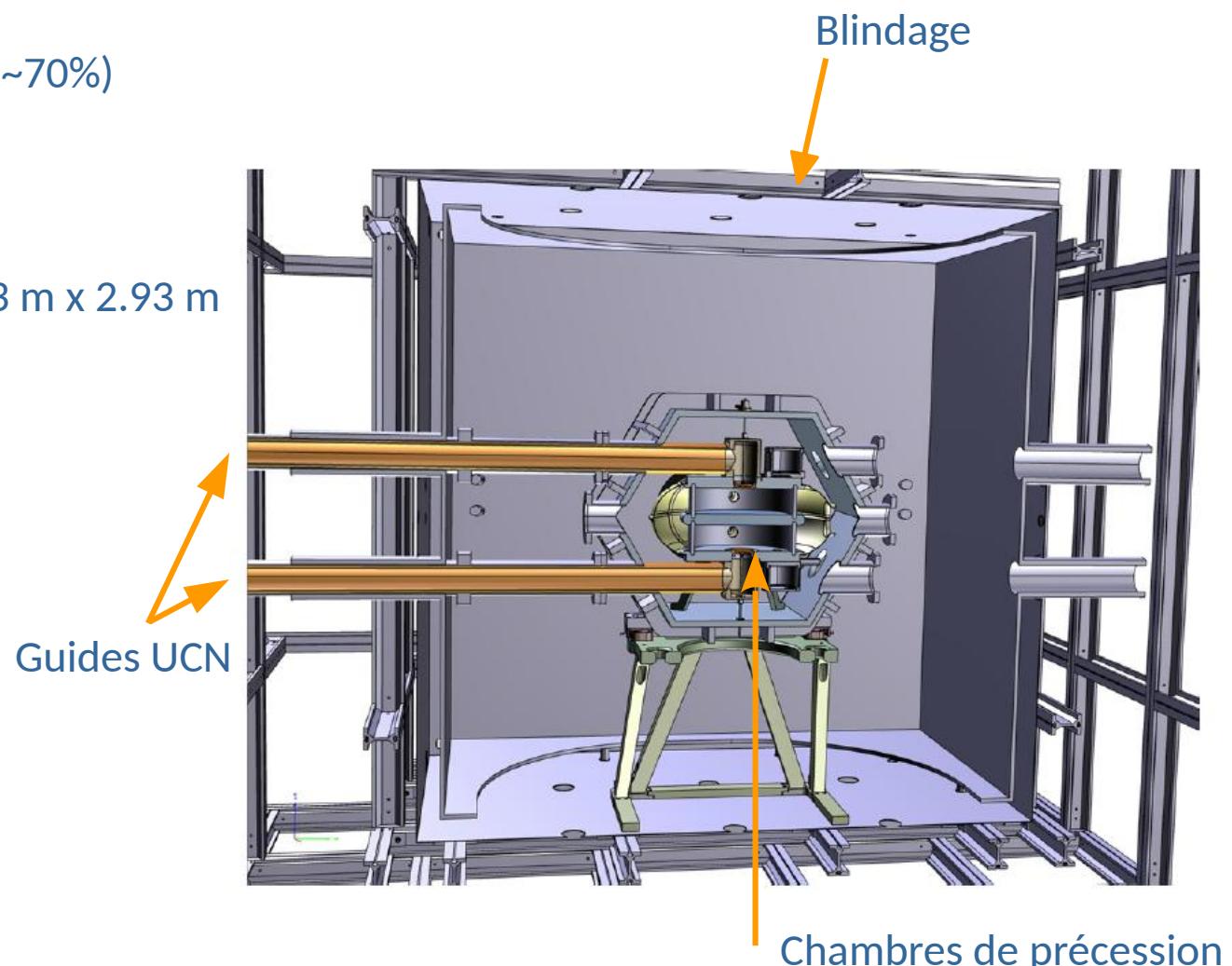
→ La bobine B_0 est proche de la première couche du blindage en mu-métal

→ Champ produit par la bobine (~70%)
Et le blindage (~30%)

Première couche du blindage :

- Dimensions : 2.93 m x 2.93 m x 2.93 m
- Epaisseur : 3.75 mm

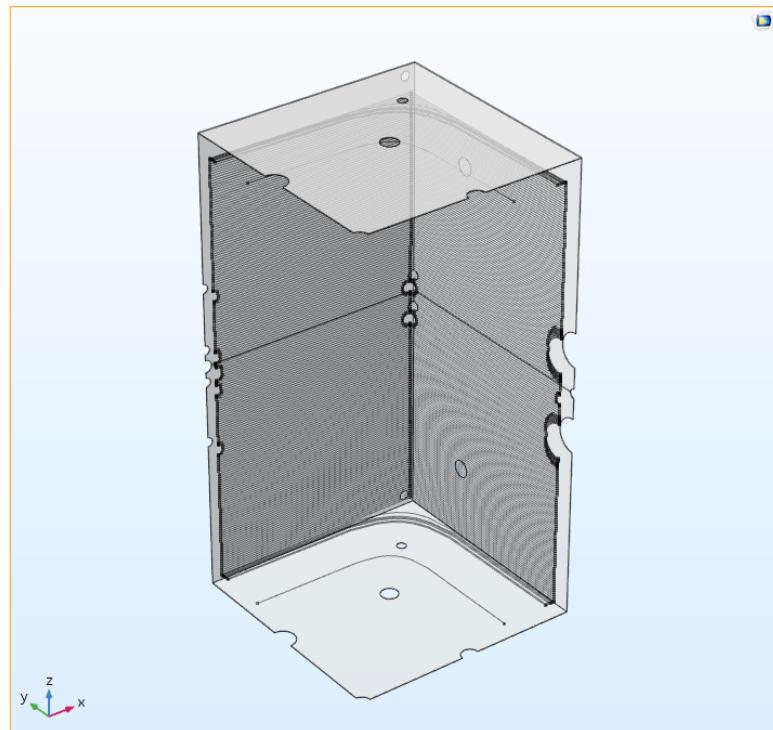
Simulation avec le logiciel
COMSOL (éléments finis)



Design de la bobine B_0

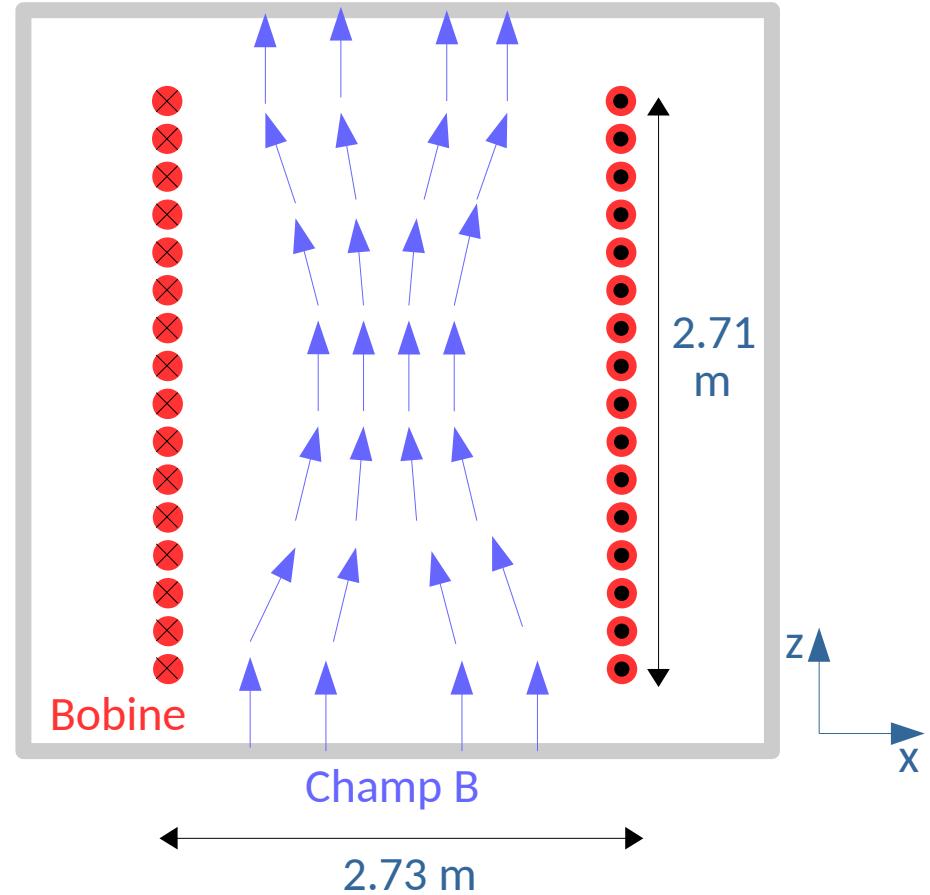
B_0 coil : Solénoïde cubique + déviation autour des trous...

Vue de coté



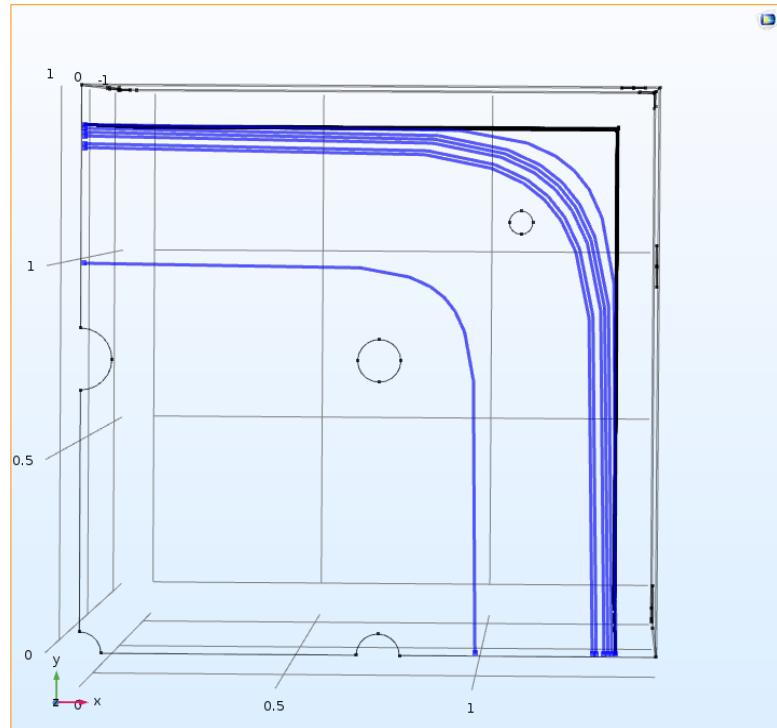
1/4 de la bobine B_0 + première couche du blindage

Blindage mu-metal



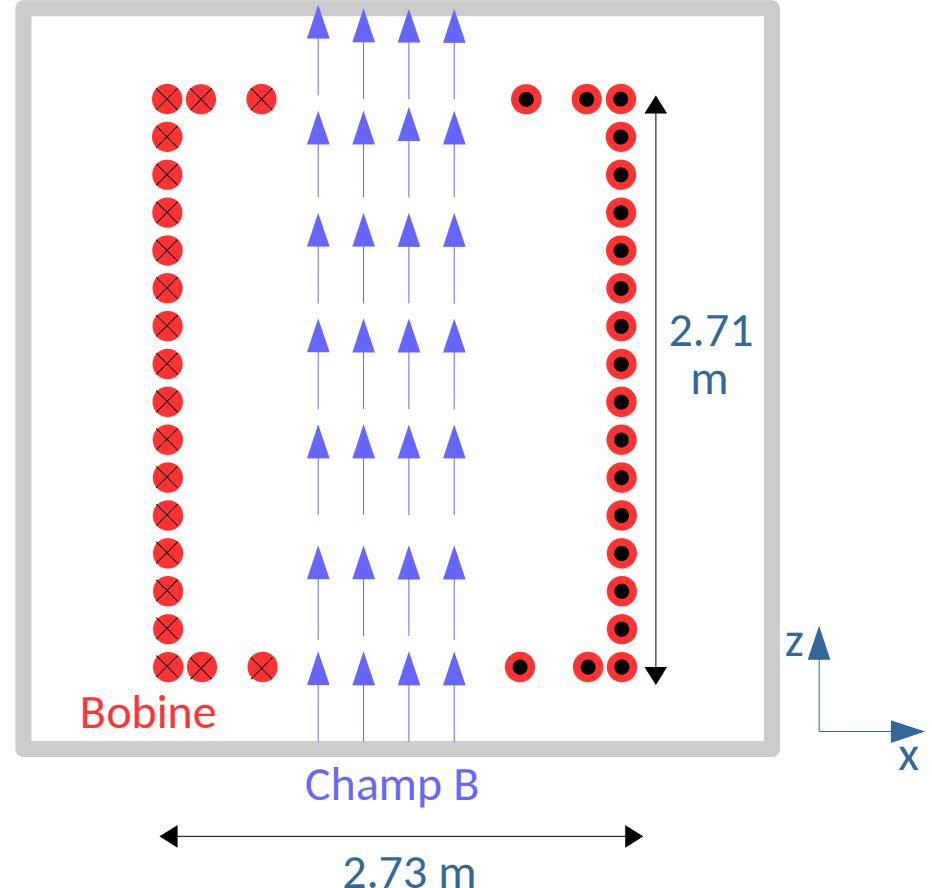
Design de la bobine B_0

B_0 coil : Solénoïde cubique + déviation autour des trous + boucles de courants aux extrémités

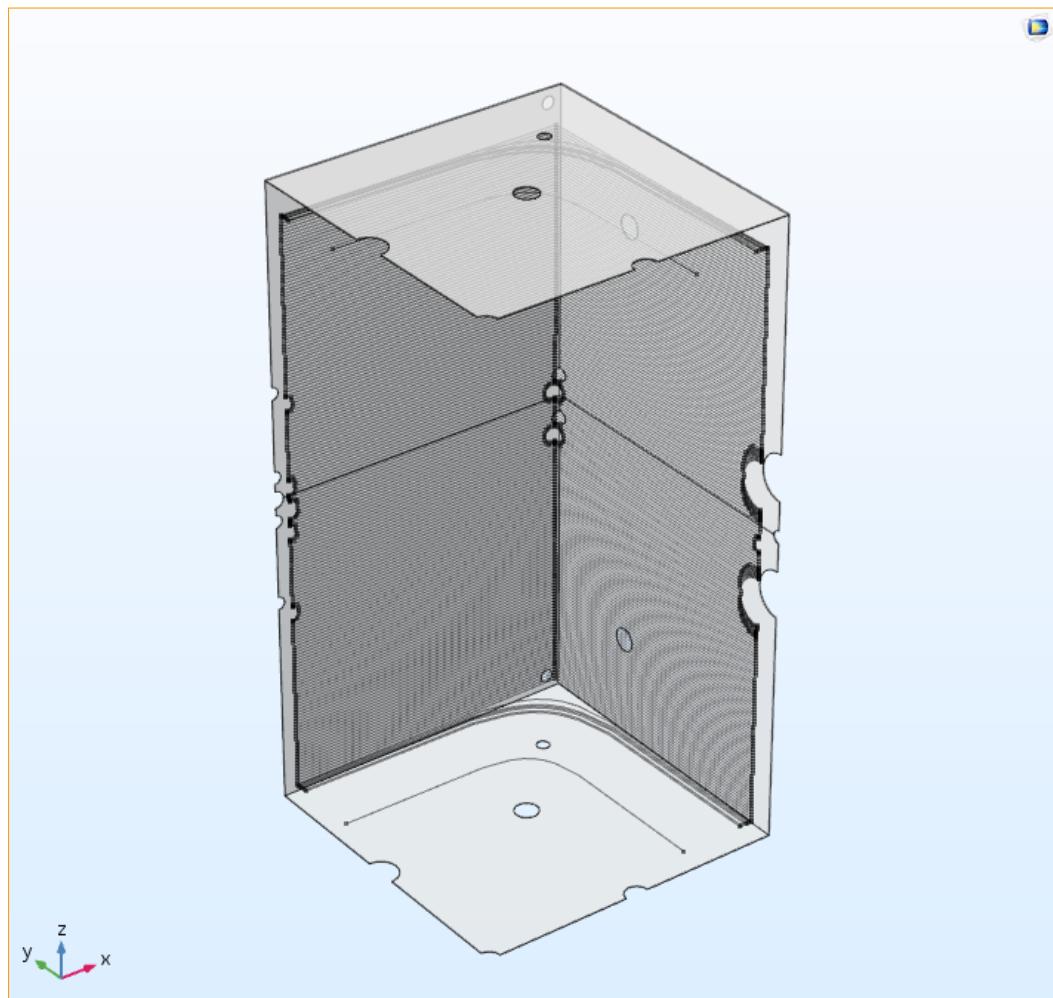


Boucles de courants « Courbes de Lamé »
Aux extrémités (Vue du haut)

Vue de coté
Blindage mu-metal



Design de la bobine B_0



Longueur de la bobine	2730 mm
Hauteur de la bobine	2710 mm
Espacement des fils (coté)	15 mm
Nombre de boucles (coté)	181
Nombre de boucles (extrémité)	7 x 2
Nombre de boucles (total)	195
Courant des fils	11.975 mA
Longueur des fils (total)	~ 2100 m
Resistance ($\emptyset_w = 1,5$ mm, cuivre)	~ 20 Ω

a (mm)	n
1365	0.25
1355	0.3
1345	0.3
1335	0.3
1315	0.3
1305	0.3
1005	0.25

Courbes de Lamé:
 $x = a \cdot \cos^n(\theta)$;
 $y = a \cdot \sin^n(\theta)$; avec
 $\theta \in [0, \pi/2]$.

Design de la bobine B_0

Bobine simulée : 3 plans de courant symétriques et antisymétriques

- XY plan at $z = 0$ m (symétrique)
- XZ plan at $y = 0$ m (antisymétrique)
- YZ plan at $x = 0$ m (antisymétrique)

1/8^{ème} de la bobine est simulé

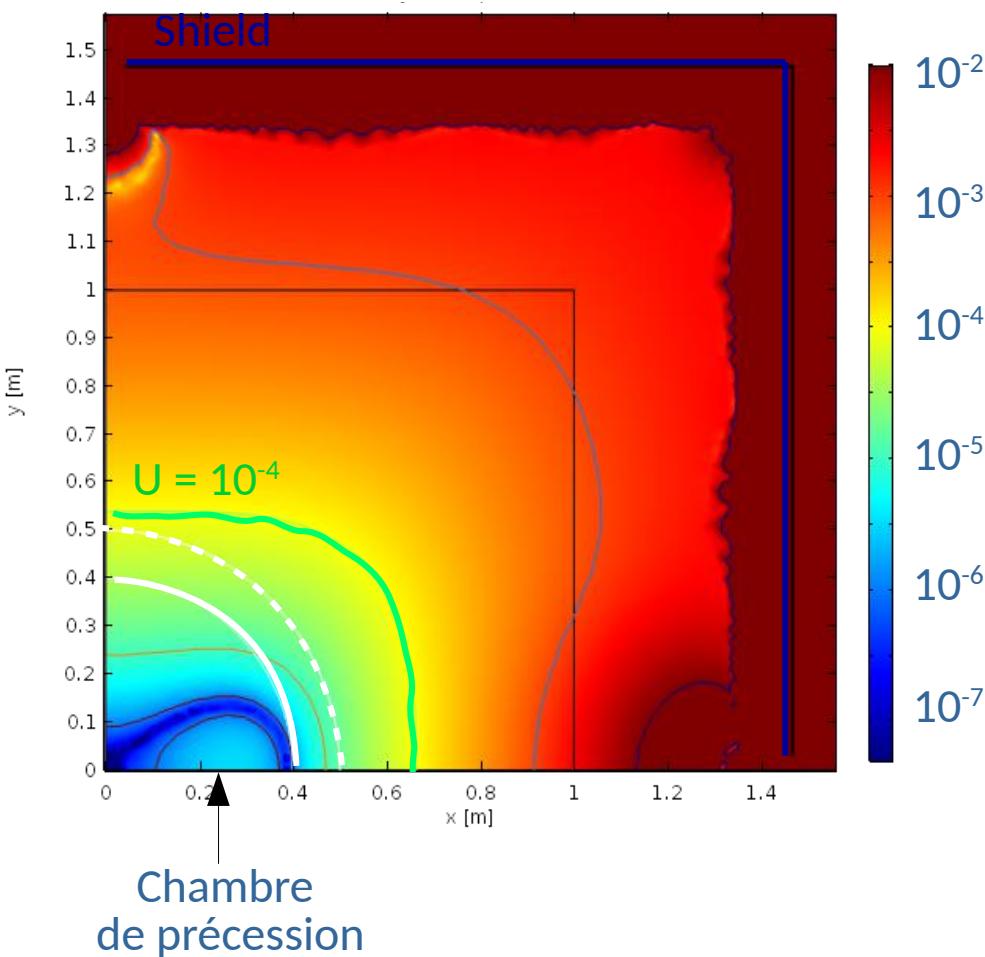
		Composantes du champ		
		$B_x(x,y,z)$	$B_y(x,y,z)$	$B_z(x,y,z)$
Symétries	$X \rightarrow -X$	- $B_x(-x,y,z)$	$B_y(-x,y,z)$	$B_z(-x,y,z)$
	$Y \rightarrow -Y$	$B_x(x,-y,z)$	- $B_y(x,-y,z)$	$B_z(x,-y,z)$
	$Z \rightarrow -Z$	- $B_x(x,y,-z)$	- $B_y(x,y,-z)$	$B_z(x,y,-z)$

Symétries du champ

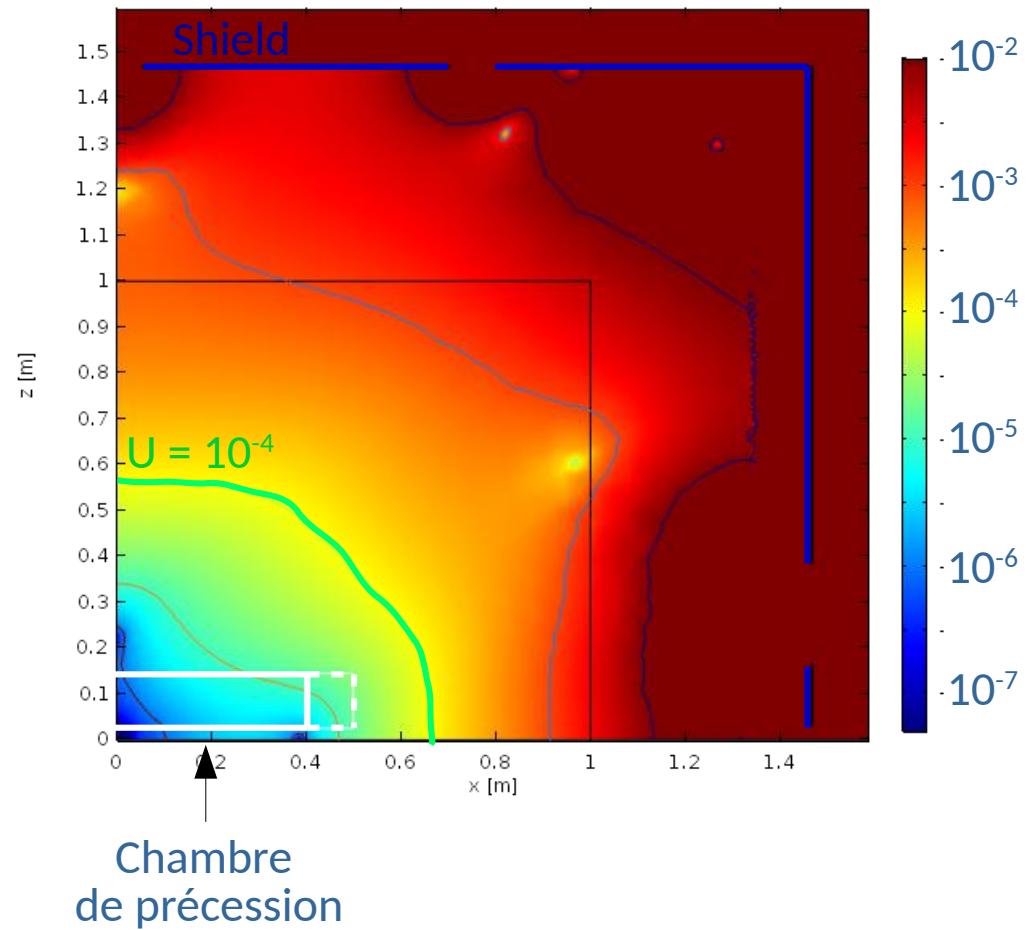
Uniformité du champ produit par B_0

$$\text{Uniformité : } U(\vec{r}) = \frac{|\vec{B}(\vec{r}) - \vec{B}(\vec{0})|}{|\vec{B}(\vec{0})|} ; B(0) = 1.00002 \mu\text{T}$$

Plan horizontal ($z = 0 \text{ m}$)



Plan vertical ($y = 0 \text{ m}$)



$U(r) < 10^{-4}$ dans la chambre ($\emptyset = 80 \text{ cm}$)

Solutions mécaniques – n2EDM BenCo

Rainures = design de B0

Fils bloqués dans les rainures :

$$\varnothing_{\text{fils}} = 1,5 \text{ mm}$$

$$\varnothing_{\text{rainure}} = 1,8 \text{ mm}$$

$$\Delta x = \pm 0,15 \text{ mm}$$

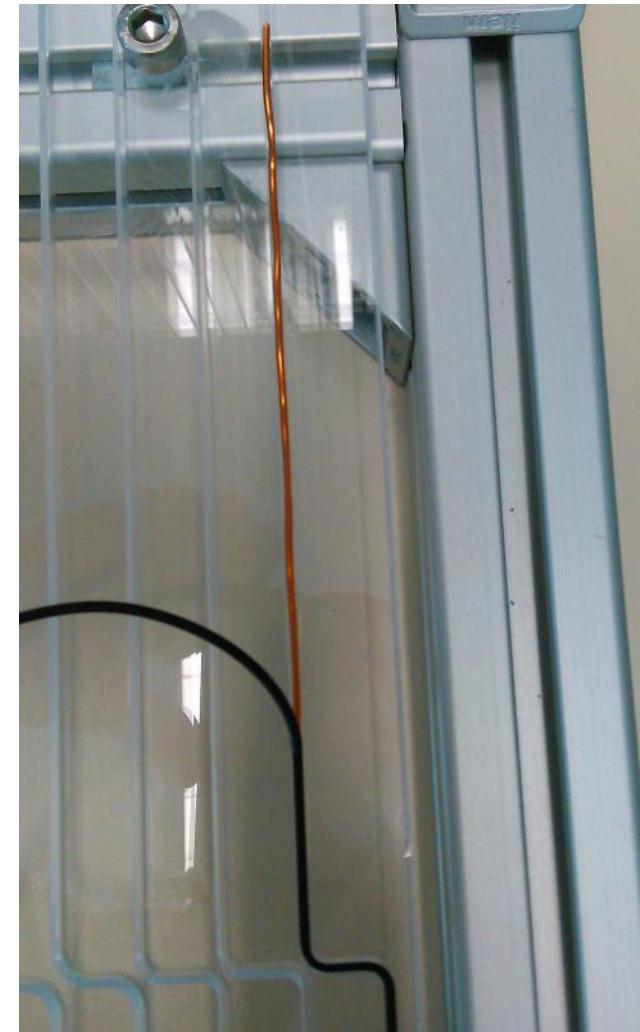
Le démonstrateur
convient mécaniquement

→ Influence des défauts mécaniques ?

Contournement des trous



Prototype en plexiglass



Un fil oscillant dans une rainure du prototype.

Défauts Mécaniques

Type de défaut :	Impact sur le champ magnétique :
Mouvement individuel des fils $\Delta z = 2 \text{ mm}$	
Modification de μ_r du blindage en haut/bas (au max. $\pm 20\%$)	
Déplacement vertical de la chambre de précession $\Delta z = 10 \text{ cm}$	Exigences remplies
Déplacement horizontal de la bobine B0 Par rapport au blindage (selon les axes x, y) $\Delta z = 5 \text{ mm}$	
Déplacement horizontal de la bobine B0 Par rapport au blindage (selon l'axe z)	Champ pas assez homogène A partir de $\Delta z = 0,25 \text{ mm}$

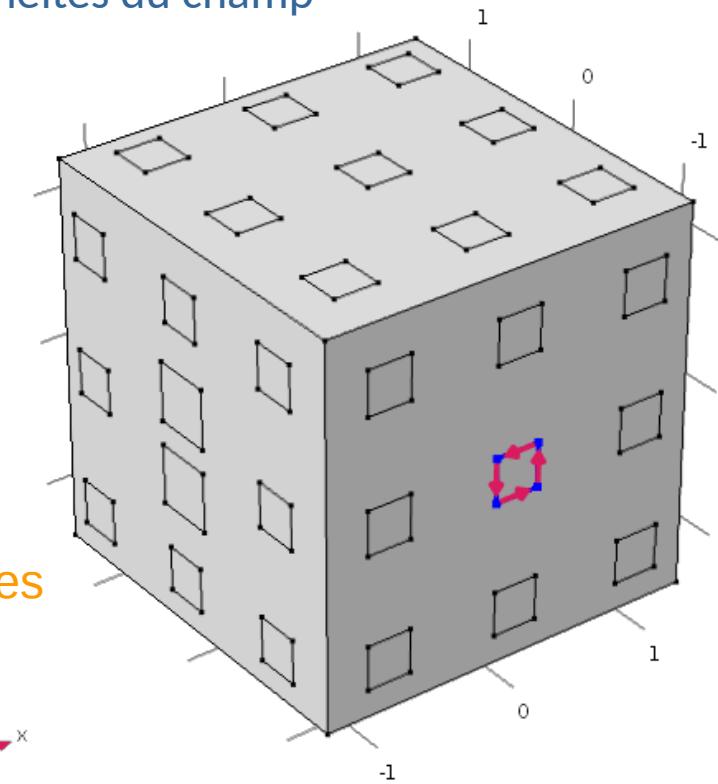
→ Conclusion : Le positionnement vertical doit être très précis ...
 Ce qui n'est pas possible au niveau de 0.25 mm,
 → Nécessité de bobines correctrices

Bobines correctrices

- Jeu de 56 bobines correctrices capable de corriger les inhomogénéités du champ

$$B = \sum_i B_{TCi} \cdot I_{TCi}$$

Inhomogénéités à corriger
 ↑
 Listes des courants des bobines
 ↑
 Champ créé par chaque Bobine correctrice pour Un courant donné



Test sur le champ avec un déplacement global de la boîne B_0
 → Champ assez homogène après correction par les bobines

Conclusion

But de l'expérience : - Participer à expliquer l'asymétrie matière-antimatière
- Contraindre par la mesure du nEDM les différents modèles

nEDM : à PSI : 47 physiciens
autres collaborations, ex : TRIUMF : 47 physiciens

Résultats nEDM : $\sigma(d_n) \sim 1.10^{-26}$ e.cm → Meilleure sensibilité au monde !

Phase II n2EDM : Objectif $\sigma(d_n) \sim 1.10^{-27}$ e.cm, début de prise de données en 2020

Mon travail de thèse :

- Design de la bobine principale B_0 pour n2EDM
→ Très sensible au déplacement vertical
- Design des bobines correctrices pour n2EDM
→ En cours, premiers tests encourageants
- Design d'autres bobines pour n2EDM (RF, bobines de guidage des neutrons)
- Analyse de donnée nEDM prévue
- Etude de certains effets systématiques



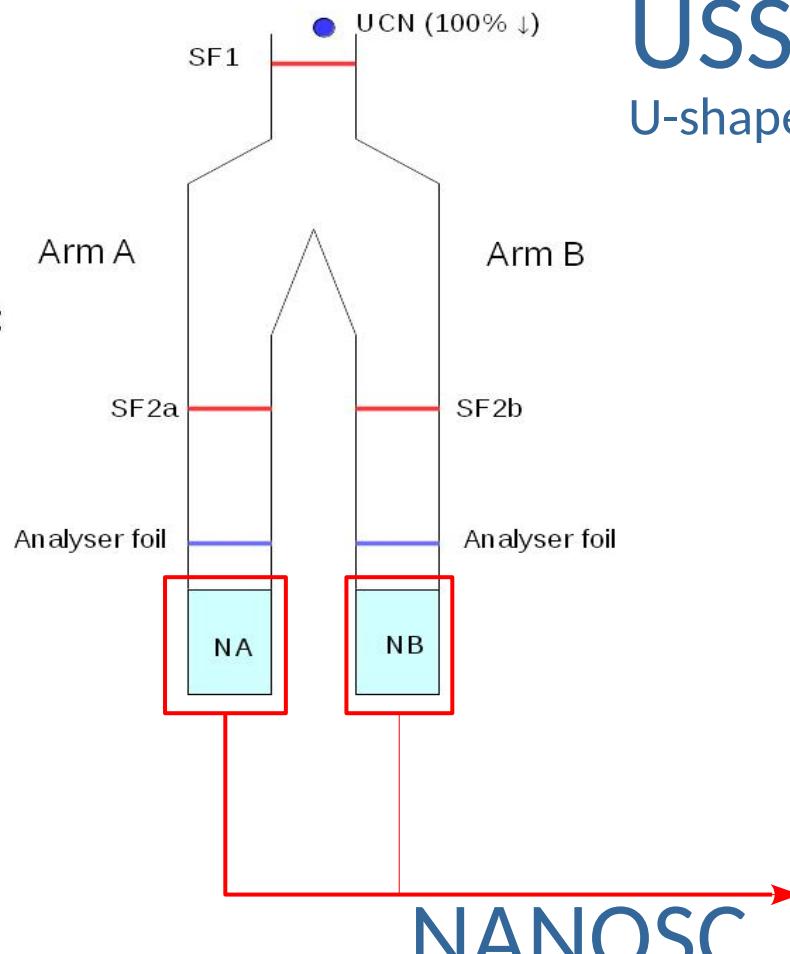
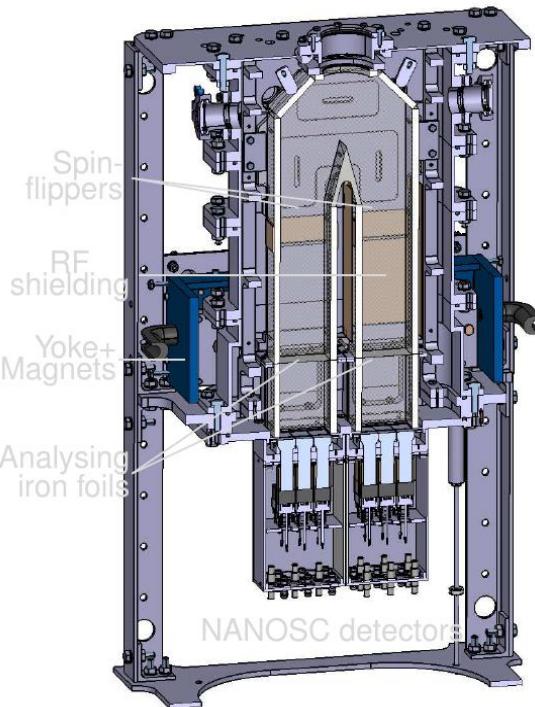
Merci de votre attention !



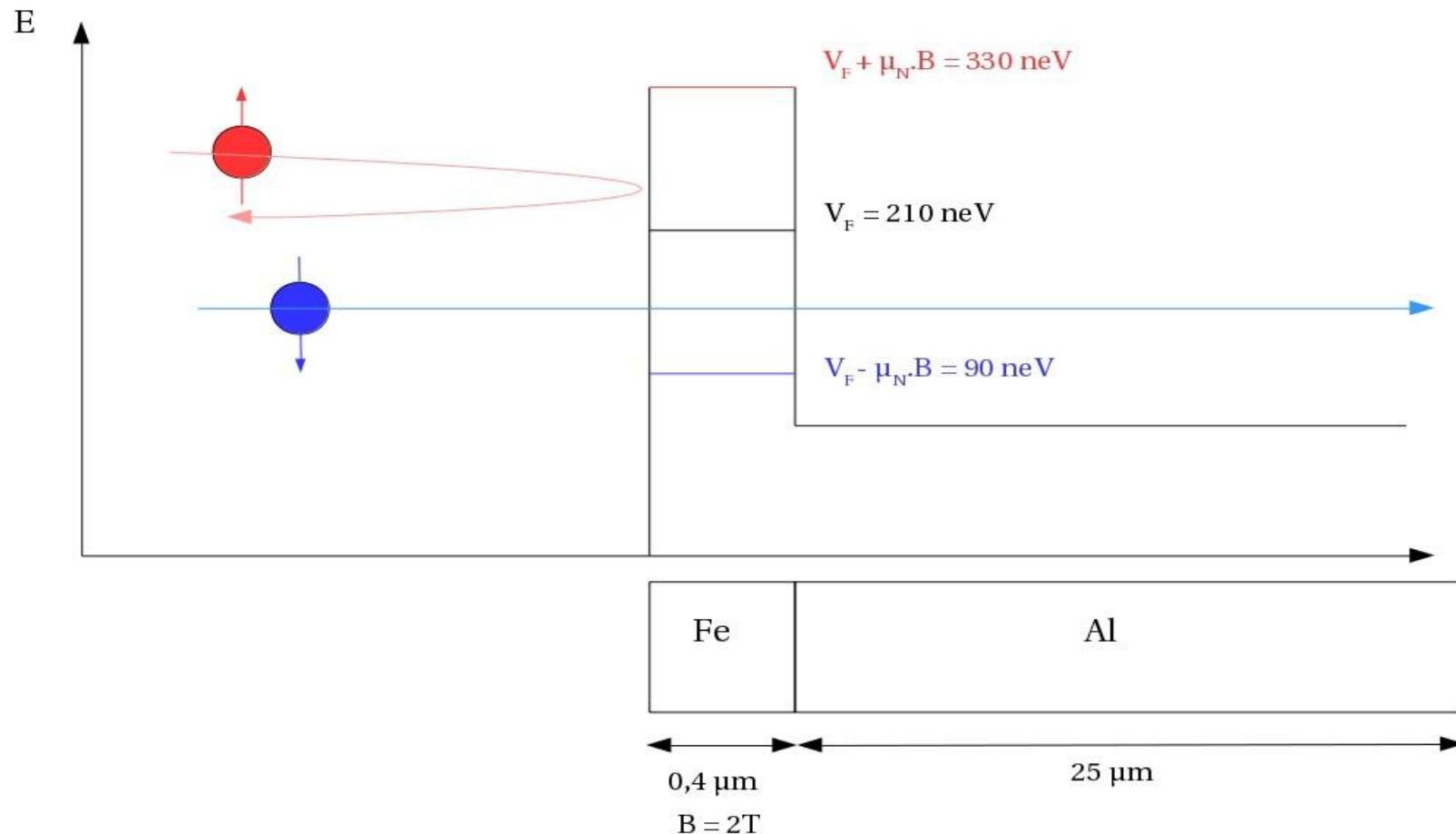
Annex

Detection System	32
How to measure the frequency	36
Robustness of the simulation	38
Single Value Decomposition (SVD)	39
Gradients Requirements	42
Mechanical Imperfections results	43
Basis of harmonic polynomials (up to $l=2$)	52
Summary of allowed gradients (up to $l=2$)	53
Geometrical modifications since Feb. 2017	54
Details on mechanical solutions	55
Shield deformation	56
Main statistics and systematics effects	60

Detection System



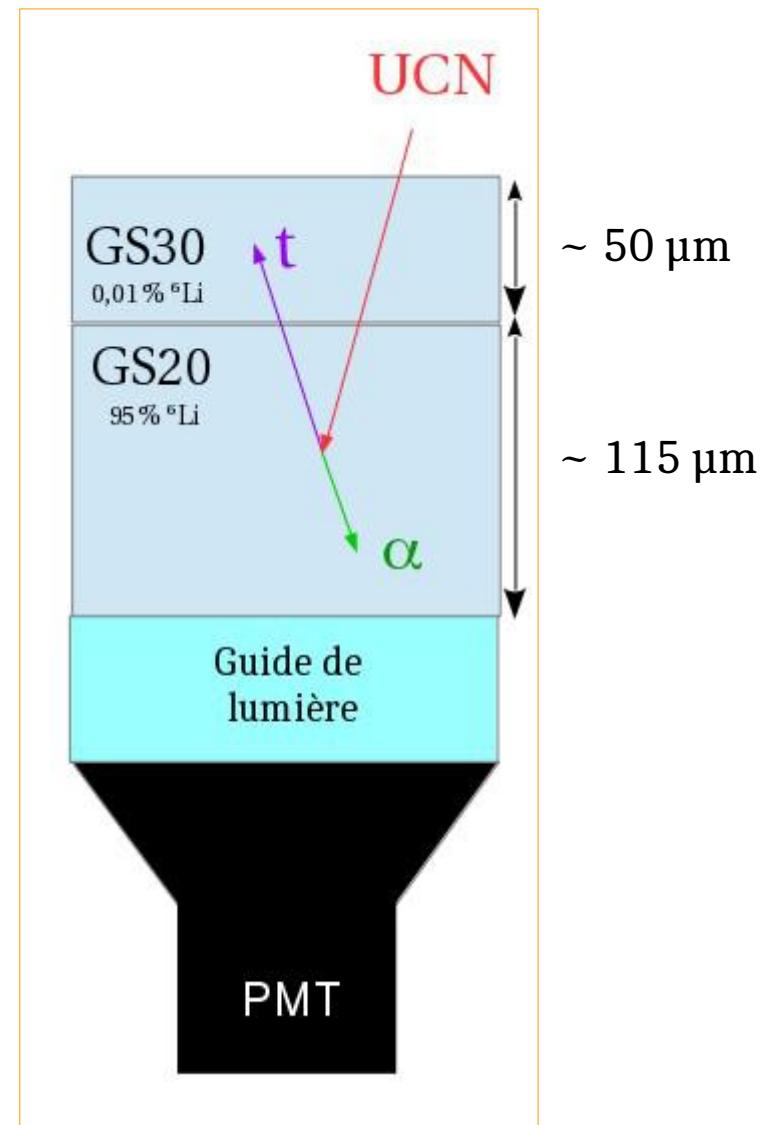
Detection System : Analysers



Detection System : NANOSC



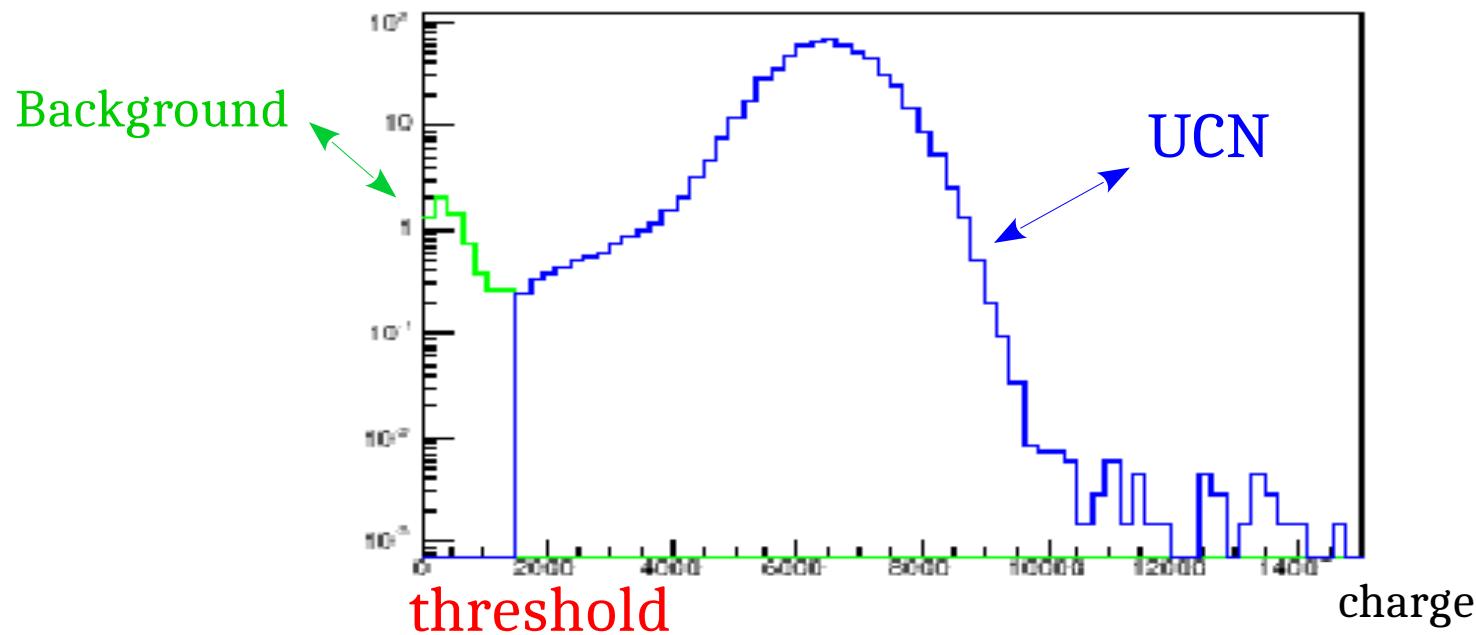
$\sigma_{\text{abs}} = 4 \cdot 10^5$ barns for the UCN



Detection System

The NANOSC measures a charge signal

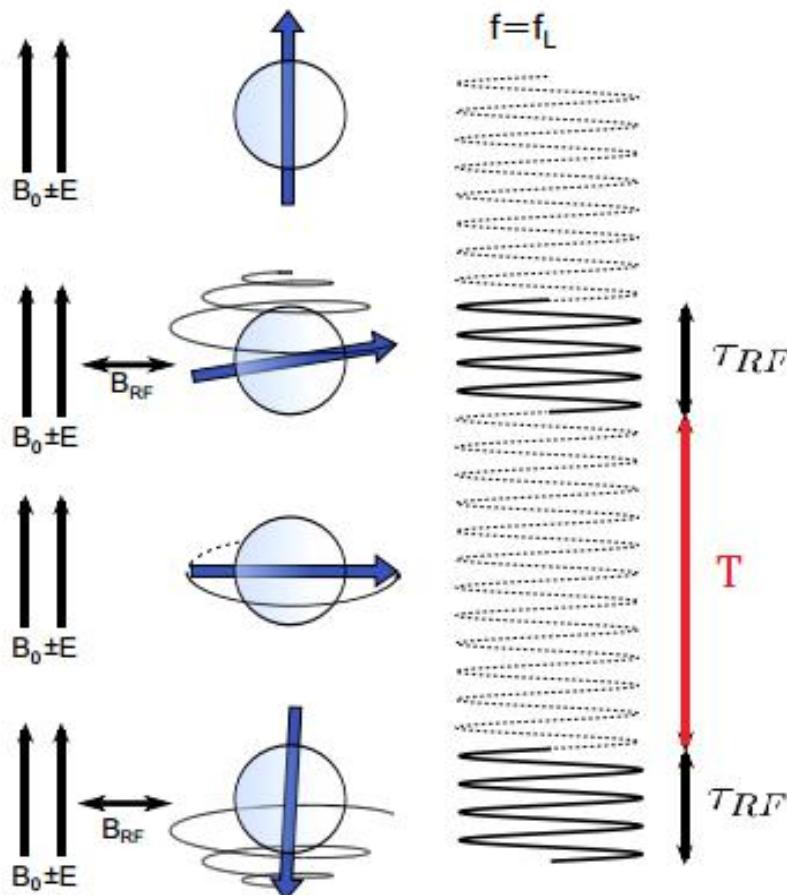
→ Charge spectrum



→ Separation of the contributions with a threshold

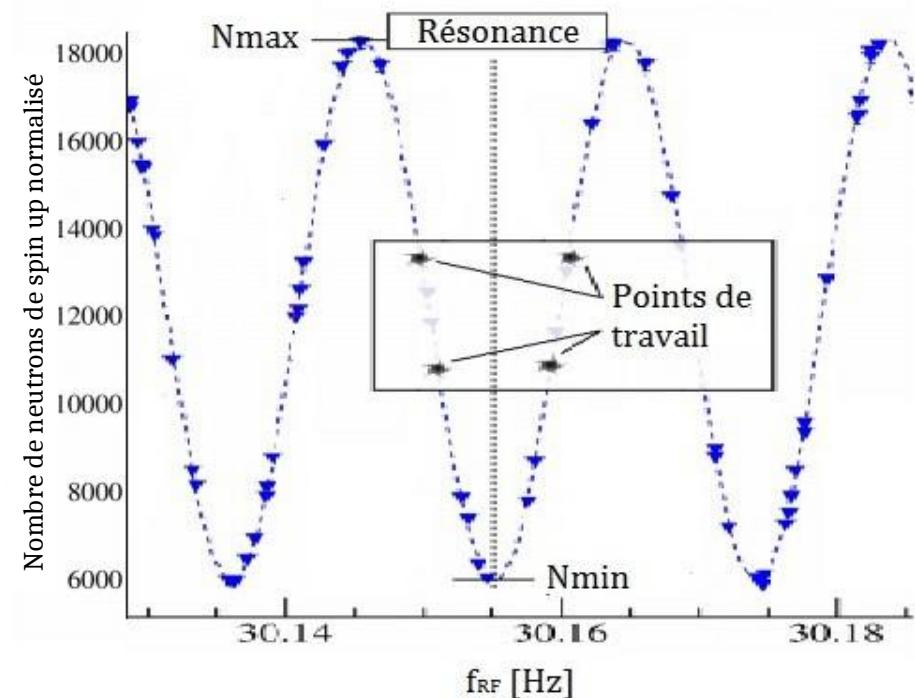
How to measure the frequency

Méthode des champs oscillants séparés de Ramsey



$$N^{\uparrow/\downarrow} = N_0^{\uparrow/\downarrow} \left[1 \mp \alpha^{\uparrow/\downarrow} \cos\left(\pi \frac{f_n - f_{RF}}{\Delta\nu}\right) \right]$$

↳ résonance : $f_{RF} = f_n$
 $\rightarrow N^{\uparrow/\downarrow} = 1 \mp \alpha^{\uparrow/\downarrow}$ (frange centrale)



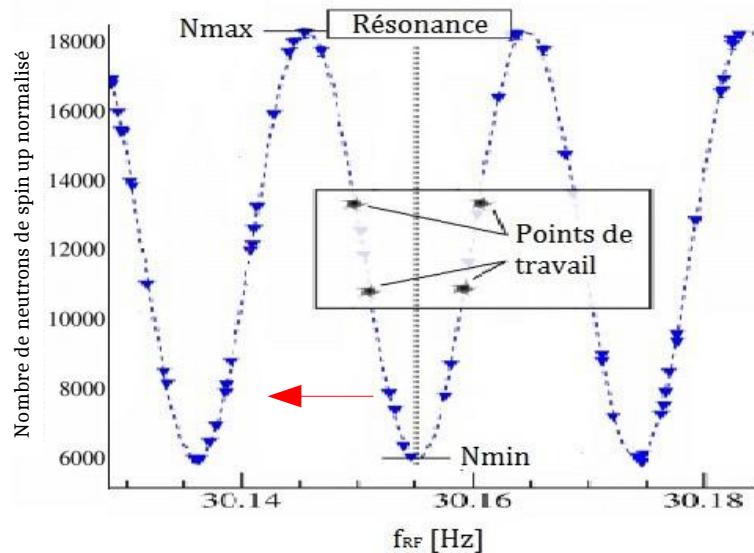
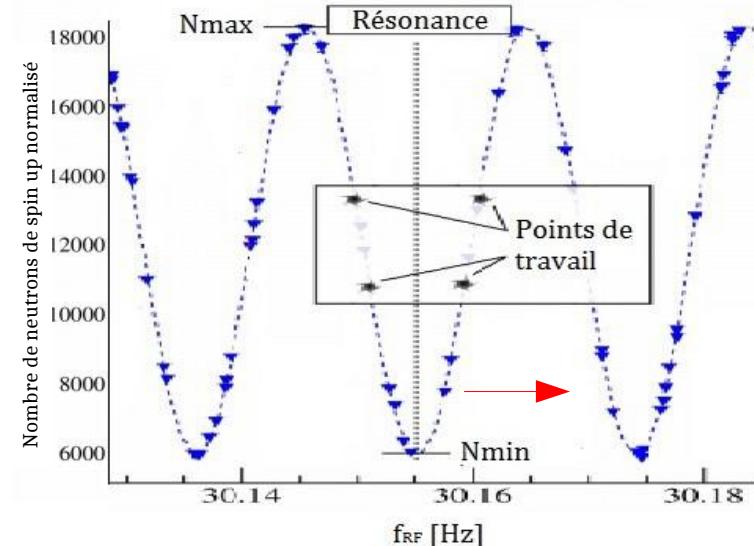
How to measure the frequency

Si $d_n > 0$ et d_n non-nul :

$$E \parallel B \rightarrow v_{\parallel} > v_n$$

$$B ; E = 0 \rightarrow v_n$$

$$E \nparallel B \rightarrow v_{\parallel} < v_n$$



Robustness of the simulation

- COMSOL influence :

- Meshing Size → Low impact on the harmonic decomposition
- Interpolation order → 2nd order precise enough

- SVD influence :

- SVD numerical background → Forbidden/Allowed $\sim 10^{-9}$
- Density of points → Optimal combination : 10000 pts, $V = 1 \text{ m}^3$

Allowed gradients are not influenced by the simulation parameters.
Only forbidden gradients (numerical noise) are moderately changing

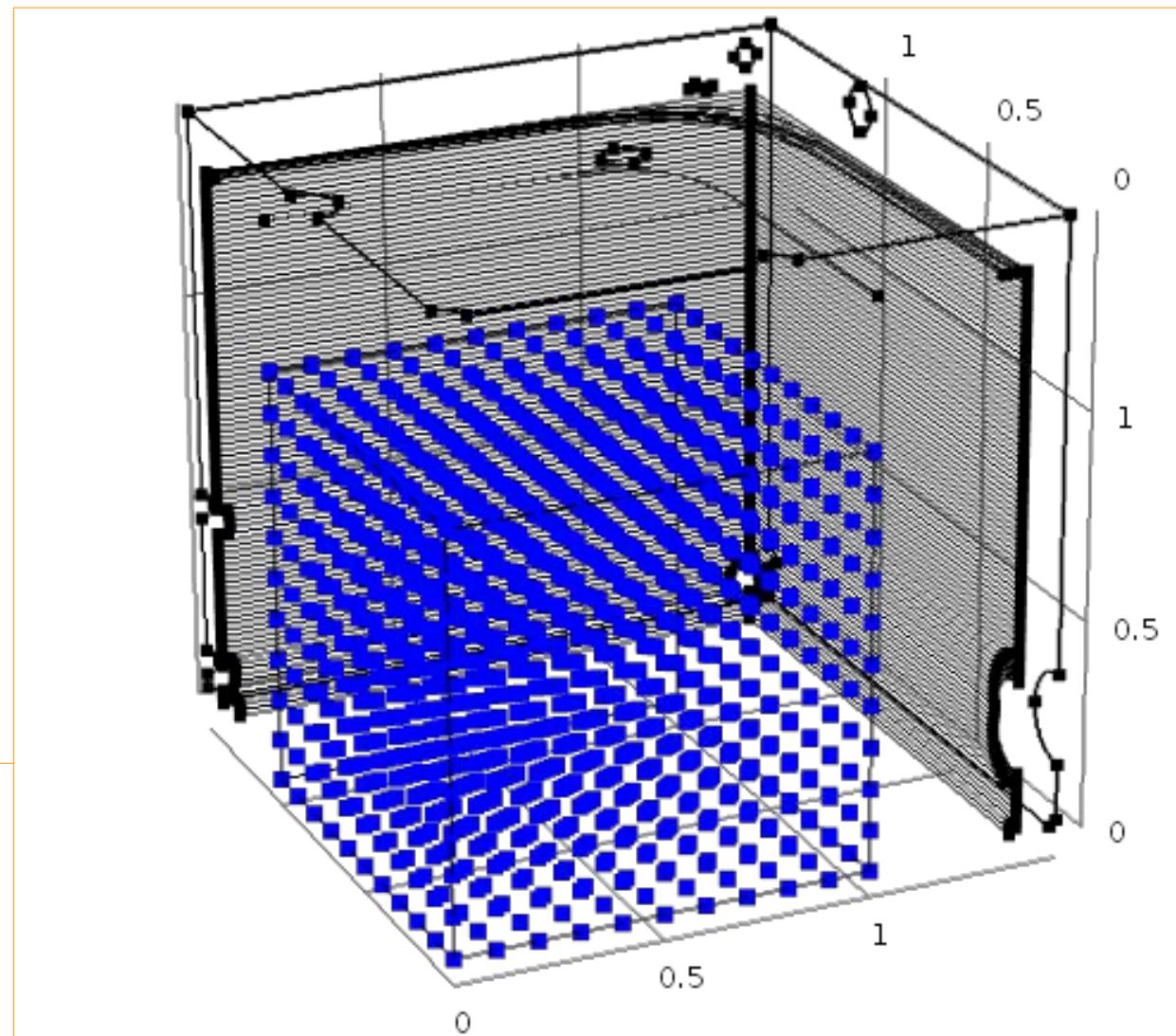
The simulation is robust

Single Value Decomposition method (SVD)

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} B_x(0) \\ B_y(0) \\ B_z(0) \\ B_x(1) \\ B_y(1) \\ B_z(1) \\ \dots \\ B_x(n) \\ B_y(n) \\ B_z(n) \end{pmatrix}$$

↑

Bx, By, Bz components
At several points



Single Value Decomposition method (SVD)

B

$$\begin{pmatrix} B_x(0) \\ B_y(0) \\ B_z(0) \\ B_x(1) \\ B_y(1) \\ B_z(1) \\ \dots \\ B_x(n) \\ B_y(n) \\ B_z(n) \end{pmatrix}$$

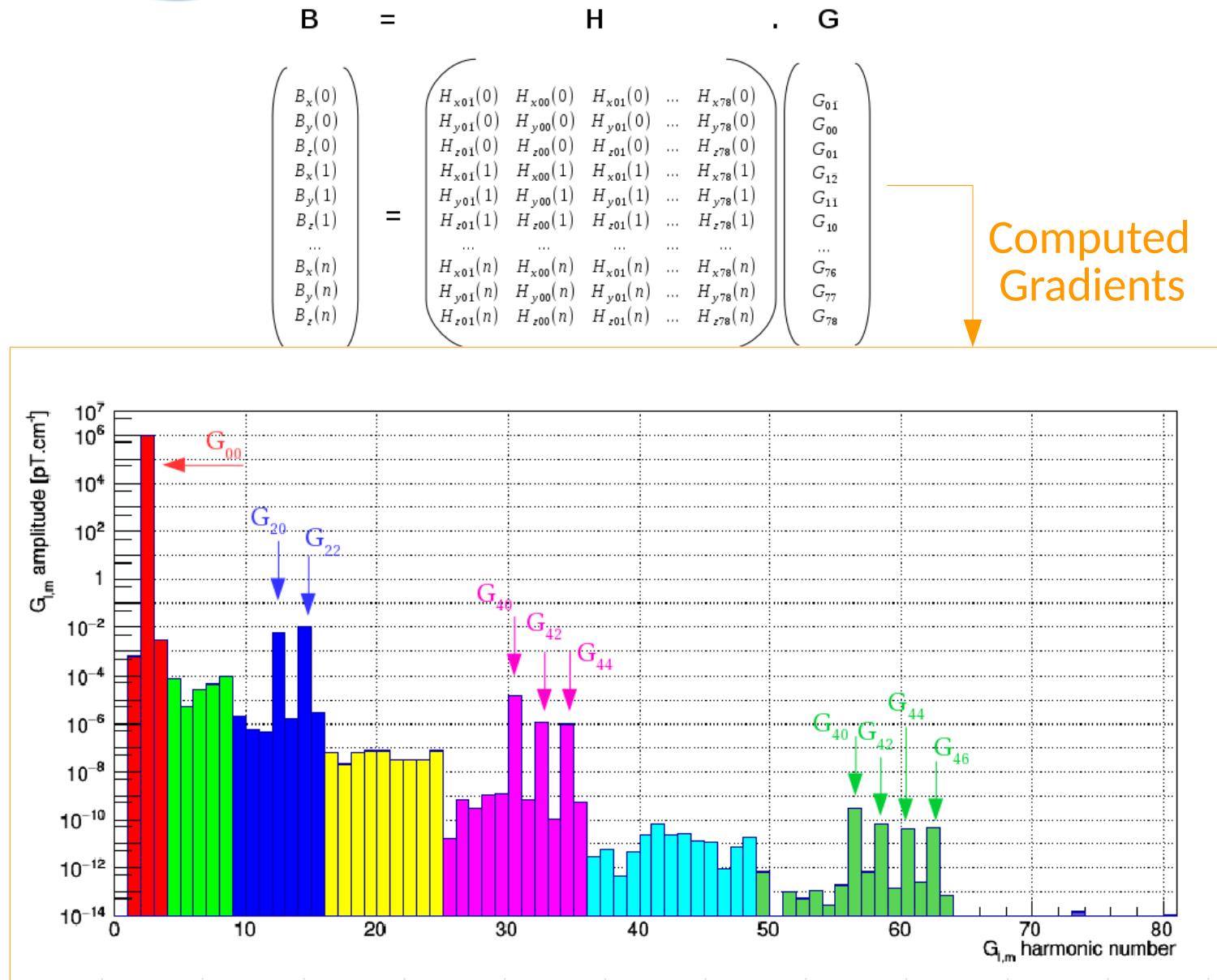
H

$$\begin{pmatrix} H_{x01}(0) & H_{x00}(0) & H_{x01}(0) & \dots & H_{x78}(0) \\ H_{y01}(0) & H_{y00}(0) & H_{y01}(0) & \dots & H_{y78}(0) \\ H_{z01}(0) & H_{z00}(0) & H_{z01}(0) & \dots & H_{z78}(0) \\ H_{x01}(1) & H_{x00}(1) & H_{x01}(1) & \dots & H_{x78}(1) \\ H_{y01}(1) & H_{y00}(1) & H_{y01}(1) & \dots & H_{y78}(1) \\ H_{z01}(1) & H_{z00}(1) & H_{z01}(1) & \dots & H_{z78}(1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{x01}(n) & H_{x00}(n) & H_{x01}(n) & \dots & H_{x78}(n) \\ H_{y01}(n) & H_{y00}(n) & H_{y01}(n) & \dots & H_{y78}(n) \\ H_{z01}(n) & H_{z00}(n) & H_{z01}(n) & \dots & H_{z78}(n) \end{pmatrix}$$

Harmonic polynomials values
for the same points

I	m	H_x	H_y	H_z	n°
0	-1	0	1	0	1
0	0	0	0	1	2
0	1	1	0	0	3
1	-2	y	x	0	4
1	-1	0	z	y	5
1	0	-x/2	-y/2	z	6
1	1	z	0	x	7
1	2	x	-y	0	8
2	-3	2xy	$x^2 - y^2$	0	9

Single Value Decomposition method (SVD)



Gradients Requirements

Field at the center of the coil	$B_0 = 1 \mu\text{T}$
Statistical sensitivity : Neutron depolarisation ¹ (< 2 %)	$\partial_x B_z = G_{1,-1}, \partial_y B_z = G_{1,1} < 8 \text{ pT.cm}^{-1}$
Statistical sensitivity : RF-pulse ($\alpha_{\text{loss}} < 2 \%$)	$\partial_z B_z = G_{1,0} < 0.7 \text{ pT.cm}^{-1}$
Systematic effect : ^{199}Hg motional false EDM corrected with crossing point technique ² $d_n^{\text{false}} < 5.10^{-28} \text{ e.cm}$	$G_{1,0}$ corrected $G_{3,0} < 3.3.10^{-5} \text{ pT.cm}^{-3}$ $G_{5,0} < 1.1.10^{-8} \text{ pT.cm}^{-5}$ $(D = 100 \text{ cm}, H = 12 \text{ cm}, H' = 17 \text{ cm})$

¹C. L. Bohler and D. D. McGregor, PRA 49 MC Gregor (1994), <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.49.2755>

²G. Pignol, S. Roccia, Electric-dipole-moment searches: Reexamination of frequency shifts for particles in traps, Phys. Rev. A 85 (4) (2012) 042105

Influence of the wire positionning

Two different type of movements were studied :

- Random wire displacements

Side wires

$$z_{\text{wires}} = z_{\text{init}} + z_{\text{displacement}}$$

Lamé curves

$$\begin{aligned} x_{\text{lame}} &= (a + x_{\text{displacement}}) \cdot \cos^n(\theta) \\ y_{\text{lame}} &= (a + y_{\text{displacement}}) \cdot \sin^n(\theta) \end{aligned}$$

With $\{x, y, z\}_{\text{displacement}} \in [-0.25 ; 0.25] \text{ mm}$ (realistic)
 Or $\in [-2.00 ; 2.00] \text{ mm}$ (extreme case)

- Random wire oscillations

Side wires

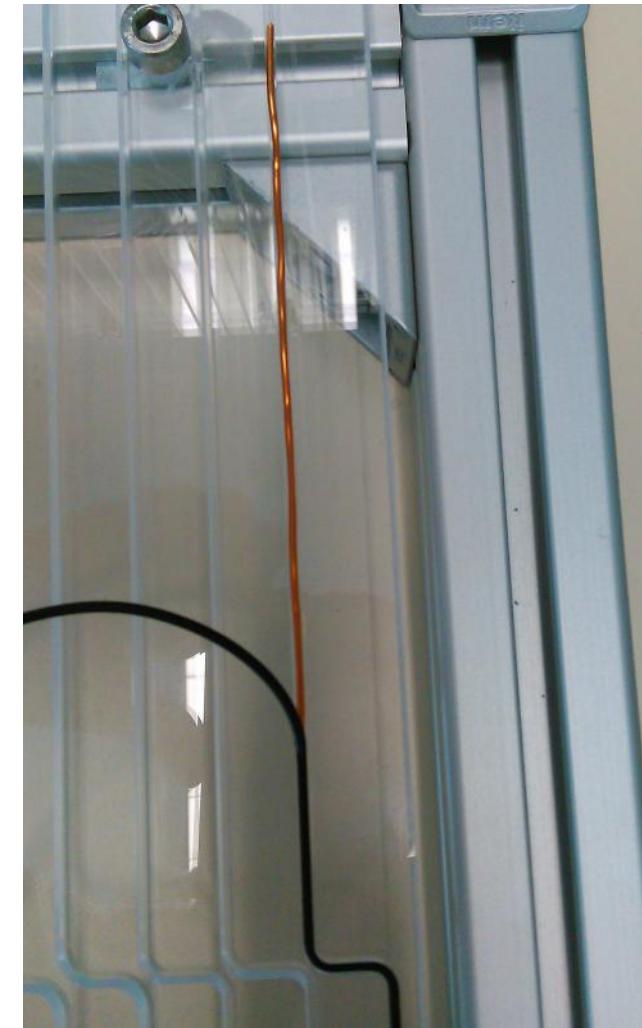
$$z_{\text{wires}} = z_{\text{init}} + A \cdot \cos(v_z \cdot \theta + \phi)$$

Lamé curves

$$\begin{aligned} x_{\text{wires}} &= a \cdot \cos^n(\theta) + A \cdot \cos(v_x \cdot \theta + \phi) \\ y_{\text{wires}} &= a \cdot \sin^n(\theta) + A \cdot \cos(v_y \cdot \theta + \phi) \end{aligned}$$

With $\{v_x, v_y, v_z\} \in [0 ; 366] \text{ m}^{-1}$ (test on prototype : $v_z = 27 \text{ m}^{-1}$)
 $\phi \in [0 ; 2\pi] \text{ rad}$

$A \in [-0.25 ; 0.25] \text{ mm}$ (realistic)
 Or $\in [-2.00 ; 2.00] \text{ mm}$ (extreme case)



Main gradients from wire positionning

Wire movements	Gradient Requirements	w/o movements	$W_{\text{disp}} \in [-0.25 ; 0.25] \text{ mm}$	$W_{\text{disp}} \in [-2.00 ; 2.00] \text{ mm}$	$W_{\text{osc}} \in [-0.25 ; 0.25] \text{ mm}$	$W_{\text{osc}} \in [-2.00 ; 2.00] \text{ mm}$
B_{center} [pT]	= 1.10^6	$1.0000.10^6$	$1.0000.10^6$	$1.0000.10^6$	$1.0000.10^6$	$0.9999.10^6$
$G_{0,0}$ [pT]	—	$1.00.10^6$	$1.00.10^6$	$1.00.10^6$	$1.00.10^6$	$1.00.10^6$
$G_{1,-1}$ [pT.cm ⁻¹]	< 8	$3.36.10^{-6}$	$-8.87.10^{-6}$	$-7.61.10^{-7}$	$-1.07.10^{-5}$	$-1.37.10^{-7}$
$G_{1,0}$ [pT.cm ⁻¹]	< 0,7	$-2.00.10^{-5}$	$-3.37.10^{-2}$	$-1.45.10^{-1}$	$-4.23.10^{-2}$	$-6.58.10^{-1}$
$G_{1,1}$ [pT.cm ⁻¹]	< 8	$-4.31.10^{-5}$	$-2.14.10^{-4}$	$2.11.10^{-4}$	$2.10.10^{-4}$	$2.11.10^{-4}$
$G_{3,0}$ [pT.cm ⁻³]	< $3.3.10^{-5}$	$7.99.10^{-8}$	$1.89.10^{-6}$	$1.64.10^{-5}$	$1.04.10^{-6}$	$-7.18.10^{-6}$
$G_{5,0}$ [pT.cm ⁻⁵]	< $1.1.10^{-8}$	$2.39.10^{-11}$	$5.80.10^{-10}$	$3.81.10^{-9}$	$2.77.10^{-11}$	$3.14.10^{-10}$

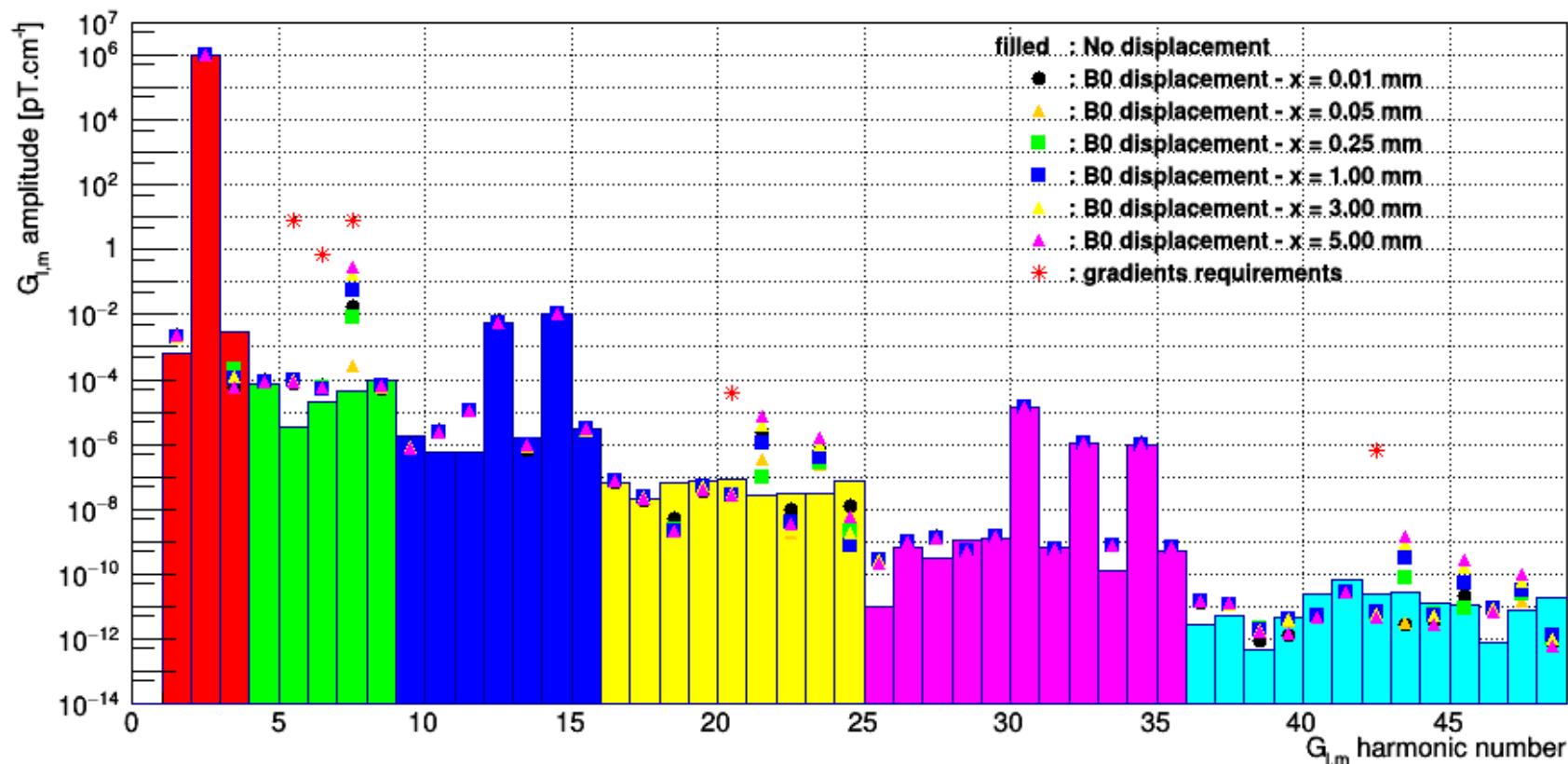


Forbidden
Gradients

Displacement of the B_0 coil with respect to the shield

Displacements of the B_0 coil along x axis :

Harmonic Decomposition

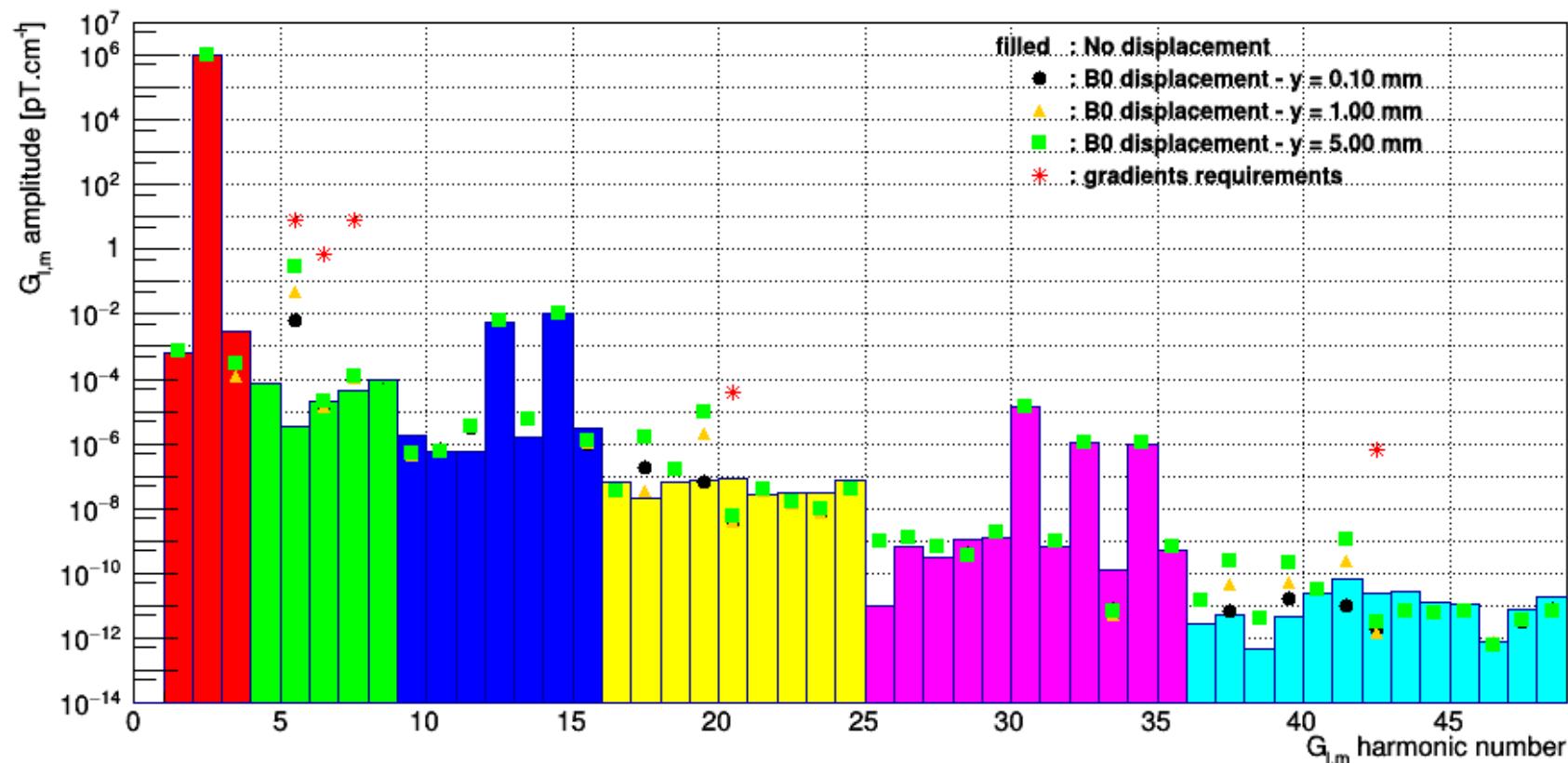


→ The requirements are fulfilled even a $x = 5\text{ mm}$ displacement

Displacement of the B_0 coil with respect to the shield

Displacements of the B_0 coil along y axis :

Harmonic Decomposition

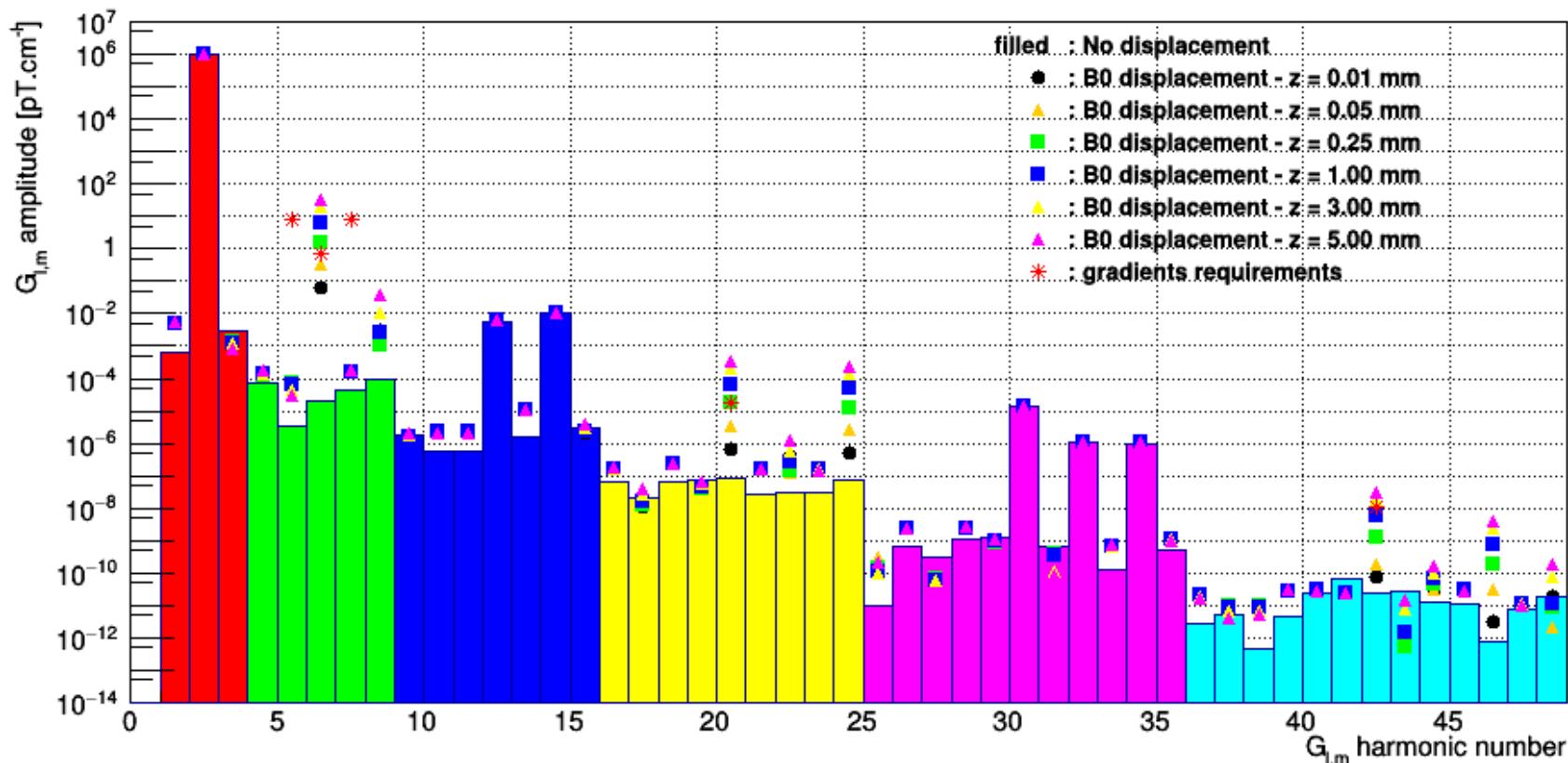


→ The requirements are fulfilled even a $y = 5\text{ mm}$ displacement

Displacement of the B_0 coil with respect to the shield

Displacements of the B_0 coil along z axis :

Harmonic Decomposition



→ $G_{1,0}$ requirement exceeded after $z = 0.25 \text{ mm}$ displacement

→ $G_{1,0}$ & $G_{3,0}$ requirements exceeded after $z = 1 \text{ mm}$ displacement

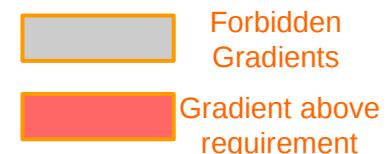
Displacement of the B_0 coil with respect to the shield

Displacements of the B_0 coil along x, y and z axis :

- X-symmetry broken : $G_{1,1}$, $G_{3,1}$, $G_{3,3}$... gradients allowed
- Y-symmetry broken : $G_{1,-1}$, $G_{3,-3}$, $G_{3,-1}$... gradients allowed
- Z-symmetry broken : $G_{1,0}$, $G_{1,2}$, $G_{3,0}$, $G_{3,2}$, $G_{3,4}$, $G_{5,0}$... gradients allowed

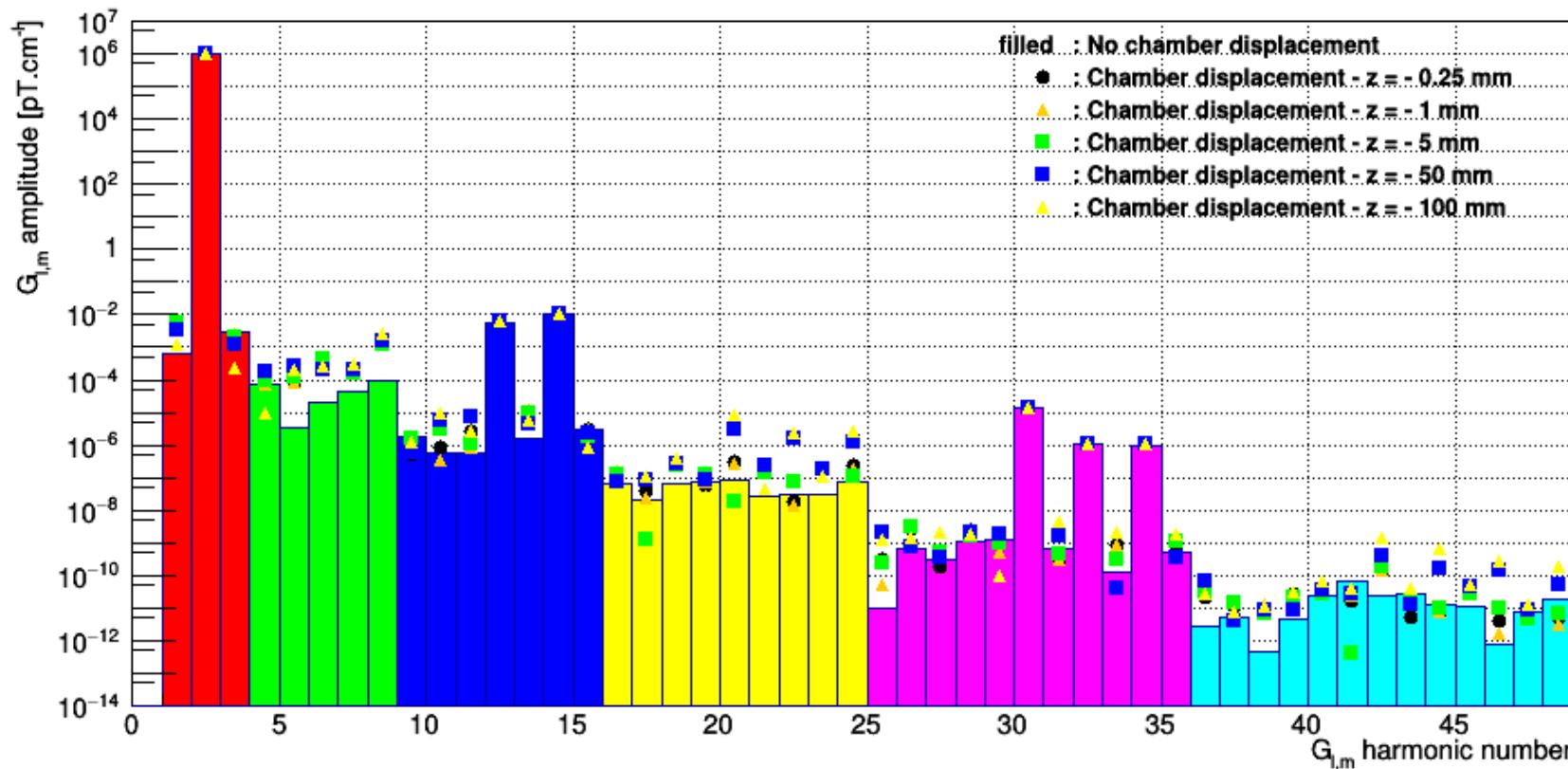
B_0 movements	Gradient Requirements	w/o movements	$z_d = 0.25$ mm	$z_d = 1$ mm	$z_d = 5$ mm	$x_d = 5$ mm	$y_d = 5$ mm
B_{center} [pT]	= 1.10⁶	1.0000.10 ⁶					
$G_{0,0}$ [pT]	—	1.00.10 ⁶					
$G_{1,-1}$ [pT.cm ⁻¹]	< 8	3.36.10 ⁻⁶	-1.07.10 ⁻⁵	-6.26.10 ⁻⁵	-2.94.10 ⁻⁵	-8.55.10 ⁻⁵	2.87.10 ⁻¹
$G_{1,0}$ [pT.cm ⁻¹]	< 0,7	-2.00.10 ⁻⁵	1.60	6.43	32.5	-5.93.10 ⁻⁵	2.16.10 ⁻⁵
$G_{1,1}$ [pT.cm ⁻¹]	< 8	-4.31.10 ⁻⁵	-2.10.10 ⁻⁴	1.60.10 ⁻⁴	1.78.10 ⁻⁴	2.99.10 ⁻¹	1.26.10 ⁻⁴
$G_{3,0}$ [pT.cm ⁻³]	< 3.3.10 ⁻⁵	7.99.10 ⁻⁸	1.69.10 ⁻⁵	-6.78.10 ⁻⁵	3.38.10 ⁻⁴	-2.83.10 ⁻⁸	-5.78.10 ⁻⁹
$G_{5,0}$ [pT.cm ⁻⁵]	< 1.1.10 ⁻⁸	2.39.10 ⁻¹¹	-1.30.10 ⁻⁹	-5.66.10 ⁻⁹	-2.87.10 ⁻⁸	4.76.10 ⁻¹²	3.20.10 ⁻¹²

- large x & y displacement → gradients OK
- z displacement of 0.25 mm → $G_{1,0}$ requirement exceeded



Displacement of the precession chamber with respect to the B_0 coil and the shield

Harmonic Decomposition

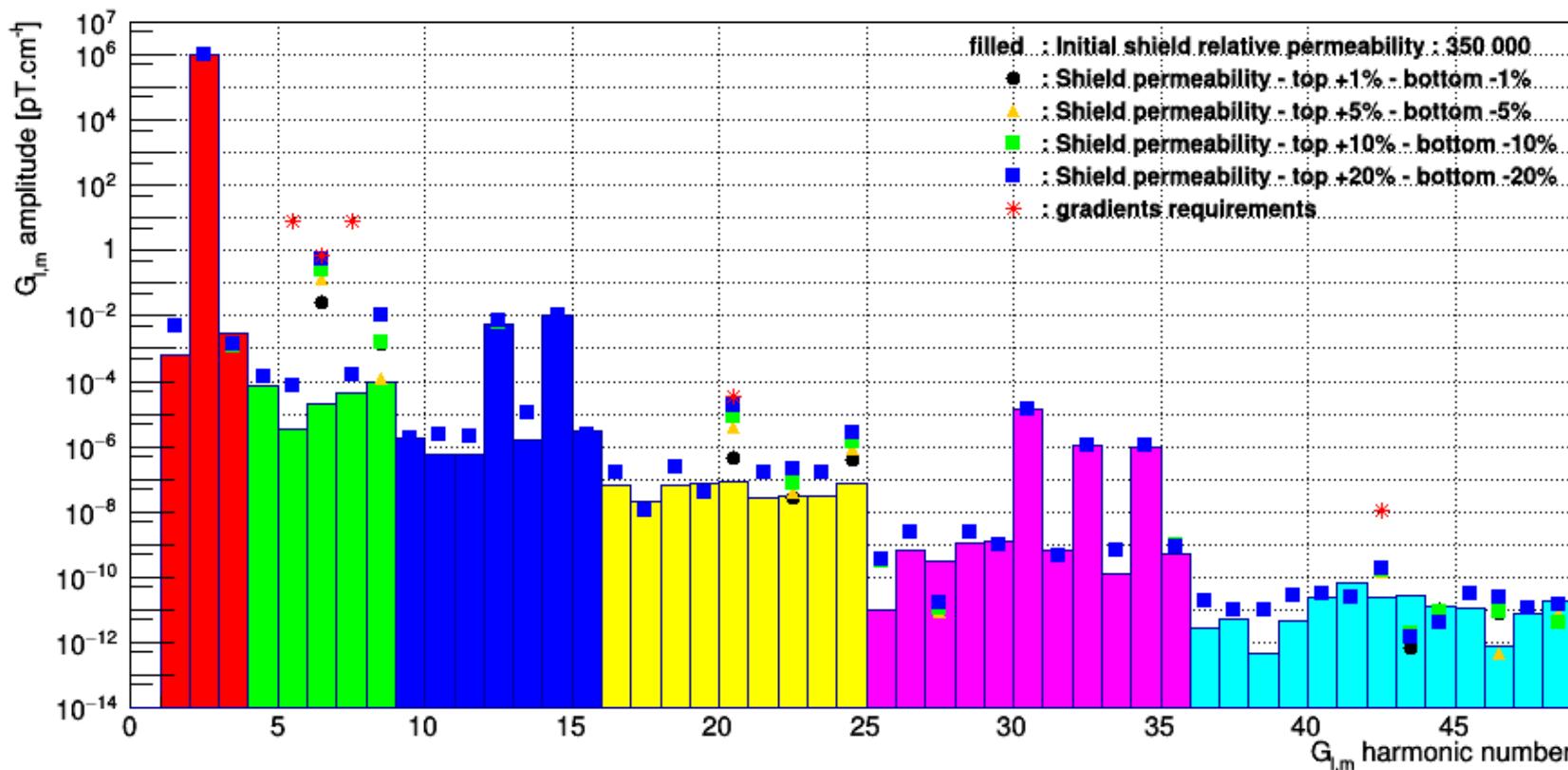


- Weak increase of the background (max ~ factor 15)
- Weak emergence of Z-symmetry breaks gradients for big displacements (5, 10 cm)
 - ↳ Good uniformity on the chambers area

Influence of the shield relative permeability

→ Ordinary relative permeability of the shield $\mu_r = 350,000$ changed for the top & bottom layers

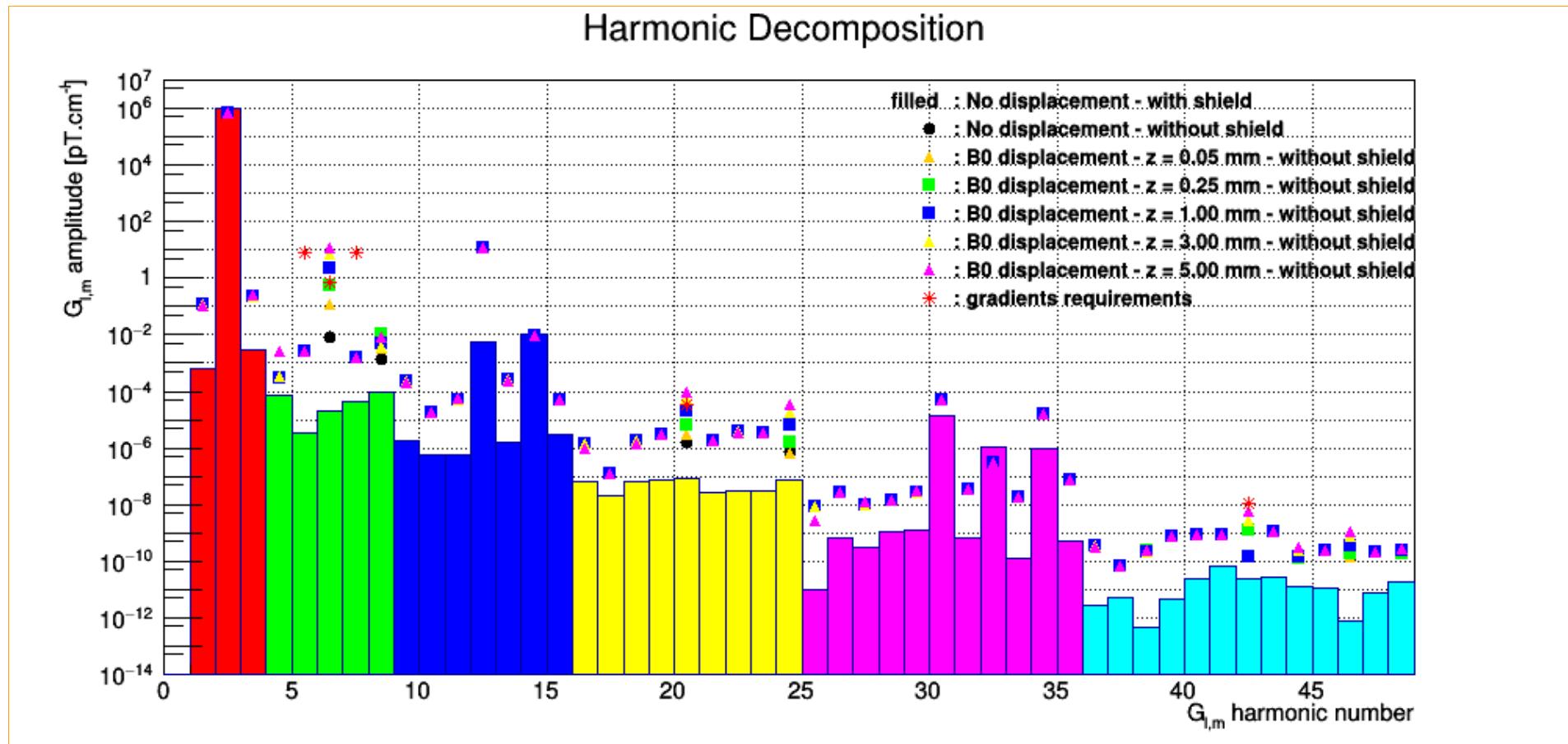
Harmonic Decomposition



→ Breaks z-symmetry : $G_{1,0}, G_{1,2}, G_{3,0}, G_{3,2}, G_{3,4}, G_{5,0}$ etc. are allowed

→ Even +/-20 % difference of permeability ($\mu_r(\text{top}) = 420,000$, $\mu_r(\text{bottom}) = 280,000$) stays under requirements (but close to it)

Displacement of the B_0 coil with and without shield



→ Without shield, Global loss of uniformity (all gradients become bigger) ;
 → But weaker dependence on the global B_0 coil vertical displacement

↳ Modifying coil-shield distance may help to reduce this dependence

Basis of harmonic polynomials (up to $l=2$)

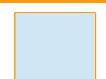
l	m	H_x	H_y	H_z	n^o
0	-1	0	1	0	1
0	0	0	0	1	2
0	1	1	0	0	3
1	-2	y	x	0	4
1	-1	0	z	y	5
1	0	$-x/2$	$-y/2$	z	6
1	1	z	0	x	7
1	2	x	$-y$	0	8
2	-3	$2xy$	x^2-y^2	0	9
2	-2	$2yz$	$2xz$	$2xy$	10
2	-1	$-xy/2$	$(x^2+3y^2-4z^2)/4$	$2yz$	11
2	0	$-xz$	$-yz$	$z^2-(x^2+y^2)/2$	12
2	1	$(3x^2+y^2-4z^2)/4$	$-xy/2$	$2xz$	13
2	2	$2xz$	$-2yz$	x^2-y^2	14
2	3	x^2-y^2	$-2xy$	0	15



$|l=0$



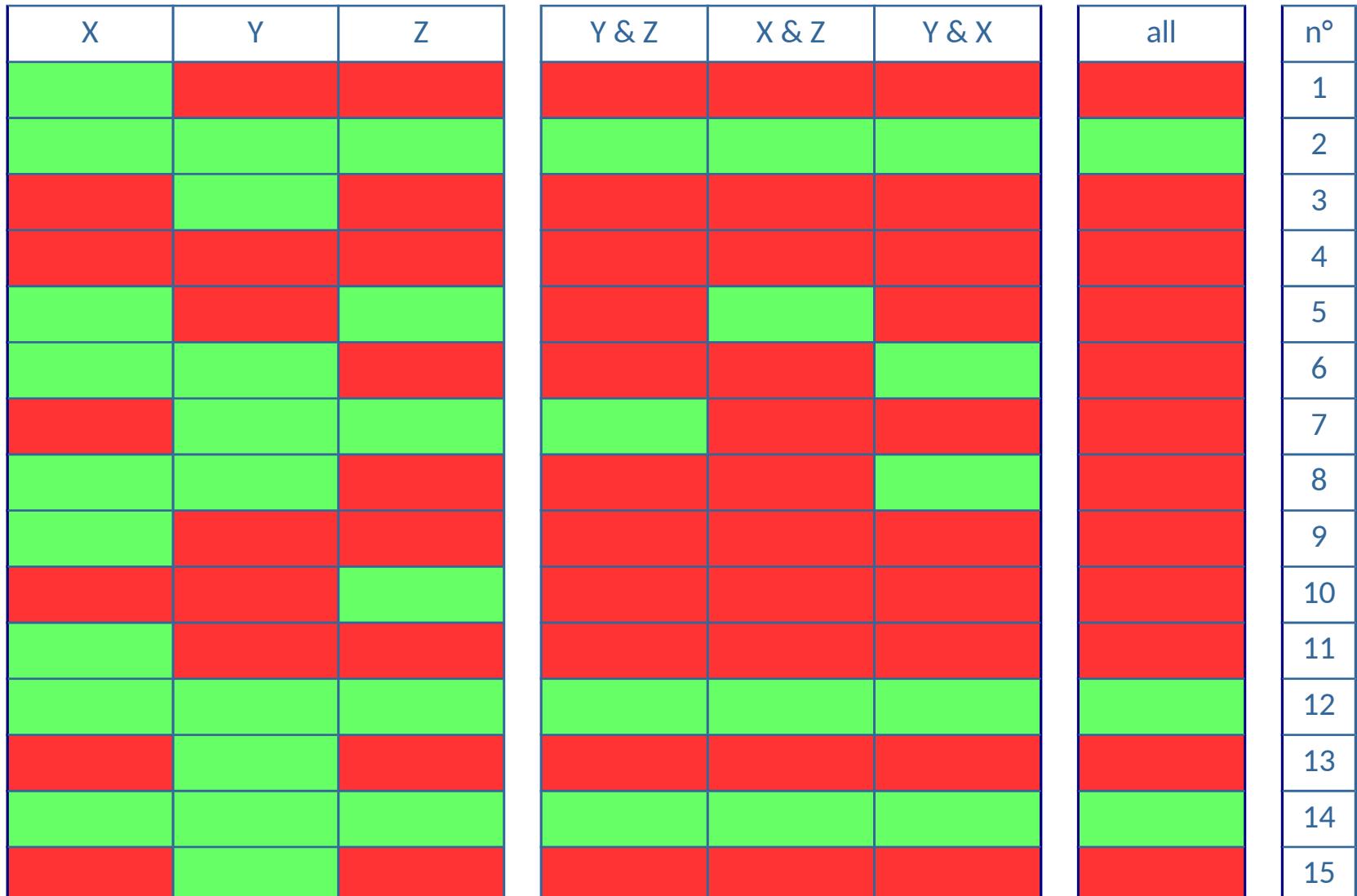
$|l=1$



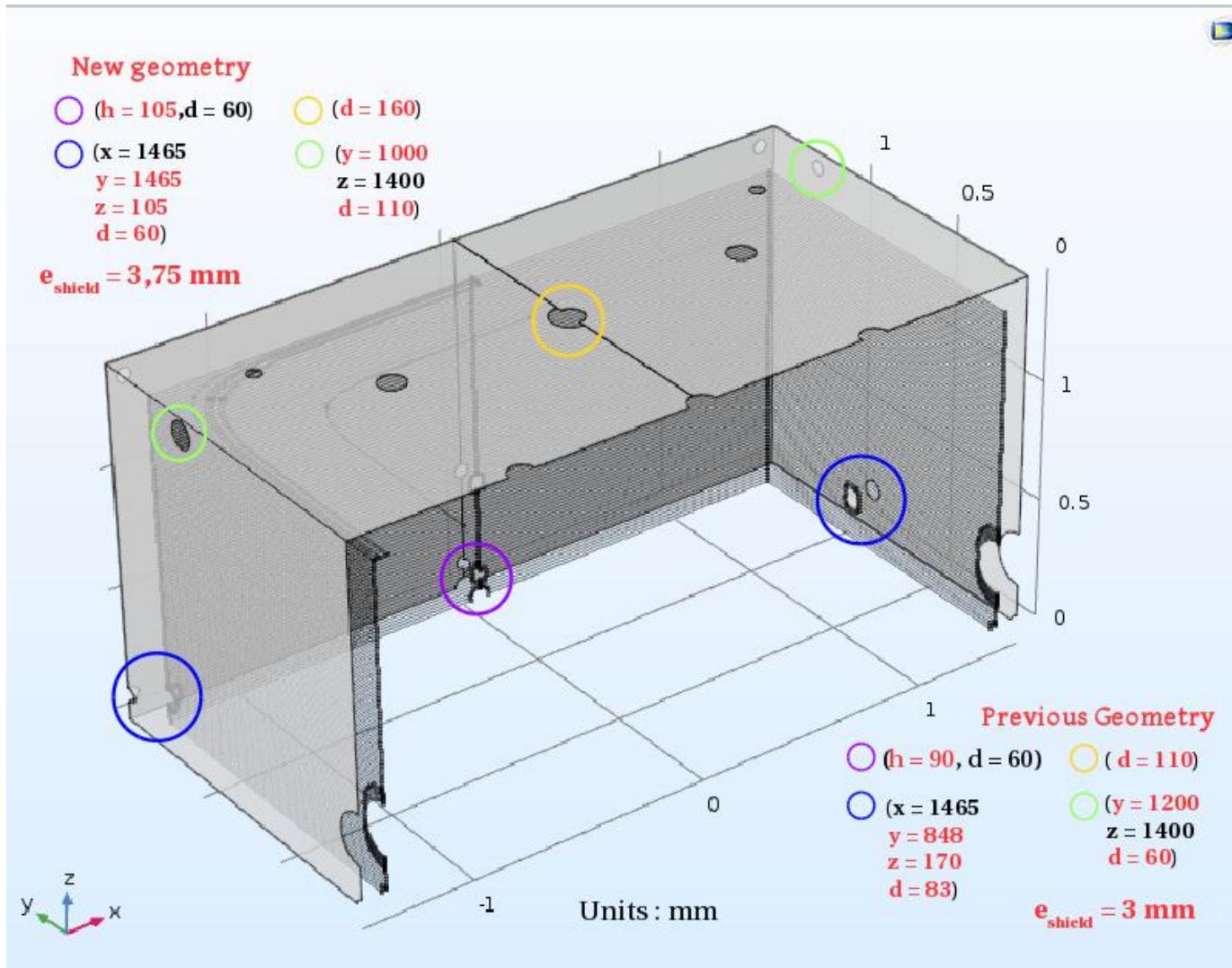
$|l=2$

Summary of allowed gradients (up to $l=2$)

l	m
0	-1
0	0
0	1
1	-2
1	-1
1	0
1	1
1	2
2	-3
2	-2
2	-1
2	0
2	1
2	2
2	3



Geometrical modification since Feb. 2017



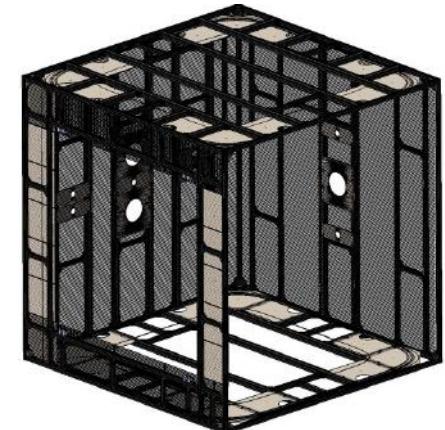
Details on mechanical solutions

Comparative Mechanical Design

4 Different way to do :

PCB	Plexiglass (Wire on grooves)	PCB + Tube (Tube for straight wire)	Plexiglass + Tube
Copper thickness 0,075 <?<0,4mm Width max 10mm (limited by screws)	Wire ø1,5mm (1,7mm ²)	Wire ø1,5mm on tube ø2,5mm internal (Carbon or Fiber glass) Copper thickness 0,4mm may be possible	Wire ø1,5mm (1,7mm ²)
Big size PCB =>No many company / Technic limit =>Cost ??	Small grooves to mill (Width 2mm) Each side divided by 6 possible	Small size PCB =>Easy to build =>Cost	Small size Plexiglass =>Easy to build =>Cost
Each side divided by minimum 6 panel + Linking on corner =>Many welded connection (> 1500)	0 Welded connection	Some welded connection	0 Welded connection
120 Kg PCB (+ 400Kg framework)	450 Kg plexiglass 32 Kg copper (+ 400Kg framework)	50 Kg < 32 Kg copper (+ 400Kg framework)	> 50 Kg (Plexi + tube) 32 Kg copper (+ 400Kg framework)
Easy to install	Need very long time to install	Need long time to install	Need long time to install
Sample for magnetic test ??	Easy to check at PTB	Many parts to check at PTB (1200 tubes)	Many parts to check at PTB (1200 tubes)
Very good position accuracy	Good position accuracy		Less accurate solution

From Damien Goupillière , 31/05/2017

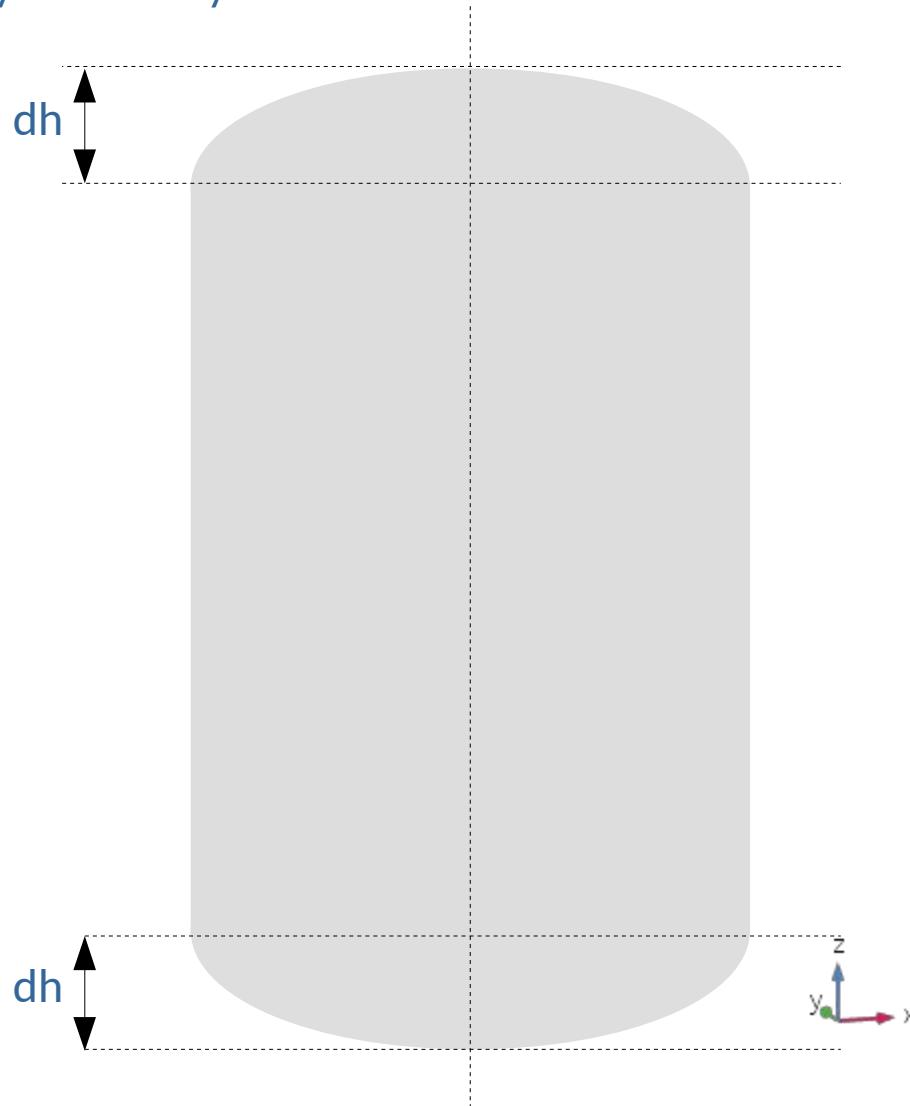


Without door and right panel

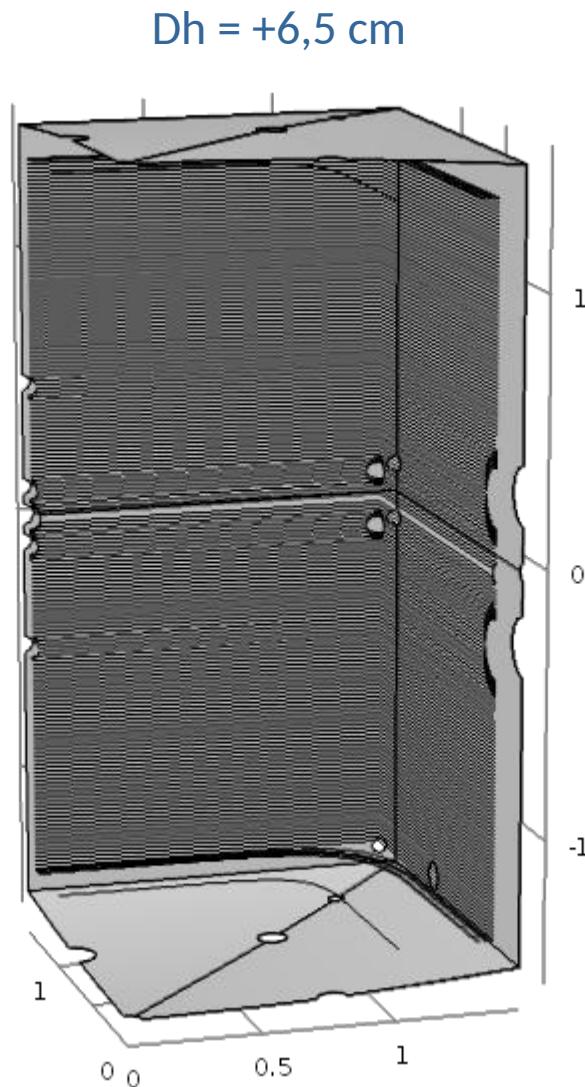


Plexiglass prototype

Symetric way



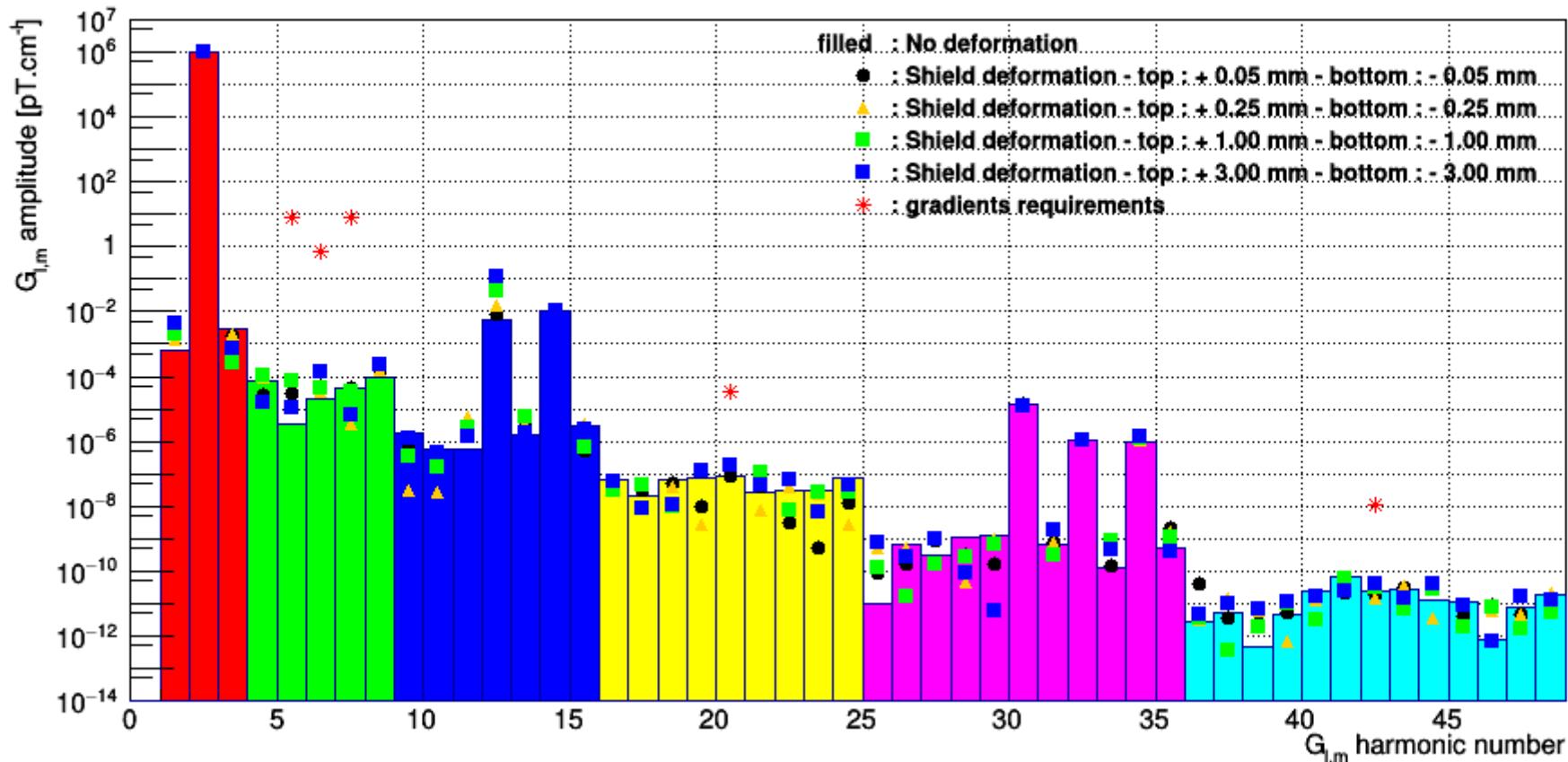
Shield deformation



Shield deformation

Symetric way (only 1/8th in the simulation)

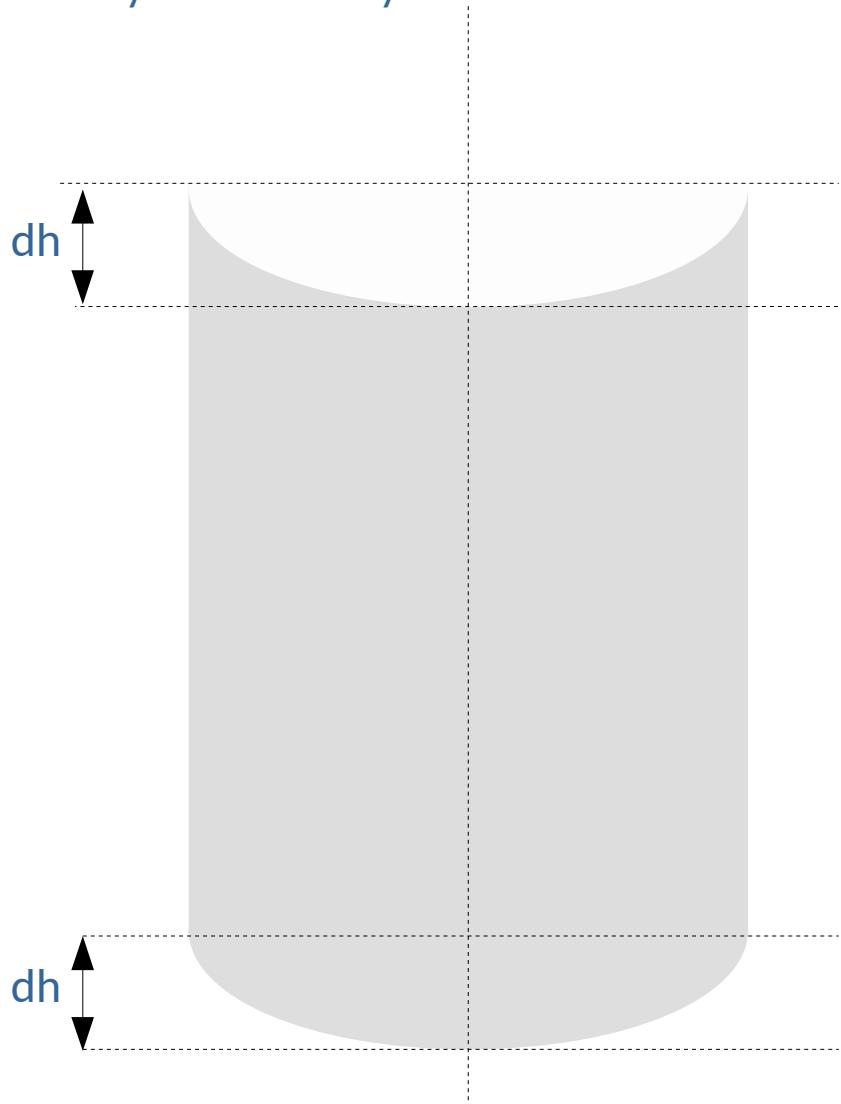
Harmonic Decomposition



→ $G_{2,0}$ increases , up to $\sim 10 \text{ pT.cm}^{-2}$ for a symetric shield deformation of 3,00 mm

Shield deformation

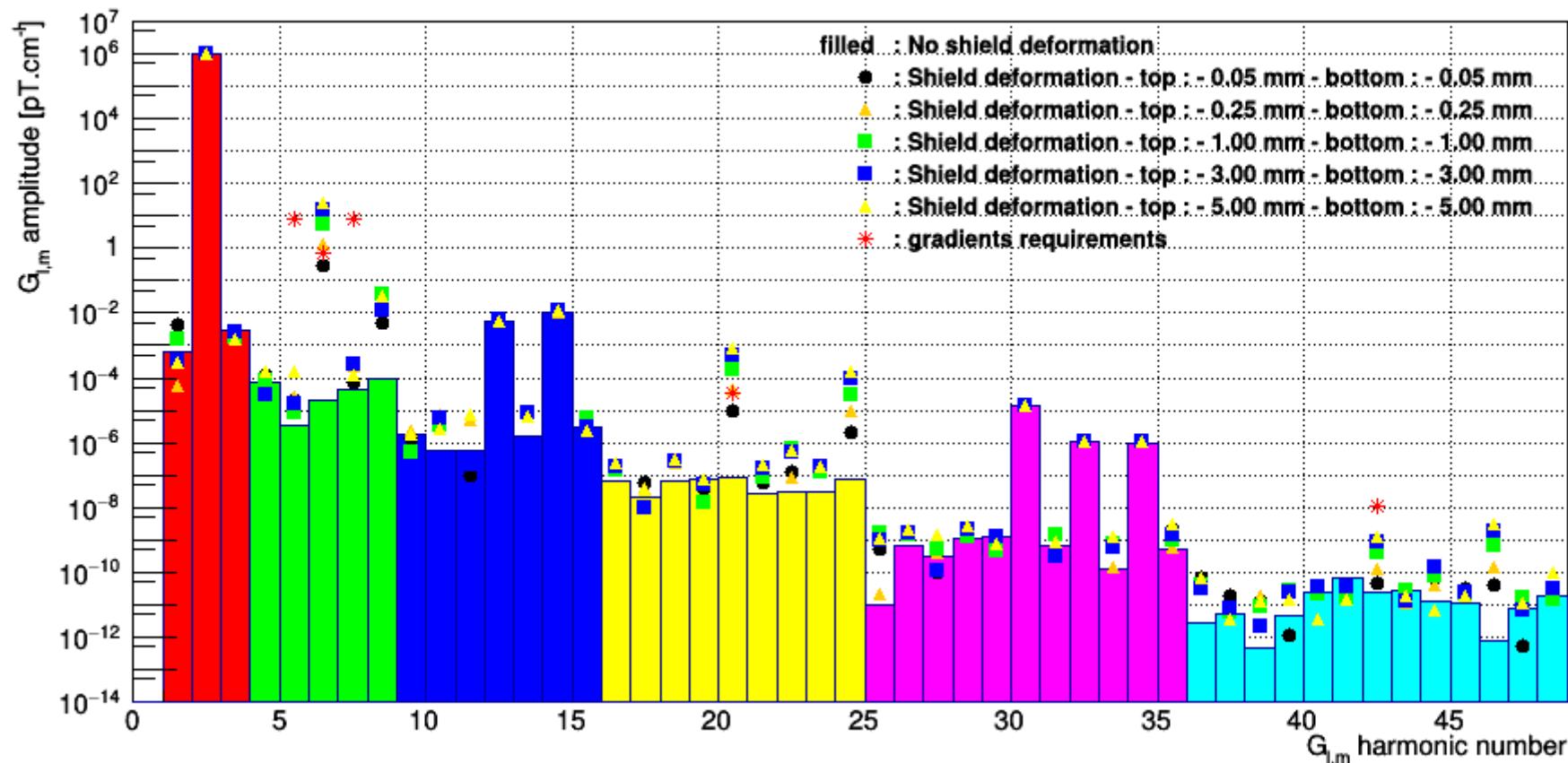
« Anti-Symetric » way



Shield deformation

« Anti-Symmetric » way

Harmonic Decomposition



→ $G_{1,0}$ requirements exceeded with 0,25 mm deformation

Neutron depolarisation

Depolarisation (PRA 49 MC Gregor (1994), Roccia PhD) :

$$\frac{1}{T_2} = \underbrace{\frac{1}{2T_{1,murs}}}_{\text{Due to wall collisions}} + \underbrace{\frac{1}{2T_{1,magn}}}_{\text{Horizontal gradients}} + \underbrace{\frac{\gamma^2 L^4}{120D} \left[\frac{\partial B_z}{\partial z} \right]^2}_{\Gamma_z} + \underbrace{\frac{7\gamma^2 R^4}{96D} \left[\frac{\partial B_z}{\partial y} \right]^2}_{\Gamma_y}$$

Where L is the chamber height, R, the radius of a cylindrical chamber and D the diffusion coefficient

$T_{1,walls} \approx 5000$ s . Depends on the wall surface quality

$$\frac{1}{T_{1,magn}} = D \frac{|\vec{\nabla} B_x|^2 + |\vec{\nabla} B_y|^2}{B^2}$$

Cette formule, établie pour des gaz [52] est aussi valable pour un gaz de neutrons ultra-froids sous la condition de définir le coefficient de diffusion par $D = v_{xy} \frac{\lambda}{3}$ [67] où v_{xy} est la vitesse moyenne des neutrons dans le plan transverse au champ magnétique et λ est le libre parcours moyen des neutrons. Cette contribution est très faible car elle est supprimée par la valeur du champ principal au carré.

Very weak contribution

For the same amplitude of vertical and horizontal gradients :

$$\frac{\Gamma_z}{\Gamma_y} = \frac{4}{35} \cdot \left(\frac{L}{R} \right)^4 = 0.7 \text{ % with } L = 12 \text{ cm and } R = 23.5 \text{ cm}$$

- Depolarisation mainly due to horizontal gradients of vertical component B_z
- nEDM requirements : $(\partial B_z / \partial x), (\partial B_z / \partial y) < 8 \text{ pT.cm}^{-1}$



RF pulse + Vertical gradient

The two chambers shares the same RF pulse

If there is a vertical gradient, $\langle B_{\text{top}} \rangle \neq \langle B_{\text{bottom}} \rangle$

→ « working points » are different

→ decrease of sensitivity

n2EDM requirement : $\langle \partial B_z / \partial z \rangle < 0.7 \text{ pT.cm}^{-1}$



Systematic effects

Uncompensated field drift :

Time variation of vertical gradient which can't be corrected

gravitational shift. The false EDM due to a correlated part of the gradient $\delta G(E)$ reads:

$$\delta d_n = \frac{\hbar \gamma_n}{4E} (h^B - h^T) \delta G(E). \quad (17)$$

The goal for n2EDM is to have this systematic effect under control at the level of $5 \times 10^{-28} e \cdot \text{cm}$. Assuming $E = 15 \text{ kV/cm}$, and $h^B - h^T = 0.1 \text{ cm}$, this corresponds to a control over the correlated part of the gradient at the level of $G(E) \leq 200 \text{ fT/m}$.

Motional false EDM :

The motion of a particle inside a non-uniform static field also creates a false EDM
For large scale B non-uniformities, We have up to cubic terms

$$d_{Hg \rightarrow n}^{\text{False}} = \frac{\hbar \gamma_n \gamma_{Hg}}{32c^2} D^2 \left[G_{1,0} - G_{3,0} \left(\frac{D^2}{8} - \frac{3H'^2 + H^2}{4} \right) \right].$$

- Partially corrected by the crossing point technique

$$d_{Hg \rightarrow n}^{\text{False}} = \frac{\hbar \gamma_n \gamma_{Hg}}{32c^2} D^2 \left[G_{Hg} + G_{3,0} \left(\frac{D^2}{16} + \frac{H'^2}{2} \right) \right]. \quad \text{With the correction} \quad G_{Hg} = G_{1,0} + \frac{1}{16} G_{3,0} (4H'^2 + 4H^2 - 3D^2).$$

Leading to n2EDM requirements for $G_{3,0} < 3.3 \times 10^{-5} \text{ pT.cm}^{-3}$
and $G_{5,0} < 1.1 \times 10^{-8} \text{ pT.cm}^{-5}$