CEA Saclay
IRFU/SPhN Bat 703
Rapport de Stage

July 2, 2017

Détermination de la puissance du réacteur de l'ILL pour la prédiction du flux de neutrinos

Charles-Elie Fillion (cefillion11@gmail.com)



IRFU/SPhN
Superviseur : David Lhuillier

Contenu

1 Introduction **1**
1.1 Historique . . . 1
1.2 Les Neutrinos . . . 3

2 L'oscillation des Neutrinos **5**

3 L'expérience STEREO **6**
3.1 Objectifs . . . 6
3.2 Le détecteur STEREO . . . 6
3.2.1 Le détecteur . . . 6
3.2.2 Le principe de mesure . . . 9

4 Le réacteur à haut flux de l'ILL **12**
4.1 Le bloc pile . . . 12
4.1.1 Partie haute pression (HP) . . . 13
4.1.2 Partie basse pression (BP) . . . 14
4.2 La piscine à eau légère . . . 15

5 Outils théoriques pour la détermination de la puissance du cœur **15**
5.1 Bilan enthalpique, calcul de la puissance . . . 15
5.2 Mécanique des fluides . . . 16
5.2.1 Le débitmètre à organe déprimogène . . . 17

6 Détermination de la Puissance du cœur **20**

7 Calcul d'incertitude sur la puissance **24**
7.1 Détermination des incertitudes absolues $\frac{\delta x^i}{x^i}$ . . . 26
7.2 Détermination des incertitudes relatives δx^i . . . 27
7.2.1 Détermination de $\frac{\delta P_C}{P_C}$ . . . 35
7.2.2 Détermination de $\frac{\delta P_{DRG}}{P_{DRG}}$ . . . 36
7.2.3 Détermination de $\frac{\delta P_{BP}}{P_{BP}}$ . . . 36
7.2.4 Détermination de $\frac{\delta P_{PISC}}{P_{PISC}}$ . . . 37
7.2.5 Conclusions . . . 37
7.3 Estimation des pertes d'énergie . . . 38

8 Détermination du flux d'antineutrinos du cœur **39**

9 Annexe 1 : Explicitation des termes de la puissance **45**

10 Annexe 2 : Données de calibration des capteurs de température en entrée et sortie de cœur **47**

11 Annexe 3 : Divers graphes **54**

1 Introduction

L'objectif principal de ce stage est l'estimation de la puissance du cœur du réacteur de recherche de l'Institut Laue-Langevin de Grenoble. Cette puissance, obtenue avec le maximum de précision possible, associée à l'énergie moyenne par fission dans le cœur, servira à connaître le nombre de fission en un temps donné, et donc le nombre de neutrinos émis en un temps donné (on sait estimer le nombre de neutrinos par fission).
Ce nombre de neutrinos émis par le cœur est l'une des deux informations indispensables à l'expérience STEREO, qui va mesurer le nombre de neutrinos détectés quelques mètres après leur lieux d'émission, afin d'en estimer le déficit et de confirmer ou d'infirmer l'existence d'une quatrième saveur de neutrino ; le neutrino stérile ν_s.
Le neutrino est une particule dépourvue de charge électrique, et quasiment dépourvue de masse, qui interagit donc très peu avec la matière dont nous, et tout ce que nous connaissons, sommes constitués. Ces deux caractéristiques en font une entité très peu accessible avec nos moyens, alors qu'elle est encore la deuxième particule la plus abondante dans l'univers après le photon. Son étude est donc d'une importance cruciale dans la compréhension de l'univers et de ses lois.
Le présent document a pour objectif secondaire de rendre compte de la timidité de cette particule, et des moyens qu'il faut mettre en place pour qu'elle veuille bien se montrer.

1.1 Historique

Tout commence dans les années 1910, alors que la radioactivité est bien connue, par l'apparition d'une anomalie dans les spectres de désintégration β d'éléments radioactifs.
Que nous dit la physique ? Qu'il y a toujours une entité qui se conserve, c'est universel. Ici en l'occurrence, pour la désintégration d'un noyau père en noyaux fils, accompagnée de l'émission de particules, il y a conservation de la quantité de mouvement $\vec{p} = m\vec{v}$, de l'énergie, de la charge et du nombre de masse A.
Par exemple pour la désintégration α, un noyau père ${}^{A}_{Z}X$ se désintègre en un noyau fils et une particule α est émise (${}^{4}_{2}He$). De part la conservation du nombre de masse et de la charge, le noyau fils est de la forme ${}^{A-4}_{Z-2}Y$.
Pour résumé la désintégration alpha :

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He \tag{1} $$

En appliquant les lois de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie, on trouve que la vitesse de la particule alpha émise correspond à l'énergie cinétique de la différence de masse père-fils. Même si on répète l'expérience un grand nombre de fois, l'énergie de la particule α sera toujours celle de la différence de masse. On peut représenter cela sur un graphique un exemple de spectre en énergie des particules α :

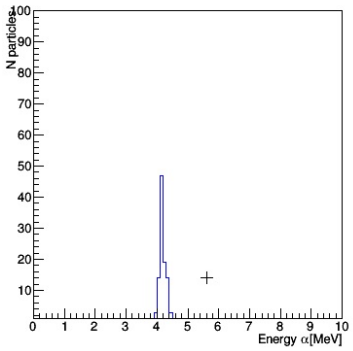


Figure 1.1: Spectre en énergie des particules α

La gaussienne est la conséquence de la résolution en énergie du détecteur utilisé (en théorie, c'est un δ_{Dirac})

Maintenant, faisons le même parcours pour la désintégration β. A l'époque, on la connaissait sous la forme :

$$p^+ \longrightarrow n^0 + e^+ \qquad (\beta^+) \tag{2}$$

$$n^0 \longrightarrow p^+ + e^- \qquad (\beta^-) \tag{3}$$

En appliquant les mêmes lois de conservation pour ce type de désintégration, on trouvait aussi que la particule β (un e^+ ou un e^-) était mono-cinétique. On s'attendait donc, tout comme pour la désintégration α, à ce que le spectre en énergie de la particule émise soit une et une seule valeur; l'énergie de différence de masse.
C'est ici que les choses se gâtaient, les résultats étaient sans appels, le spectre en énergie des particules β étaient donné par les expériences sous la forme suivante :

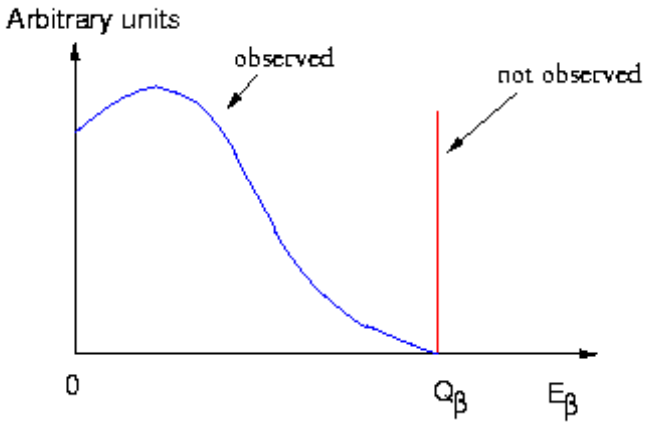


Figure 1.2: Spectre en énergie des particules β

Les physiciens n'en ont pas dormi durant des années... Se répétant sans cesse : "L'énergie ne serait-t-elle pas toujours conservée ?". La non conservation pose énormément de problèmes, c'est totalement contre-intuitif et non physique. En observant le spectre en énergie des particules β, les chercheurs ont remarqué qu'il avait la même forme qu'un spectre de trois particules se partageant l'énergie dans une désintégration à trois corps. La solution a cette anomalie fut trouvée par Wolfgang Ernst Pauli en 1930 [1] qui invoqua donc une troisième particule, neutre et presque dépourvue de masse. Elle partagerait l'énergie avec la particule β au moment de la désintégration, provoquant donc ce spectre continu, elle fut nommée neutrino (petit et neutre). Les relations (2) et (3) deviennent donc en réalité :

$$\boxed{\begin{array}{ll} p^+ \longrightarrow n^0 + e^+ + \nu & (\beta^+) \\ n^0 \longrightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu} & (\beta^-) \end{array}}$$

La réaction qui a lieu dans notre réacteur est la β^-, nous ne détectons pas des neutrinos mais des *anti*-neutrinos (l'*anti*-neutrino a les mêmes propriétés que le neutrinos)
Ces résultats furent confirmés expérimentalement par la réaction inverse, par Cowan et Reines en 1956 en plaçant un réservoir d'eau à proximité d'un réacteur nucléaire [2] :

$$p^+ + \bar{\nu} \longrightarrow n^0 + e^+$$

Chose importante c'est cette réaction qui va être utilisée dans l'expérience présentée ici.

1.2 Les Neutrinos

Nous pouvons déjà décrire les trois neutrinos connus actuellement avant d'arriver au vif du sujet :

Ce que nous avons vu dans la précédente partie représente l'une des trois "saveurs" de neutrinos connues aujourd'hui; le neutrino électronique, car la particule associée dans ce type de désintégration est un électron (ou son antiparticule). Ainsi, il en existe aujourd'hui trois, chacune des saveurs portant le nom du lepton chargé qui lui est associé (le neutrino est lui même un lepton) :

- Le neutrino électronique
- Le neutrino muonique
- Le neutrino tauique

Il faut savoir que le neutrino est un schizophrène. Il existe sous l'une des trois personnalités listées précédemment, mais il peut en changer spontanément, passant ainsi de la saveur électronique à la saveur muonique par exemple, ou n'importe quelle transition entre saveurs, c'est ce qui est appelé l'oscillation des neutrinos.
Résumons les choses, en dressant une carte d'identité du neutrino :

Saveur	Électronique	Muonique	Tauique
Lepton associé	Électron	Muon	Tau
Masse	<2.8 eV.c^{-2}	<170 keV.c^{-2}	< 18 MeV.c^{-2}
Charge	Nulle		
Vitesse	$\simeq c$		
Composition	Élémentaire		
Durée de vie	Stable		
Spin	$\frac{1}{2}$		
Interactions	Force faible (Gravitation ultra négligeable)		

De plus c'est la particule (connue) la plus abondante de l'univers après le photon (rien que le flux solaire $\simeq 10^{12}\bar{\nu}_e$.cm^{-2}.s^{-1}) et ses origines sont diverses et variées :
- Étoiles
- Supernovae
- Réacteurs
- Corps humain (^{40}K)
- Croûte terrestre
- Etc...

Nous avons décrit le principal des trois saveurs connues aujourd'hui. Mais de récentes avancées théoriques effectuées au SPnN sur le spectre en énergie des $\bar{\nu}_e$ en fonction de la distance à la source ne sont pas en accord avec les mesures existantes. Proche du cœur des réacteur, les mesures révèlent un déficit d'environ 6% du nombre attendu de $\bar{\nu}_e$ (*anti*-neutrino, car, comme nous l'avons dit dans la partie historique, les réactions nucléaire dans les réacteurs produisent des anti-neutrinos, que l'on détecte par désintégration β inverse (c.f. Partie 1.1)).
Pour résumer la chose, le modèle théorique à trois neutrinos prédit sans trop de soucis les oscillations à des distances supérieures à 100m, mais les observations récentes ont mesuré un nouveau déficit à des distances beaucoup plus proches du cœur du réacteur, de l'ordre de la dizaine de mètre, c'est l'*anomalie réacteur*. Ce n'est pas qu'une erreur à la 10e décimale qui pourrait être dû à une erreur de mesure, mais un réel déficit du nombre de neutrinos attendu.
Cette nouvelle anomalie dans le taux de comptage des $\bar{\nu}_e$ est peut-être due à une nouvelle oscillation vers une nouvelle saveur, c'est ce que tente de confirmer ou d'infirmer STEREO.

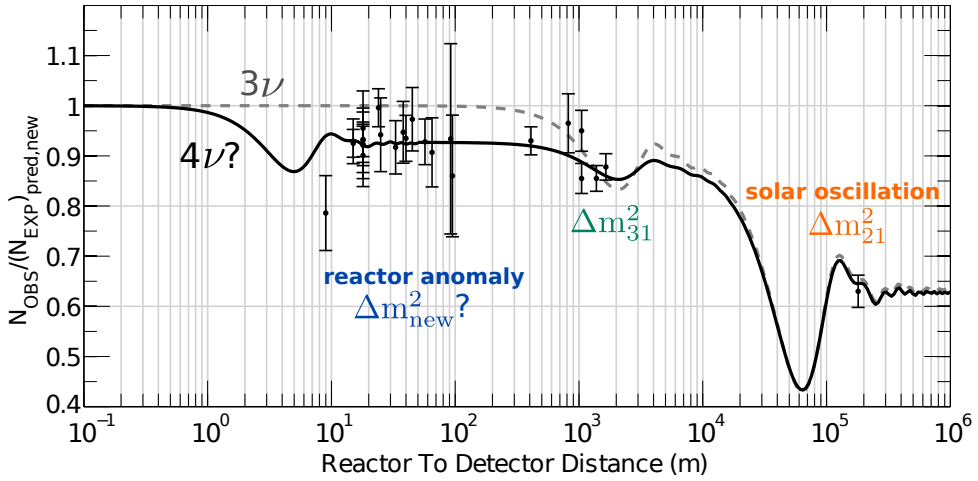


Figure 1.3: Modèles d'oscillation à 3ν et à 4ν

On peut voir deux choses sur le graphique ci dessus. On remarque que la courbe qui représente le spectre à 3 neutrinos (3ν) est en accord avec les points supérieurs à 100m (chacun des points représente une expérience de mesure du taux de neutrinos détectés comparé au taux prédit par la théorie). Mais les mesures à des distances plus proches du cœur (les points entre 10m et $100m$) ne correspondent plus aux récentes avancées théoriques (courbe 3ν).
Nous verrons dans la partie théorie que les oscillations entre deux types de neutrino dépendent de leur différence de masse au carré, cela veut dire que le déficit observé pourrait s'expliquer comme l'effet moyen d'une nouvelle oscillation avec un 4^e neutrino. La masse de ce nouveau neutrino serait de l'ordre de 1 eV.c^{-2} afin de produire des oscillations dès les premiers mètres de parcours. Enfin ce neutrino doit être "stérile", c'est-à-dire insensible à toutes les interactions sauf la gravitation sinon il aurait déjà été mis en évidence par d'autres mesures indépendantes.
C'est ici que la théorie intervient. L'ajout d'un quatrième neutrino avec certaines propriétés modifie l'allure de la courbe de manière à la laisser inchangée pour les grandes distances mais à la modifier au courtes distances pour être en accord avec les expériences.
Ainsi, en passant d'un modèle à 3ν à un modèle à 4ν les résultats expérimentaux sont toujours en accord avec la théorie, donc si la théorie est en accord avec l'expérience en ajoutant ce nouveau neutrino, il faut pouvoir le détecter et confirmer ses propriétés par la mesure.
C'est ainsi qu'apparaît le neutrino stérile ν_s, s'ajoutant à ses confrères déjà connus ν_e , ν_μ et ν_τ. On peut mettre à jour la carte d'identité du neutrino, qui a maintenant une personnalité en plus...

Saveur	Électronique	Muonique	Tauique	Stérile
Masse	<2.8 eV.c^{-2}	<170 keV.c^{-2}	< 18 MeV.c^{-2}	$\simeq$ 1 eV.c^{-2}
Lepton associé	Électron	Muon	Tau	AUCUN
Composition	Élémentaire			?
Durée de vie	Stable			?
Spin	$\frac{1}{2}$			?
Charge	Nulle			?
Vitesse	$\simeq c$			?
Interactions	Force faible (Gravitation ultra négligeable)			Gravitation uniquement

2 L'oscillation des Neutrinos

Partons du principe que le neutrino stérile existe (après tout c'est le but de la manipulation !). Comme ça nous aurons la formule d'oscillation du neutrino électronique en neutrino stérile proche du réacteur.

L'oscillation des neutrinos, c'est cet effet qui a été à la base de toute les anomalies dans le déficit du nombre de neutrinos solaire, atmosphérique, et maintenant, de réacteur, cet effet a été découvert en 1998 de façon expérimentale [3]. C'est un effet quantique, et cet effet nécessite que le neutrino ait une masse, pour que chaque état propre *de masse* ne se propage pas à la même vitesse. Voyons cela :

Un neutrino, produit par la force faible, est état propre du Lagrangien d'interaction faible, et ces états propres d'interaction ne sont pas forcément les états propres de masses, qui rentrent en jeu dans la propagation. Mais on peut toujours décomposer un état propre de la base d'*interaction* (base des saveurs $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \nu_s$) sur la base des états propres de de *propagation* (base des états propres de masse $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4$) . Et puisque la propagation des différents états de masse est différente, si on projette à deux instants différents l'état du neutrino sur la base d'interaction (pour la détection), on ne trouvera pas la même combinaison de saveurs.
Avant de procéder à la décomposition, on peut, pour simplifier les calculs, jeter un coup d'œil à la figure 1.3. On remarque qu'à courte distance, l'effet des oscillation des neutrinos de détecteurs $\nu_e \to \nu_\mu$ ou $\nu_e \to \nu_\tau$ est invisible, l'oscillation ici significative est $\nu_e \to \nu_s$. On peut donc faire l'approximation d'un système à deux niveaux pour des courtes distances, et en décomposant :

$$|\nu_e\rangle = \cos\theta|\nu_1\rangle + \sin\theta|\nu_4\rangle$$
$$|\nu_s\rangle = -\sin\theta|\nu_1\rangle + \cos\theta|\nu_4\rangle$$

Où les coefficients sont ceux d'une matrice de rotation à deux dimensions. Sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix}|\nu_e\rangle\\|\nu_s\rangle\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\cos\theta & \sin\theta\\ -\sin\theta & \cos\theta\end{pmatrix}\begin{pmatrix}|\nu_1\rangle\\|\nu_4\rangle\end{pmatrix} \tag{5}$$

On voit, si on regarde le tableau de la précédente partie, que chaque état de masse est différent, on peut dire, pour aller plus vite, que $|\nu_1\rangle$ ne se propage pas à la même vitesse que $|\nu_4\rangle$. C'est ainsi que la décomposition de $|\nu_e\rangle$ et $|\nu_s\rangle$ va varier au cours du temps et engendrer un phénomène de changement de saveur.
Regardons l'évolution dans le temps pour rendre compte du phénomène :
Comme $|\nu_1\rangle$ et $|\nu_4\rangle$ sont état propre du Hamiltonien et ont donc une évolution dans le temps très simple :

$$|\nu_1(t)\rangle = e^{(-\frac{iE_1}{\hbar}t)}|\nu_1\rangle = e^{-i(p+\frac{m_1^2}{2p})t}|\nu_1\rangle$$

$$|\nu_4(t)\rangle = e^{(-\frac{iE_4}{\hbar}t)}|\nu_4\rangle = e^{-i(p+\frac{m_4^2}{2p})t}|\nu_4\rangle$$

En supposant que $p >> m$ dans l'expression :

$$E_{1,4} = \sqrt{p^2 + m_{1,4}^2}$$

Donc, si nous avons

$$|\psi(t=0)\rangle = |\nu_e\rangle = \cos\theta|\nu_1\rangle + \sin\theta|\nu_4\rangle$$

alors on aura, à un instant t quelconque :

$$\begin{aligned}|\psi(t)\rangle &= \cos\theta|\nu_1(t)\rangle + \sin\theta|\nu_4(t)\rangle\\ &= \cos\theta e^{-i(p+\frac{m_1^2}{2p})t}|\nu_1\rangle + \sin\theta e^{-i(p+\frac{m_4^2}{2p})t}|\nu_4\rangle\end{aligned}$$

On peut alors regarder l'expression de la probabilité de passer de l'état de saveur $|\nu_e\rangle$ à l'état de saveur $|\nu_s\rangle$:

$$\begin{aligned} P_{|\nu_e\rangle\to|\nu_s\rangle} &= \left|\langle\nu_s|\psi(t)\rangle\right|^2 \\ &= \left|(-\sin\theta\langle\nu_1| + \cos\theta\langle\nu_4|)\left(\cos\theta e^{-i(p+\frac{m_1^2}{2p})t}|\nu_1\rangle + \sin\theta e^{-i(p+\frac{m_4^2}{2p})t}|\nu_4\rangle\right)\right|^2 \end{aligned}$$

Avec $\langle\nu_i|\nu_j\rangle = \delta_{ij}$ d'où :

$$\begin{aligned} &= 2\sin^2\theta\cos^2\theta\left(1-\cos\left(\frac{m_1^2-m_4^2}{2p}t\right)\right) \\ &= \sin^2(2\theta)\sin\left(\frac{\Delta m_{14}^2 L}{4E}\right) \end{aligned}$$

Où $\Delta m_{14}^2 = m_1^2 - m_4^2$
Résultat obtenu en supposant une équivalence $p \leftrightarrow E$ et $t \leftrightarrow L$ (limite ultra-relativiste v=c, vrai pour les neutrinos), en utilisant les unités de Planck et en utilisant $\cos^2(x)\sin^2(x) = \frac{1}{4}\sin^2(2x)$
La probabilité de changement de saveur est donc une fonction périodique de la distance, c'est ce phénomène qui va déterminer la géométrie du détecteur.

3 L'expérience STEREO

3.1 Objectifs

L'idée n'est plus seulement de comparer la prédiction avec ce qu'on mesure. Pour cette expérience on sait où se placer, à quelle distance et dans quelles conditions, et on sait ce qu'il faut mesurer. Le détecteur est donc placé à l'endroit idéal, on va mesurer avec précision le spectre d'anti-neutrino, dans différentes cellules à différentes distances du réacteur, et l'objectif est de retrouver la théorie avec le plus de précision possible. Si la théorie est retrouvée, l'existence du neutrino stérile sera démontrée, c'est ici l'objectif principal de l'expérience STEREO.

3.2 Le détecteur STEREO

La plupart des informations ci-présentes sont tirées de la thèse de Maxime PÉQUIGNOT [4]. Nous avons l'avantage d'avoir un cœur compact (40 cm de diamètre), ce qui diminue de manière considérable l'incertitude sur le lieu de création de l'anti-neutrino, et donc sur la distance de propagation de ce dernier. Et, il ne faut pas l'oublier, le but étant d'obtenir une mesure précise du nombre d'antineutrinos en fonction de la distance, il faut une grande précision sur la distance qui sépare le lieu de création de la particule du lieu ou elle est "détectée" (guillemets car elle n'est pas directement détectée, c'est ce qui fait toute la difficulté de la mesure, nous en reparlerons après avoir exposé la géométrie du détecteur).

3.2.1 Le détecteur

Emplacement

Le détecteur a l'avantage de se trouver en dessous de la piscine a eau légère, ce qui limite considérablement le bruit accidentel dû au rayonnement cosmique, qui représente la principale source de bruit de l'expérience (l'eau stoppe la cascade de particules issues de la désintégration des muons cosmiques dans l'atmosphère).

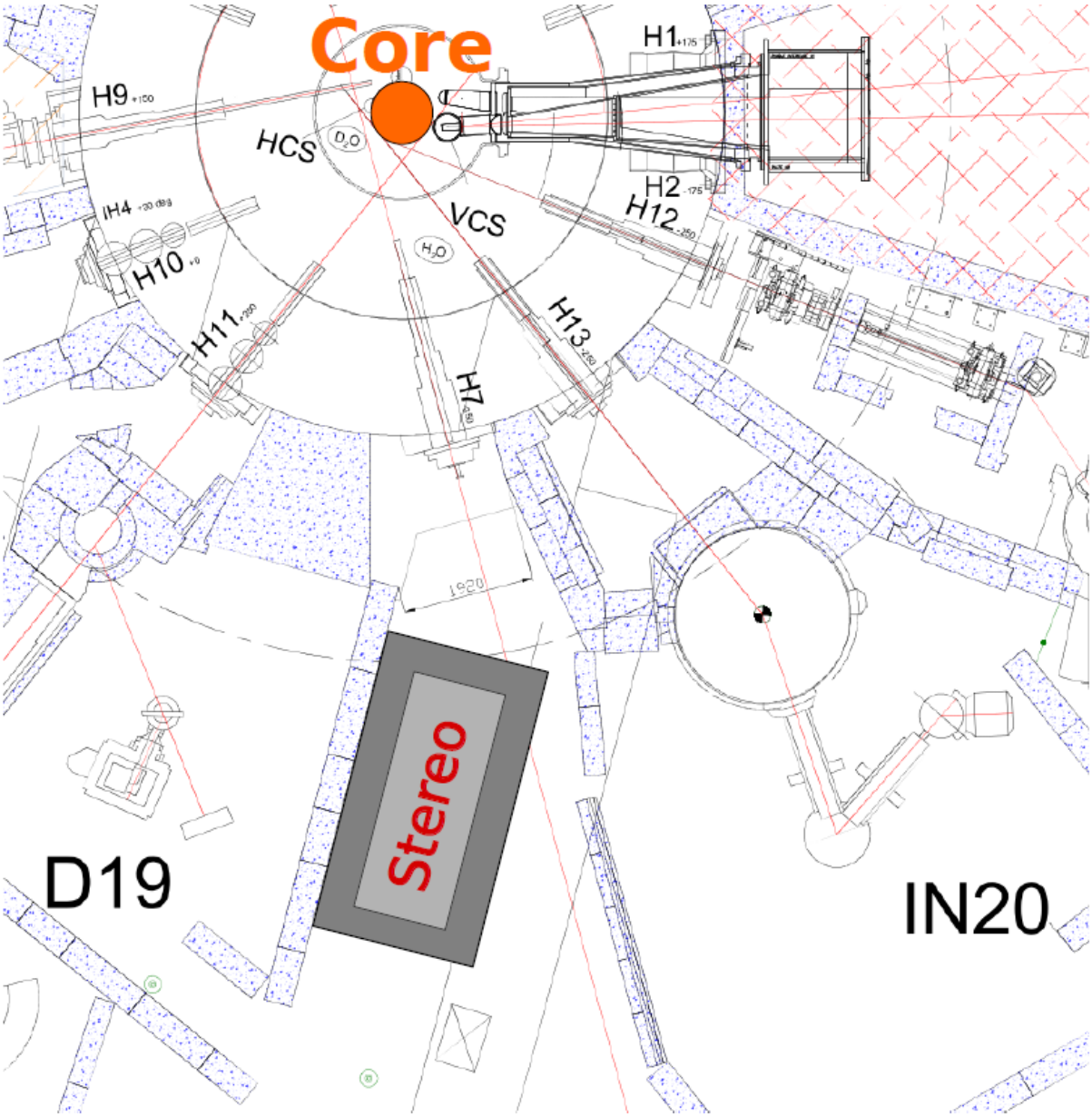


Figure 3.1: Emplacement du détecteur

Il a aussi l'avantage de se trouver au même niveau que le détecteur, ce qui est mieux pour la détection des oscillations. Enfin le détecteur se trouve à seulement 10 *m* du cœur du réacteur, ce qui promet un flux d'anti-neutrinos important. En terme de laboratoire, pour résumer dans l'ordre; le réacteur se trouve dans la case-mate PN3, au niveau C (Voir Fig. 3.1)

Volume cible, *gamma-catcher*

Il s'agit ici de faire une description du dispositif, en se fiant à l'image qui accompagne cette partie, le principe de fonctionnement sera décrit dans la partie qui suit.

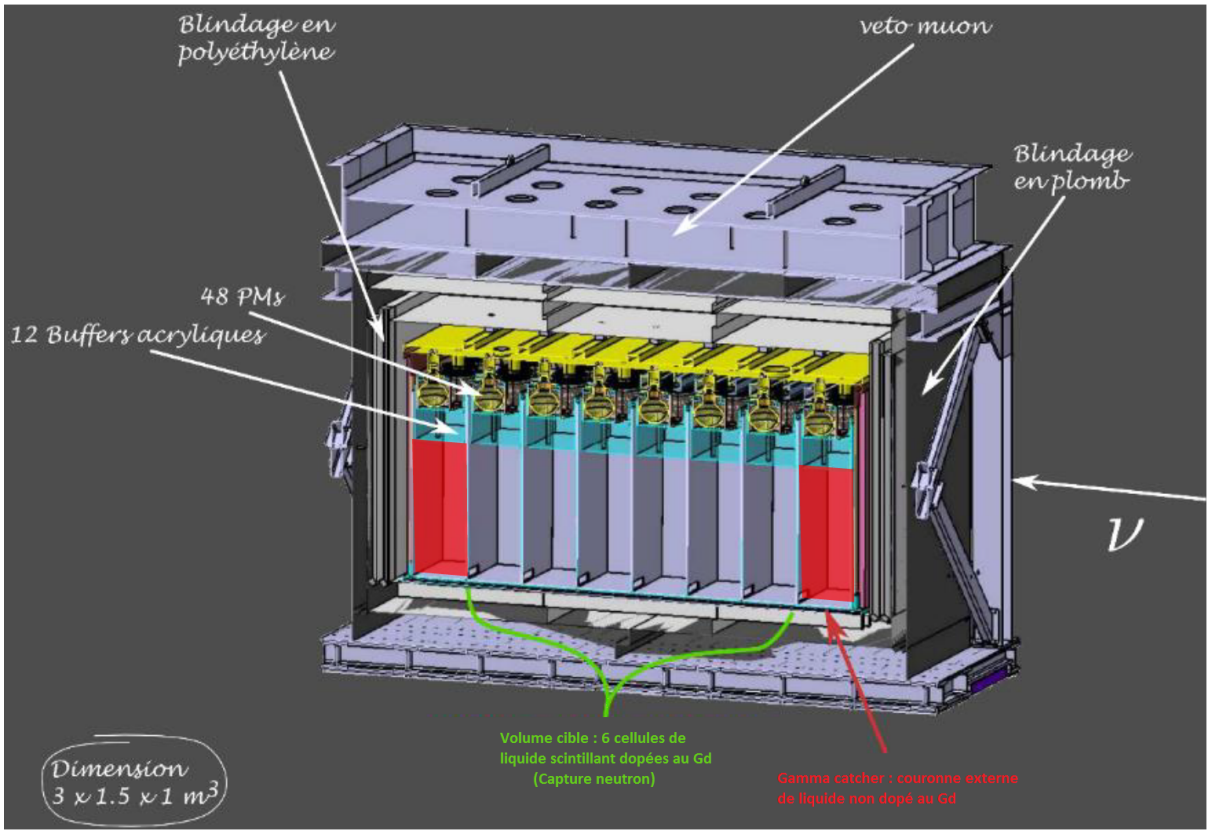


Figure 3.2: Vue en coupe du détecteur STEREO

La partie centrale du détecteur est constituée de 6 cellules de $(37 \times 90 \times 90)$ cm^3, c'est le volume cible. Ces cellules sont séparées par des parois totalement réfléchissantes afin d'assurer leur indépendance optique. Pour chacune des six cellule on a :

- Dans la partie inférieure, un liquide scintillant (dopé au Gadolinium)
- Dans la partie supérieure, quatre Photo-Multiplicateurs (PM) qui, comme leur nom l'indique, vont amplifier le signal provenant du liquide scintillant de la partie inférieur de la cellule
- Entre les deux, une épaisseur de 20 cm d'acrylique, ce qui permet d'une part d'éviter le contact entre le liquide scintillant et les PMs, et d'autre part d'homogénéiser la réponse du détecteur.

Autour de ce volume cible central, et séparé de ce dernier par une parois réfléchissante se trouve le *gamma-catcher*, qui sert à détecter les muons qui viennent saturer les PMs, le détecteur arrête la prise de données lorsqu'un signal muon est détecté. C'est une couronne de liquide scintillant non dopé au Gadolinium qui fait le tour de la partie centrale, qui possède des PMs sur la partie supérieure, 20cm d'acrylique en dessous puis le liquide non dopé en dessous.

Il y a un total de 48 PMs (6 cellules de 4 PMs pour le volume cible et 24 PMs dans le *gamma-catcher*), repartis sur une longueur de $3m$, une largeur de $1.5m$, et une hauteur de $1m$.

Blindage et veto muon

Nous venons de décrire la partie détection. Elle ne servirait quasiment à rien sans toutes les protections anti parasites, tels que les particules externe, les champs magnétiques, etc...
A cet effet le détecteur est munis de plusieurs couches de protection, en allant de l'intérieur vers l'extérieur :

- Plaques en μ-métal pour dévier les lignes de champs magnétique (car une expérience située à coté délivre des champs allant jusqu'à 15T)
- Plaques de $20cm$ d'épaisseur de polyéthylène boré sur les cotés et $30cm$ au dessus pour stopper les neutrons venant des muons (spallation sur les bords) et de l'ILL.
- Plaques de $10cm$ de Plomb sur les cotés pour stopper les gammas, et $20cm$ en dessous car le circuit primaire passe en dessous.
- Une plaque supplémentaire de Plomb et de polyéthylène boré sur la face avant, entre le réacteur et le détecteur, pour limiter le flux de neutrons du cœur qui ne passerait pas par H7.
- Couche de Fer doux et de B_4C pour pour arrêter les neutrons thermiques avant qu'ils ne se fassent capturer dans le fer.
- Une protection contre le feu.

L'ensemble pèse 93T, mais l'avantage de la casemate PN3 est qu'elle tolère 10 à 15T.m^{-2}. De plus, des murs en Plomb, B_4C, polyéthylène, sont placés entre STEREO et les expériences en fonction de ce qu'elles dégagent.
Pour finir, un veto muon est placé au dessus de STEREO une fois toutes les autres couches installées, afin de stopper l'acquisition du signal lorsqu'un muon est détecté par effet Cerenkov (il y a des PMs et un liquide fluorescent pour amplifier cet effet). De plus ce veto détecte les arrivées de bruits muon ou neutron qui viennent de l'extérieur. Le veto muon fait $30cm$ de haut. Il est indispensable sachant que les muons représentent la principale source de bruit de l'expérience.

3.2.2 Le principe de mesure

Nous allons suivre l'évolution du phénomène physique à l'origine de la détection, de la création de $\bar{\nu}_e$ dans le cœur jusqu'au signal "candidat neutrino" dans le détecteur. Pour commencer, nous devons savoir d'où viennent les neutrinos.
On sait que les noyaux lourd fissionnent par apport de neutrons, exemple de ^{235}U :

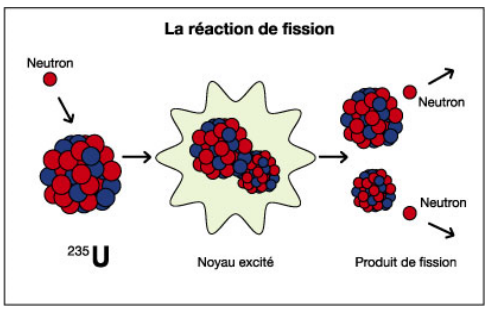


Figure 3.3: Fission de ^{235}U

Le cœur du réacteur, composé à 93% d'Uranium 235, induit un important flux de neutrons. Typiquement, chaque fission produit 3 neutrons (2.43 environ). Il arrive que de temps en temps, un neutron fissionne le peu de ^{238}U présent dans le combustible ce qui mène à la création de ^{239}Pu par décroissance radioactive au bout d'un temps long. Ou même qu'un neutron retourne au cœur fissionner de nouveau ^{235}U, mais sur une population de neutrons émis cela arrive rarement (et puis on veut un important flux de neutrons, donc il ne faut pas qu'il servent à retourner fissionner ^{235}U). Ci dessous un schéma qui résume une partie des réactions ayant lieu dans le cœur :

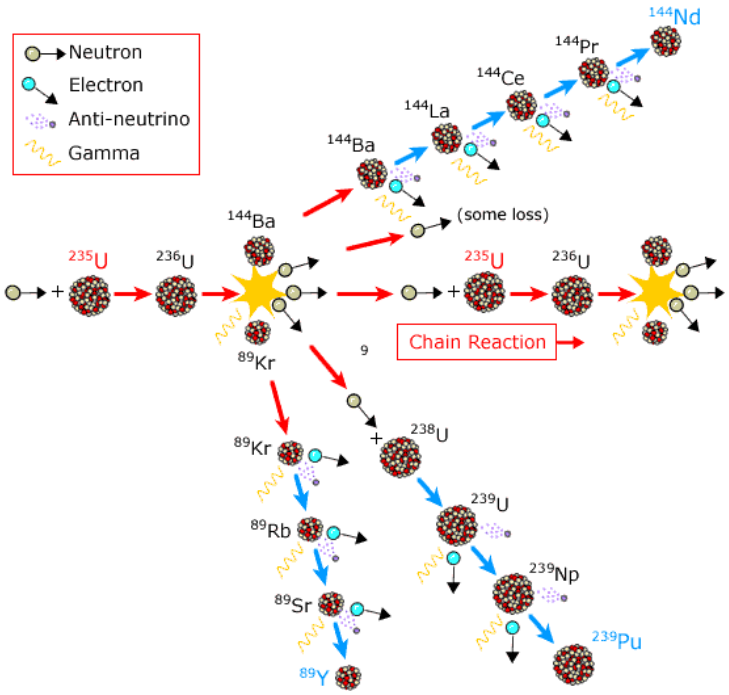


Figure 3.4: Réactions nucléaires dans le cœur

En plus de ces neutrons émis par la fission, trois autres phénomènes ont lieu, l'émission d'un gamma, et deux autres chaînes de décroissance radioactive , menant pour l'une à de l'Yttrium et l'autre à du Néodyme (il existe en réalité beaucoup plus de scénario possible, ceci n'est qu'un résumé car le but du document n'est pas l'étude des réactions dans le cœur). Pour résumer, il y a deux chaînes de décroissance radioactive des produits de fission, et les anti-neutrinos proviennent des trois chaînes de décroissance radioactive. Ils sont en moyenne au nombre de 6, on en voit 9 sur la figure 3.4 car l'intégralité des réactions sont présentes sur cette dernière, il faudrait intégrer sur des temps longs pour en avoir 9, mais dans la pratique, c'est 6, et 2 seulement passent le seuil de détection.
Une partie de ces anti-neutrinos va parvenir à STEREO (angle solide).
Suivons donc l'un de ces anti-neutrinos (seulement 1 sur 10^{-16} neutrino interagit avec le détecteur). L'anti-neutrino parcoure le chemin le séparant du détecteur, traverse le blindage sans aucun soucis, pour aller entrer en collision avec un proton libre dans le détecteur et engendrer deux phénomènes. Ce sont ces deux phénomènes qui sont à l'origine du principe de mesure. En effet, cette collision va engendrer un e^+ et un n^0.

$$\bar{\nu}_e + p^+ \rightarrow e^+ + n^0$$

1/ Le positron, chargé, est dévié de sa trajectoire et perd de l'énergie par rayonnement. Il va très vite s'annihiler avec un électron du milieu, créant deux photons γ. Ces deux gammas (de 511 MeV !) vont créer une cascade

d'effet, créant d'autre photons (dits de scintillement) qui vont être réfléchis sur les parois des cellules pour arriver au PM ou ils vont décrocher un électron qui, grâce à un dispositif adéquat, vont créer une cascade d'autres électrons (c'est le principe d'amplification des PMs). Un premier signal est donc perçu ou *signal prompt*, on attend une distribution continue entre 1.022 MeV ($2m_e$ = seuil de la réaction, juste l'annihilation a lieu) et environ 8 MeV (max d'énergie cinétique). La valeur moyenne de la distribution est de 3.7 MeV.
2/ Le neutron est un peu énergétique ($\simeq$ 15 keV) et va se thermaliser dans le liquide scintillant dopé au Gadolinium, par collisions successives, avant d'être capturé par un atome de Gadolinium. Ce mécanisme de capture va émettre d'autres gammas, qui, sur le même principe que ceux de la paire e^-e^+, vont être à l'origine d'un second signal, retardé par rapport à la paire e^-e^+. Ceci va constituer le *signal delayed*, qu'on attend aux alentours de 7.3 MeV.

Ces deux signaux sont séparés d'environ 50μs, et c'est grâce à cela qu'un premier tri va être réalisé, et on appellera signal candidat neutrino un signal qui répond au critère Δt(*prompt-delayed*) $\simeq$ 50 μs.

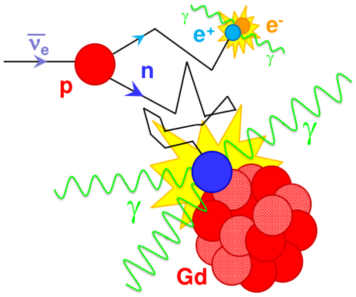


Figure 3.5: Illustration des événements Prompt-Delayed

Pour augmenter le nombre de détection, il faut beaucoup de neutrino car leur section efficace (probabilité d'interaction avec la matière) est très faible (environ 10^{-43} cm soit une probabilité d'interaction de 1.10^{-16}). Et il faut aussi beaucoup de matière car certain neutrino passent sans entrer en collision avec un proton.

4 Le réacteur à haut flux de l'ILL

Situé à Grenoble, le Réacteur à Haut Flux de l'Institut Laue-Langevin (RHF de l'ILL) possède le flux de neutron le plus important au monde, d'environ 1.5×10^{15} neutrons par seconde et par cm^2. Idéal pour la recherche d'une particule telle que ν_s.

4.1 Le bloc pile

Le bloc pile a pour principale fonctionnalité le refroidissement du cœur et la modération des neutrons provenant de ce dernier. C'est pourquoi on utilise de l'eau lourde D_2O car ce liquide possède des propriétés plus qu'intéressantes : Elle fait office de modérateur de neutrons et de liquide refroidisseur à la fois, voyons cela plus en détail.
L'eau lourde, de sa formule D_2O ou brute ^2H_2O est constituée de deux atomes de Deutérium (un isotope de l'Hydrogène) et d'un atome d'Oxygène. Presque pareil que H_2O, alors pourquoi ne pas simplement prendre de l'eau normale (légère) ?
L'eau H_2O, ou eau légère, pourrait ralentir les neutrons afin de leur donner une probabilité plus élevée d'aller provoquer de nouvelles fissions (modérateur de neutrons). Cependant ces neutrons issus des réactions de fissions venant du cœur auraient possibilité de se faire capturer par l'un des deux protons (H) de la molécule H_2O, et former du Deutérium. Et le but ici est d'avoir un maximum de neutrons. Et c'est là ce que l'eau lourde D_2O a de plus, les neutrons ne peuvent plus se faire capturer, il y a déjà deux atomes de Deutérium, alors, en plus de ralentir les neutrons pour qu'ils retournent fissionner l'Uranium, l'eau lourde les conserve tous (presque, on exclut la rare formation de Tritium), afin d'augmenter considérablement le flux de neutrons du cœur (Les neutrons n'ont pas une probabilité nulle d'interagir avec l'eau lourde mais la section efficace de cette dernière est de σ = 0,00046 barn, pratiquement mille fois inférieure à celle de l'eau légère σ = 0,33 barn [5]).De plus, l'eau lourde a quasiment la même capacité calorifique que l'eau ($C_p \simeq 4.16876\ J.K^{-1}.kg^{-1}$), elle peut donc servir de bon refroidisseur.
Sur le schéma suivant, le bloc pile est le cylindre dont le diamètre est celui de la cuve à D_2O, c'est la partie centrale de la piscine à H_2O.

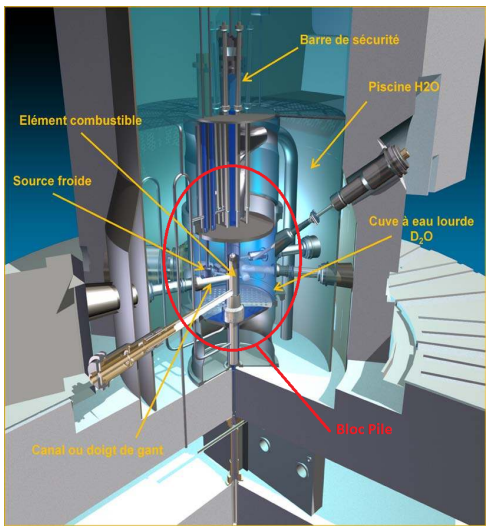


Figure 4.1: Schéma du bloc pile

Le bloc pile se divise en deux parties, une partie haute pression (partie axiale centrale contenant l'élément combustible), et une autre à pression moindre (autour de la partie à haute pression).

4.1.1 Partie haute pression (HP)

La partie haute pression du réacteur (P≃14 bars) contient les éléments suivants :

- Le circuit primaire en D_2O (à 2370 $m^3.h^{-1}$ en moyenne)
- Le combustible nucléaire
- La barre de pilotage
- Le circuit Barre de pilotage (circuit CRAB de D_2O à 85 $m^3.h^{-1}$ en moyenne)
- La cheminée centrale approvisionnée par l'entrée d'eau lourde du circuit principal
- D'une tuyauterie DRG (Détection Rupture de Gaine), servant de sécurité en cas de brisure de tuyauterie

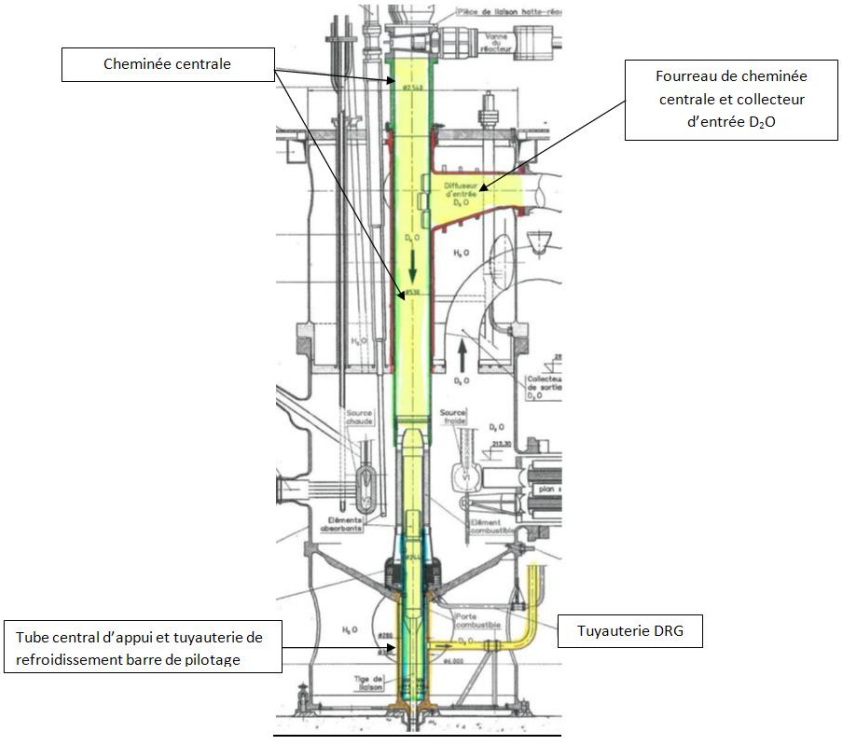


Figure 4.2: Schéma de la partie Haute Pression (en jaune)

Le circuit primaire sert à évacuer la chaleur dégagée par le cœur, il est constitué de deux pompes et de deux échangeurs assurant le reflux thermique. Il est refroidi par un circuit secondaire alimenté par l'eau du Drac (affluent de l'Isère). Le combustible, la barre de pilotage et la partie des circuits de refroidissement passant par ces derniers constituent le cœur du réacteur. Ce cœur est constitué d'un combustible enrichi à 93% en ^{235}U pouvant développer une puissance thermique de 58 MW. Neuf, le combustible totalise un poids de 8.57 kg et au bout d'un cycle, de 50 jours, 40% de ce dernier est brûlé. Le cœur est un cylindre de 80 cm de haut pour 40 cm de diamètre.
Sur la partie extérieure du cœur se trouve le combustible nucléaire, sur un anneau de 14 cm (diamètre extérieur 40 cm, diamètre intérieur 26 cm). Il se présente sous la forme de plaque courbées reliant le diamètre

intérieur de l'anneau au diamètre extérieur. Il y a en tout 280 plaques courbes, faites d'un alliage de ^{235}U et d'Aluminium. Entre ces plaques courbes de combustible circule un débit de 2340 $m^3.h^{-1}$ en moyenne pour refroidir ce dernier.
Sur le diamètre intérieur restant, de 26 cm, on va accueillir en position centrale une barre constituée de Nickel, élément absorbant de neutrons, et son circuit de refroidissement. Cette barre est appelée barre de pilotage, car elle permet de réguler les réactions nucléaire en absorbant une partie des neutrons émis qui les induisent. Sa position centrale la rend plus efficace. Sa durée de vie est de 4 cycles environ.
C'est grâce à cette barre qu'on va pouvoir maintenir la puissance du réacteur constante, car si la barre n'était pas là, la puissance serait maximale au début puis baisserait au fil du temps car l'Uranium fissionne et son activité décroît. Ainsi on va réguler la puissance en levant petit à petit la barre pendant la durée d'un cycle (Figure ci dessous, on voit bien le lien entre la hauteur de la barre et la puissance, et on retrouve le comportement exponentiel de la baisse d'activité dans la hauteur de la barre).

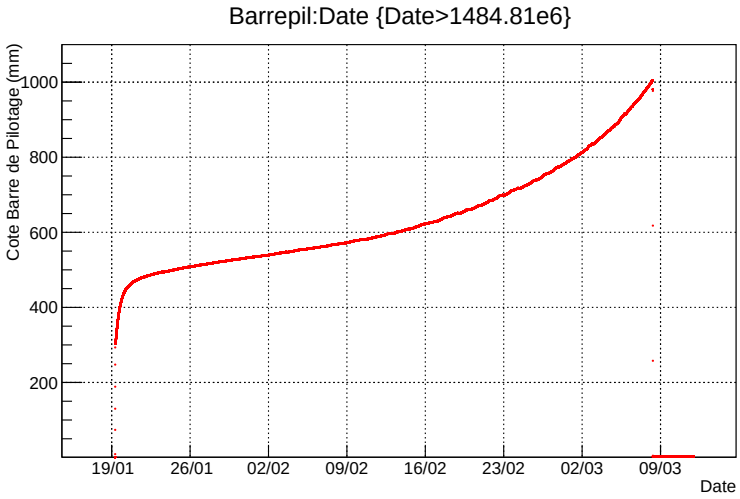


Figure 4.3: Cote de la barre de pilotage au cours du temps

Entre la barre de pilotage et l'anneau de combustible circule en permanence un débit d'eau lourde de 85 $m^3.h^{-1}$ (circuit barre de pilotage) qui sert de refroidisseur et de liquide caloporteur.
Pour finir, il y a en sortie de cœur la tuyauterie DRG pour la prévention de brèche (circuit DRG de D_2O à 25 $m^3.h^{-1}$ en moyenne).
Cette partie haute pression baigne dans une cuve de 2.5 m de diamètre d'eau lourde D_2O.

4.1.2 Partie basse pression (BP)

Comme on peut le voir sur la figure 4.4 la partie basse pression du bloc pile est autour de la partie haute pression. Cette partie n'est qu'à 4 bars soit 10 bars de moins que la partie HP. C'est l'enveloppe contenant le cœur du réacteur, remplie d'eau lourde pour entretenir le flux neutronique en le modérant, tout en servant de fluide caloporteur. La coque extérieure cylindrique est faite d'Aluminium.

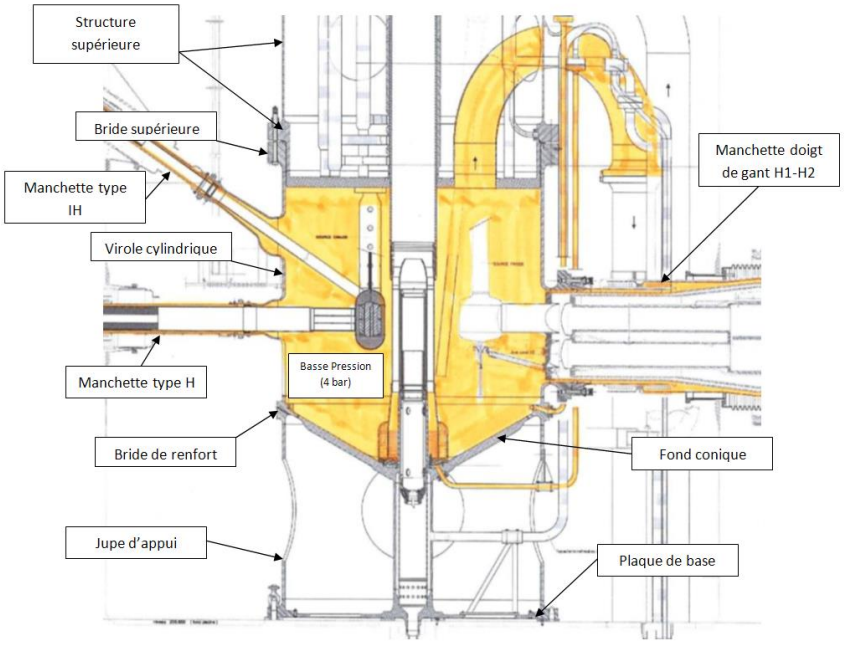


Figure 4.4: Schéma de la partie Basse Pression (en jaune)

4.2 La piscine à eau légère

Une piscine d'eau légère H_2O de 6 m de diamètre entoure la cuve d'eau lourde (partie BP). Elle est autour, mais aussi en dessous et au dessus de la partie BP (voir figure 4.1). L'objectif principal de ce dispositif est de limiter la pollution due au rayonnement, que ce soit dû au facteur humain ou naturel, comme les ondes cosmiques par exemple. Pour cela, l'eau a été déminéralisée, sinon elle ne remplit pas son rôle de protection contre les rayonnements. On pourrait croire que la piscine sert aussi de refroidisseur, mais on verra dans le bilan de puissance que cet élément participe peu à la puissance totale. Elle sert en revanche de lieu de stockage des combustibles usagés.

5 Outils théoriques pour la détermination de la puissance du cœur

La question à se poser étant la suivante : "A quels endroits y-a-t-il échange d'énergie sous forme de chaleur ?". Et ce quel que soit le phénomène physique à l'origine de cet échange, il faut pouvoir le convertir en puissance. Nous allons pour cela exposer quelques notions qui nous serviront dans la suite.

5.1 Bilan enthalpique, calcul de la puissance

Nous allons déterminer les variables nécessaires au calcul de la puissance. Pour cela listons les éléments dont nous disposons et voyons ce que nous pouvons faire avec :

- Un fluide caloporteur faisant office de système thermodynamique
- On sait que l'énergie totale d'un système thermodynamique est l'Enthaplie $H = U + PV$
- On sait que la puissance est la dérivée temporelle de l'énergie

- On dispose de capteurs de pression et de température

On va faire des bilans enthalpiques en entrée et en sortie de cœur, mais aussi en entrée et en sortie de tout les éléments susceptibles de recevoir de l'énergie provenant du cœur. Ceci afin de déterminer la variation d'enthaplie ΔH du système thermodynamique concerné par le bilan. ΔH représente l'énergie emmagasinée entre l'entrée et la sortie de chaque élément dans lequel le réacteur dépose sa puissance. On aura alors plus qu'à faire une dérivée temporelle de cette énergie emmagasinée pour avoir la puissance reçue par le fluide caloporteur entre l'entrée et la sortie.

Enthaplie en entrée d'un élément :

$$H_e = mC_pT_e$$

Enthaplie en sortie :

$$H_s = mC_pT_s$$

Variation d'enthaplie :

$$\Delta H = mC_p\Delta T$$

Où $\Delta T = T_s - T_e$
Puissance :

$$P = \frac{dH}{dt} = C_pT\frac{dm}{dt}$$

Or $m = \rho V$ d'où $\frac{dm}{dt} = \rho\frac{dV}{dt} = \rho q_v$ où q_v est le débit volumique. On a donc :

$$P = \rho q_v C_p T = \rho q_v h$$

Où h est l'enthalpie massique $h = \frac{H}{m}$ Pour finir, la masse volumique dépendant de la température, on a une masse volumique différente en entrée et en sortie d'élément de sorte que pour un élément l'expression de la puissance reçue soit :

$$\boxed{P = q_v \times (\rho_s h_s - \rho_e h_e)}$$

Où q_v sera le débit volumique dans l'élément considéré. Nous retrouverons cette forme de puissance dans les bilans qui vont suivre.

Ceci pose deux inconnues, la température, que nous aurons via les capteurs, et le débit, que nous pouvons mesurer grâce au dispositif décrit dans la partie suivante à l'aide de variation de pression (que l'on peut mesurer via les capteurs de pression).

5.2 Mécanique des fluides

En 1738, Daniel Bernoulli exposait son fameux théorème en utilisant la conservation de l'énergie d'une masse fluide, qui se divise en trois composantes :

1. La densité volumique d'énergie due au travail des forces de pression P
2. La densité volumique d'énergie cinétique $\frac{\rho v^2}{2}$
3. La densité volumique d'énergie potentielle $\rho g z$

La somme de ces trois composantes est une entité conservée le long d'une ligne de courant, ce qui mène à la formulation mathématiques du théorème de Bernoulli pour un fluide parfait :

$$P + \rho g z + \frac{\rho v^2}{2} = Cste$$

De plus, la conservation du débit pour la masse fluide considérée donne :

$$vS = Cste$$

Où v est la vitesse du fluide traversant la surface S.

Cependant, l'écoulement d'un fluide réel n'est pas aussi idéal. Il peut apparaître des forces de frottement, ce qui induit une perte d'énergie le long du trajet du fluide, appelée *perte de charge*. La géométrie du dispositif joue aussi un rôle décisif.

5.2.1 Le débitmètre à organe déprimogène

Il s'agit de créer au sein de la canalisation une restriction localisée de la section (ou constriction) qui engendrera une différence de pression statique dont la mesure nous permettra d'en déduire le débit [6] [7].
Cet obstacle soudain va induire un important coefficient de déperdition d'énergie pour le fluide, on parle de *perte de charge singulière*. Par le principe de conservation de l'énergie on obtient une forme de théorème de Bernoulli modifiée :

$$P_A + \rho g z_A + \frac{\rho v_A^2}{2} = P_B + \rho g z_B + \frac{\rho v_B^2}{2} + \rho g \Delta h$$

De plus, la conservation du débit au points A et B donne :

$$v_A S_A = v_B S_B = q_v$$

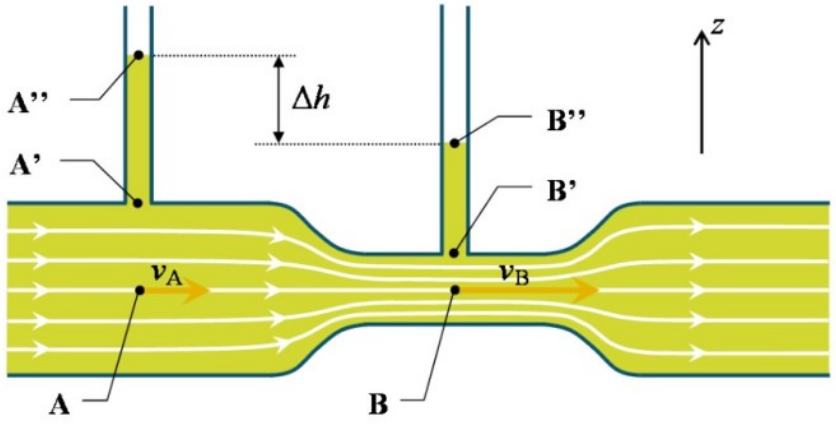


Figure 5.1: Représentation schématique de l'effet Venturi

Sans considérer de perte de charge, on a :

$$P_A + \rho g z_A + \frac{\rho v_A^2}{2} = P_B + \rho g z_B + \frac{\rho v_B^2}{2}$$

Comme la conduite est horizontale, Δz=0 et

$$\begin{aligned} P_A - P_B &= \frac{\rho}{2}(v_B^2 - v_A^2) \\ &= \frac{\rho}{2} v_B^2 \left(1 - \frac{v_A^2}{v_B^2}\right) \\ &= \frac{\rho}{2S_B^2} q_v^2 \left(1 - \frac{S_B^2}{S_A^2}\right) \end{aligned}$$

Comme $S_A = \pi\left(\frac{D}{2}\right)^2$ et $S_B = \pi\left(\frac{d}{2}\right)^2$

$$= \frac{8\rho q_v^2}{S\pi d^4} q_v^2 \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)$$

Finalement on obtient une expression du débit volumique, de la forme :

$$\boxed{q_v = \frac{\pi d^2\sqrt{2\rho}}{4}\sqrt{\frac{1}{1-\beta^4}}\sqrt{P_A - P_B}}$$

En posant $\beta = \frac{d}{D}$ *facteur d'ouverture du diaphragme.*
Le terme $\sqrt{\frac{1}{1-\beta^4}}$ est le *coefficient de vitesse d'approche*, il faut éviter d≃D sinon les erreurs sur le débit sont conséquentes car le terme décrit précédemment est très grand.
Le terme $\sqrt{P_A - P_B}$ est la *pression différentielle*, équivalente à la différence de hauteur de liquide dans les tubes en A et en B, aussi appelée *différence de pression statique*, mesurée ici en $mmHg$.
Mais notre dispositif de mesure est un diaphragme, et pour mettre en pratique la formule encadrée, cela signifie qu'il faudrait placer un capteur de pression en amont du diaphragme et un autre au niveau de la constriction (du diaphragme), ce qui est techniquement très compliqué à la vue d'un diaphragme. Par chance, la mécanique des fluides étant une belle discipline, il se trouve que la zone de compression maximale n'est pas au niveau du diaphragme, mais un peu en aval, cet endroit est nommé la *vena contracta* :

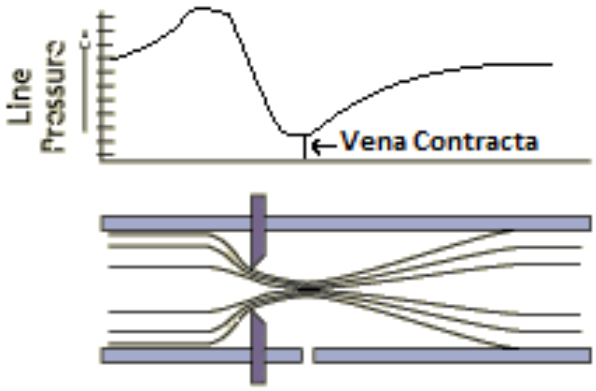


Figure 5.2: Représentation schématique de la vena contracta

Ce qui simplifie grandement la mise en place du dispositif, on place un capteur de pression en amont à la zone de pression maximale, et un autre au niveau de la vena contracta pour minimiser l'erreur sur $P_A - P_B$. Dans notre cas, ce sont des colonnes de mercure et la différence de hauteur est directement transcrite en pression différentielle.
Pour l'étalonnage du diaphragme de mesure du réacteur de l'ILL, le circuit en sortie de cuve D_2O à été reproduit échelle 1:1. Pour une meilleure exactitude de mesure, l'emplacement du diaphragme de mesure doit respecter certaines normes :

- Entre un coude à 90° et l'entrée du diaphragme, la longueur de tuyauterie doit être d'environ 40 diamètre.
- En sortie, pour un rapport d'ouverture $\frac{d}{D} \simeq 0.5$ il faut prévoir environ 5 diamètre de longueur de tuyauterie.

Pour le RHF de l'ILL ces normes ne sont pas respectées ($\simeq$ 20 D en entrée et $\simeq$ 2.7 D en sortie). Il faut donc étalonner le diaphragme, afin d'apporter un terme correctif à la formule du débit théorique. De plus le diamètre en sortie de diaphragme est inférieur au diamètre en entrée, et la théorie ne sait décrire ça.
C'est pourquoi le diaphragme qui mesure le débit d'eau lourde en sortie de cœur a été étalonné. Pour l'occasion un circuit a été monté à l'échelle 1:1, reproduit sur la figure ci dessous :

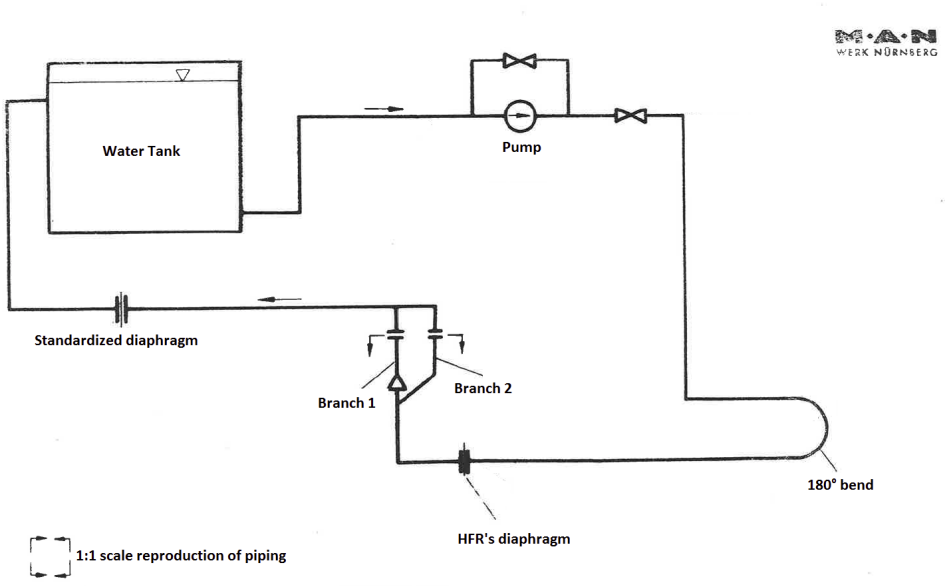


Figure 5.3: Circuit 1:1 d'étalonnage du diaphragme de mesure de débit D_2O sortie cœur

Partons du réservoir d'eau légère. En sortie de réservoir se trouve la pompe qui fait circuler l'eau dans l'ensemble du circuit. Plus en aval, après un coude à 180°se situe le diaphragme à étalonner. Le débit mesuré dans ce diaphragme sera comparé à celui mesuré par un second diaphragme totalement aux normes. On va corriger le débit mesuré par notre diaphragme à étalonner par un facteur de calibration qui fera en sorte qu'il donne le bon débit, mesuré par le diaphragme normalisé.
Grâce à toute ces considérations théoriques nous pouvons déterminer l'expression de la puissance du cœur.

6 Détermination de la Puissance du cœur

On a maintenant l'expression théorique du débit au niveau du diaphragme (cf Partie 5.3.1), et l'expression de la puissance théorique (cf Partie 5.2). On peut maintenant faire une détermination de la puissance extraite élément par élément en appliquant un bilan enthalpique à l'élément en question.
La question à se poser est la suivante : quels sont les éléments qui participent au bilan enthalpique, et donc à l'extraction de puissance provenant du cœur ? Ou sous une autre forme; dans quels éléments y-a-t-il un dépos d'énergie ?
Quatre éléments participent à l'extraction de puissance provenant du cœur de manière notable.

- P_C puissance extraite D_2O qui passe dans le cœur et ressort en sortie principale
- P_{DRG} puissance extraite par D_2O qui passe dans le circuit DRG
- P_{BP} puissance extraite par D_2O qui passe par le circuit Barre de Pilotage
- P_{PISC} puissance extraite par H_2O qui passe dans le circuit Piscine

Et donc, en effectuant un bilan enthalpique sur chacun des éléments qui participent à l'extraction de puissance, on obtient :

- Contribution du bidon réflecteur et de l'élément combustible :

$$P_C = \frac{1}{3600}\left[q_{D_2O} \times \rho_{D_2O} \times C_p^{D_2O}(TSC - TEC)\right]$$

- Contribution du circuit DRG :

$$P_{DRG} = \frac{1}{3600}\left[q_{DRG} \times \rho_{D_2O} \times C_p^{D_2O}(TSC - TEC)\right]$$

- Contribution du circuit barre de pilotage :

$$P_{BP} = \frac{1}{3600}\left[q_{BP} \times \rho_{D_2O}^{BP} \times C_p^{D_2O}(TSBP - TEC)\right]$$

- Contribution du circuit piscine :

$$P_{PISC} = \frac{1}{3600}\left[q_{PISC} \times \rho^{H_2O} \times C_p^{H_2O}(TSPISC - TEPISC)\right]$$

La puissance thermique totale est la somme de ces 4 éléments :

$$P_{th} = P_C + P_{DRG} + P_{BP} + P_{BP}$$

Tout les termes sont explicités dans l'annexe 1. Cette formule est aussi présente dans la fiche technique n°149 [8].
On voit d'après l'expression de chacun des éléments qu'on a besoin de certaines informations : Capacité calorifique C_p, masse volumique ρ, débit q et température en entrée et en sortie de l'élément en question. C'est tout ce qui est nécessaire pour la détermination de la puissance. Les valeurs de C_p et ρ sont dans la littérature. Pour ce qui est du débit et des températures, on a pour cela une multitude de capteurs qui relèvent toutes les températures et tout les débit nécessaires pour chaque élément qui contribue. Les différents capteurs sont les suivants :

Nom Capteur	Unité	Fonction
A004	°C	Température de sortie de cœur 1
A005		Température de sortie de cœur 2
A006		Température de sortie de cœur 3
A007		Température de sortie de cœur 4
A008		Température de sortie de cœur 5
A009		Température d'entrée de cœur 1
A010		Température d'entrée de cœur 2
A011		Température d'entrée de cœur 3
A012		Température d'entrée de cœur 4
A013		Température d'entrée de cœur 5
A069		Température sortie Barre Pilotage
A112		Température sortie échangeur B23
A113		Température entrée échangeur B24
A114		Température sortie échangeur B23
A115		Température entrée échangeur B24
A014	$m^3.h^{-1}$	Débit D_2O en sortie de cœur 1
A015		Débit D_2O en sortie de cœur 2
A016		Débit D_2O en sortie de cœur 3
A024		Débit D_2O en sortie de cœur 4
A025		Débit D_2O en sortie de cœur 5
A020		Débit D_2O en sortie Barre Pilotage
A084		Débit D_2O circuit DRG
A110		Débit H_2O échangeur B23
A111		Débit H_2O échangeur B24

Les signaux provenant des capteurs de pression sont directement transformés en valeurs de débits (via l'électronique notée TCMS).
Les valeurs des températures en entrée (TEC) et en sortie (TSC) de cœur sont définies comme la moyenne sur les cinq capteurs de températures présents en entrée et en sortie de cœur, il en est de même pour la valeur du débit D_2O en sortie de cœur (voir partie 6 pour l'explication):

$$TSC = \frac{A004 + A005 + A006 + A007 + A008}{5}$$

$$TEC = \frac{A009 + A010 + A011 + A012 + A013}{5}$$

$$q_{MmRS} = \frac{A014 + A015 + A016 + A024 + A025}{5}$$

Dans la pratique la présence de cinq capteurs au même endroit ne sert que dans la détection de problèmes, tel qu'une grande différence entre deux d'entre eux, mais d'un point de vue statistique, c'est une aubaine que ce soit ainsi, cela réduit l'incertitude de mesure.
Aux autres endroits que ces trois derniers, la mesure se fait par un capteur unique, et l'erreur sur la mesure sera l'incertitude du capteur.
On a traité les données venant de tout ces capteurs à l'aide du logiciel ROOT, le langage est du Python (Pyroot).

Les valeurs moyennes correspondant à ce cycles sont présentes dans le tableau suivant :

Nom Capteur	Unité	Fonction	Valeur Cycle étudié
A004	°C	Température de sortie de cœur 1	44.79 ° C
A005		Température de sortie de cœur 2	44.77 ° C
A006		Température de sortie de cœur 3	44.87° C
A007		Température de sortie de cœur 4	44.77 ° C
A008		Température de sortie de cœur 5	44.91 ° C
A009		Température d'entrée de cœur 1	26.98° C
A010		Température d'entrée de cœur 2	26.9° C
A011		Température d'entrée de cœur 3	26.88° C
A012		Température d'entrée de cœur 4	26.97° C
A013		Température d'entrée de cœur 5	27.01° C
A069		Température sortie Barre Pilotage	37.75° C
A112		Température entrée échangeur B23	33.45° C
A113		Température sortie échangeur B23	28.06° C
A114		Température entrée échangeur B24	H.S
A115		Température sortie échangeur B24	H.S
A014	$m^3.h^{-1}$	Débit D_2O en sortie de cœur 1	2346 $m^3.h^{-1}$
A015		Débit D_2O en sortie de cœur 2	2355 $m^3.h^{-1}$
A016		Débit D_2O en sortie de cœur 3	2349 $m^3.h^{-1}$
A024		Débit D_2O en sortie de cœur 4	2349 $m^3.h^{-1}$
A025		Débit D_2O en sortie de cœur 5	2351 $m^3.h^{-1}$
A020		Débit D_2O en sortie Barre Pilotage	65.36 $m^3.h^{-1}$
A084		Débit D_2O circuit DRG	22.87 $m^3.h^{-1}$
A110		Débit H_2O échangeur B23	126 $m^3.h^{-1}$
A111		Débit H_2O échangeur B24	H.S

Il faut savoir que cette formule pour la puissance n'est pas celle d'origine, qui est présente dans la fiche technique n°149 [8]. L'ancienne formule prenait comme débit en sortie de cœur la valeur q_{MmRS}, qui est la valeur renvoyée directement par l'électronique du TCMS, qui prenait la valeur de la pression différentielle aux bornes du diaphragme et transformait ce signal en débit via une formule théorique. Mais comme le diaphragme n'est pas aux normes, il a fallu calibré le diaphragme, on nomme q_{D_2O} le débit réel. Et on a, grâce à la calibration

$$q_{D_2O} = \frac{33.3456}{\sqrt{\rho_{D_2O}}} q_{MmRS} \sqrt{1 - \frac{30.136}{q_{MmRS}}}$$

Avec $\frac{33.3456}{\sqrt{\rho_{D_2O}}} \sqrt{1 - \frac{30.136}{q_{MmRS}}} \simeq 1$ (=0.997), donc on a quand même bien $q_{D_2O} \simeq q_{MmRS}$ (une différence de 0.003%, ce qui est négligeable).
De plus, au lieu d'avoir une expression de la forme $P = q_v \times (\rho_s h_s - \rho_e h_e)$, on a plutôt une expression telle que

$$P = q_v \times \rho(T) \times (h_s - h_e) = q_v \times \rho(T) \times C_p \times (T_s - T_e)$$

Ce qui revient au même, la différence est négligeable et c'est plus simple pour la détermination de l'incertitude moins de dérivées partielles et d'incertitude à déterminer).
Ci dessous la puissance en fonction du temps, avec cette formule :

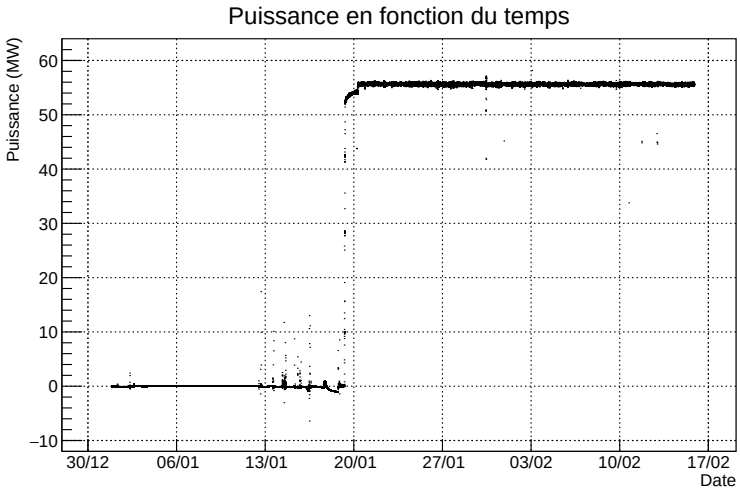


Figure 6.1: Graphe obtenu avec la formule préconisée

Et l'accord avec la valeur donnée dans les relevés de puissance instantanée (accord à 0.03%) :

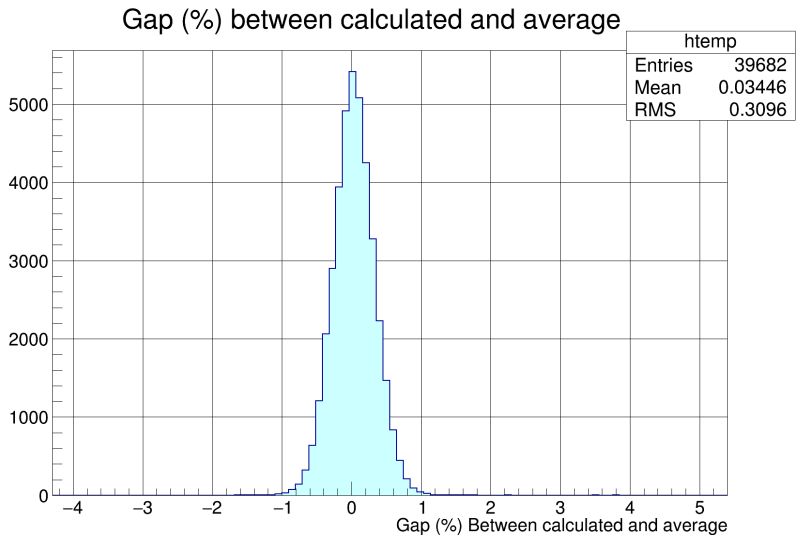


Figure 6.2: Différence absolue entre la puissance de notre expression et la puissance donnée par l'ILL

7 Calcul d'incertitude sur la puissance

La puissance thermique totale P_{th} est fonction d'une multitude de grandeurs physique, provenant de l'ensemble des éléments qui participent à son extraction. Chacune de ces grandeurs est relevé par un capteur, qui induira une erreur. On va déterminer l'erreur totale engendrée par l'ensemble de tout les capteurs qui entrent en jeu dans la détermination de la puissance du cœur.
Seulement, un des 4 éléments extrait 96.03 % de la puissance totale, c'est P_C, puissance extraite par l'eau lourde qui passe dans le cœur du réacteur et qui ressort par la sortie principale située sur la face supérieure de la cuve à eau lourde. P_C est fonction (entre autres) de TSC, TEC, et de q_{MmRS}. À cause de son importante contribution, il n'y a pas 1, mais 5 capteurs qui relève chacune de ces 3 grandeurs. Une petite étude préalable est donc la vérification de l'accord entre les 5 capteurs qui mesurent la grandeur physique au même endroit, ce qui donnera une première idée de l'incertitude capteur. Ceci se fera par redondance capteur.

Détermination des écarts entre capteurs Δx^i par redondance

Détermination de $\Delta(TSC)$

On va effectuer la redondance capteur sur les 5 capteurs de température en sortie de cœur, on calcule tout d'abord l'écart de chaque capteurs à la moyenne des 4 autres pour chaque prise de donnée :

$$\Delta T_i = T_i - < T_{j\neq i} > \qquad i,j \in [1;5]$$

Puis on détermine la moyenne d'écart des 5 capteurs :

$$\Delta T_{moy} = < \Delta T_i >$$

Pour finalement calculer le RMS de la redondance des 5 capteurs :

$$\Delta TSC = \frac{1}{5} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{5} \left(\Delta T_i - \Delta T_{moy}\right)^2}$$

On obtient ceci :

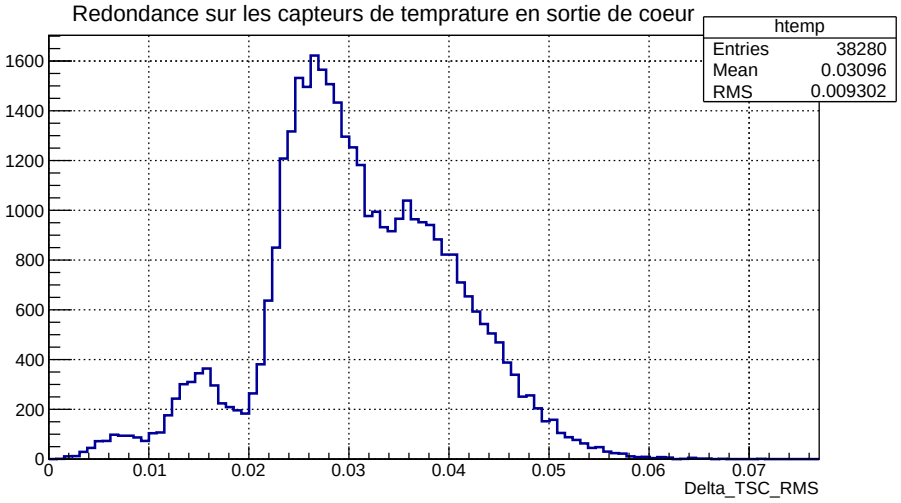


Figure 7.1: Écart de température entre capteurs en sortie de cœur

L'écart est faible, mais ce ne sont les données que d'un cycle réacteur, donc on majore l'erreur afin de ne pas en commettre une. Soit un écart de température de $\Delta TSC \simeq 0.1°C$ pour majorer l'erreur.

Détermination de $\Delta(TEC)$

De la même manière, on obtient par redondance capteur l'incertitude sur la température en entrée de cœur :

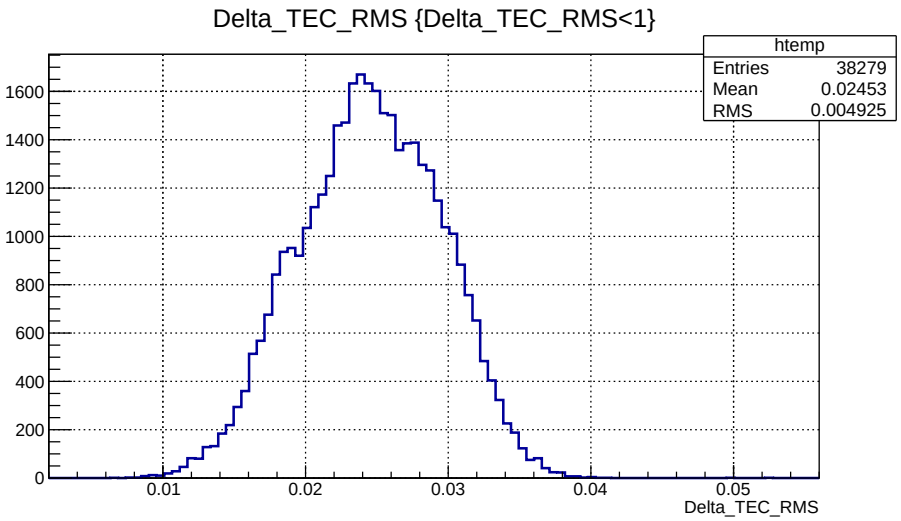


Figure 7.2: Écart de température entre capteurs en entrée de cœur

Les différences entre les températures relevées par les 5 capteurs en entrée de cœur sont moindres qu'en sortie de cœur. Mais on prend la même valeur d'écart qu'en sortie de cœur pour être sûr. Soit, pour bien majorer, $\Delta TEC = \Delta TSC \simeq 0.1°C$.

Détermination de $\Delta(q_{MmRS})$

De la même manière, pour le débit d'eau lourde en sortie de cœur on obtient aussi par redondance capteur :

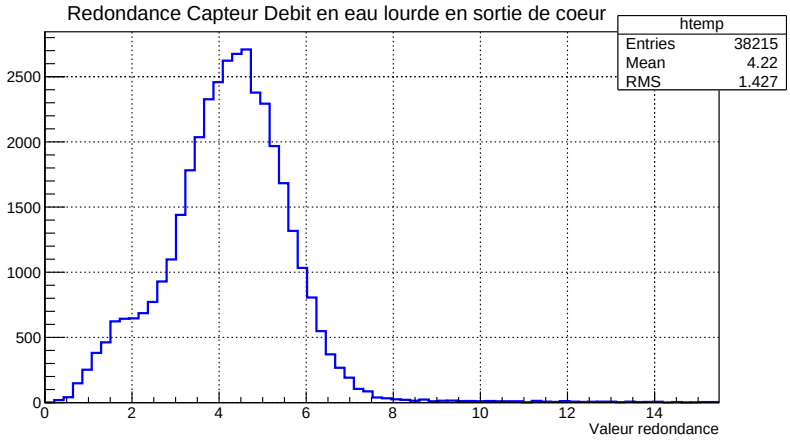


Figure 7.3: Écart de débit D_2O entre capteurs en sortie de cœur

Soit une moyenne de $4.22 m^3.s^{-1}$. Ce qui représente 0.21% d'écart par rapport au débit nominal de $2350 m^3.s^{-1}$. Une fois de plus, pour majorer, on peut dire que l'écart entre les capteurs est de 0.5% ($11.75 m^3.h^{-1}$).

Conclusion

À la vue des différences moyennes de température, on peut conclure que nous avons, que ce soit en entrée ou en sortie de cœur, un écart relatif de 0.1°C . Ce qui représente un écart de 0.15°C pour ΔT.
Pour ce qui est du débit, on peut pour être sûr prendre un écart relatif de 0.5% par rapport au débit nominal de 2350 $m^3.h^{-1}$ ($11.75 m^3.h^{-1}$).
La redondance capteur est toujours bien inférieure à 1% de la valeur de la grandeur associée. L'accord entre les relevés des différents capteurs aux endroit ou ils sont multiples est bon.
On va maintenant estimer l'incertitude absolue $\frac{\delta P_{th}}{P_{th}}$.

7.1 Détermination des incertitudes absolues $\frac{\delta x^i}{x^i}$

L'incertitude absolue sur une fonction de n variables indépendantes telle que $P_{th}(x^1, x^2, ..., x^i, ..., x^n)$ est de la forme suivante :

$$\frac{\delta P_{th}}{P_{th}} = \sqrt{\sum_i^n \left(\frac{\partial P_{th}}{\partial x^i} \frac{\delta x^i}{P_{th}} \right)^2}$$

Calculons cette incertitude sur la puissance à l'aide de l'expression déterminée par le bilan enthalpique sur chacune des contributions, dans le but, espérons le, d'obtenir une erreur globale $\frac{\delta P_{th}}{P_{th}} \leq 2\%$.

Rappelons-le, P_{th} est extraite de 4 éléments :

- P_C puissance extraite par la cuve à D_2O et par l'élément combustible
- P_{DRG} puissance extraite par le circuit DRG
- P_{BP} puissance extraite par le circuit Barre de Pilotage
- P_{PISC} puissance extraite par le circuit Piscine

Et la puissance totale est la somme de ces 4 éléments.

$$P_{th} = P_C + P_{DRG} + P_{BP} + P_{PISC}$$

La contribution de chacun de ces éléments à la puissance totale P_{th} est :

- P_C : 96.03 %
- P_{DRG} : 0.93 %
- P_{BP} : 1.64 %
- P_{PISC} : 1.40 %

L'erreur totale sur P_{th} sera donc largement dominée par l'erreur sur P_C. Et il faudra en conséquence que l'erreur sur P_C soit inférieure à 2%, pour les 3 autres éléments l'erreur peut dépasser les 10-15% sans que cela n'affecte grandement l'erreur globale.
On a une incertitude absolue globale :

$$\frac{\delta P_{th}}{P_{th}} = \sqrt{\left(\frac{\delta P_C}{P_C} \times \frac{P_C}{P_{th}}\right)^2 + \left(\frac{\delta P_{DRG}}{P_{DRG}} \times \frac{P_{DRG}}{P_{th}}\right)^2 + \left(\frac{\delta P_{BP}}{P_{BP}} \times \frac{P_{BP}}{P_{th}}\right)^2 + \left(\frac{\delta P_{Pool}}{P_{Pool}} \times \frac{P_{Pool}}{P_{th}}\right)^2}$$

$$\frac{\delta P_{th}}{P_{th}} = \sqrt{0.96^2 \left(\frac{\delta P_C}{P_C}\right)^2 + 0.0093^2 \left(\frac{\delta P_{DRG}}{P_{DRG}}\right)^2 + 0.016 \left(\frac{\delta P_{BP}}{P_{BP}}\right)^2 + 0.014 \left(\frac{\delta P_{Pool}}{P_{Pool}}\right)^2}$$

On va traiter chacun des 4 éléments séparément. On a d'abord besoin de connaître les incertitudes relatives à toutes les variables.

7.2 Détermination des incertitudes relatives δx^i

Pour la détermination des incertitudes relatives δq_{MmRS} et $\delta \Delta T$, on a utilisé des fiches de calibration des capteurs de température et de débit.
L'électronique qui traite le signal venant des capteurs est nommée TCMS. Il y en a deux (sécurité), TCMS1 et TCMS2. [9] [10]

- La calibration des capteurs de températures a lieu tout les 2 ans. Les capteurs (thermocouples "PT100") sont placés dans un four dont la température est connue à 0.2°C près. On a les données de calibration pour les années 2012, 2014 et 2016 pour les 5 capteurs de sortie de cœur, et la même chose pour les 5 capteurs d'entrée de cœur.
- La calibration des capteurs de débit a lieu aussi tout les 2 ans dans le circuit lui même. Ils reçoivent un débit connu assez précisément. On regarde l'écart entre la valeur à mesurer et la valeur mesurée. On dispose des données de 2013 et de 2015, pour les cinq capteurs de débit en sortie de cœur.

Détermination de $\delta(TSC)$

Pour la détermination de $\delta(TSC)$, on a utilisé des données présentes dans des fiches de calibration des capteurs de température [9].
À l'aide des données présentes dans l'Annexe 2 partie TSC (tirées des fiches [9]), on peut remonter à l'incertitude relative moyenne de l'ensemble des 5 capteurs pour chaque année de calibration :

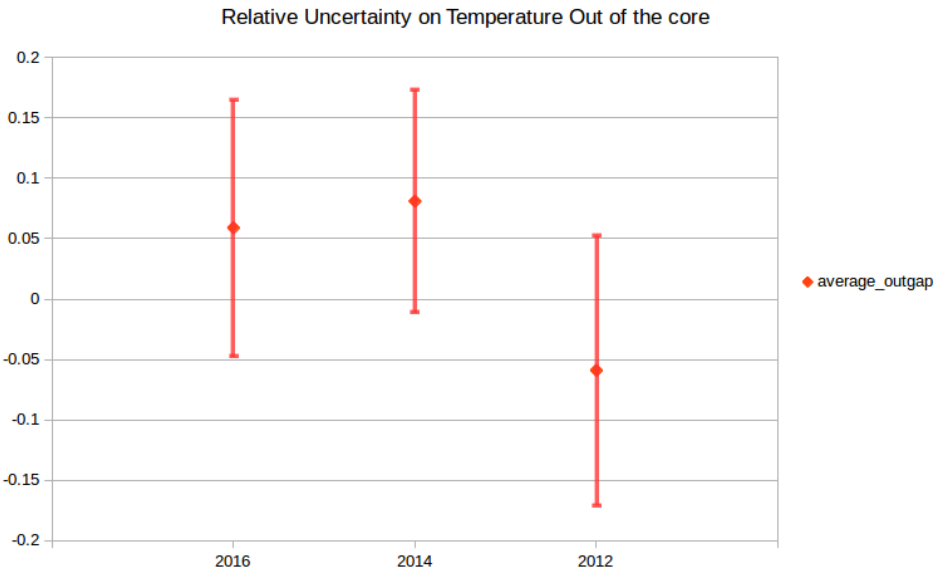


Figure 7.4: Incertitude relative TSC par an

Chacun des 3 points rouge est la moyenne sur les 10 valeurs d'écart par calibration (5 capteurs et 2 température de test, 20 et 40° c voir tableau en Annexe 2).
On remarque la présence d'une erreur corrélée d'environ 0.07°C (qui est due au four de calibration, et cette incertitude est en dessus de celle annoncée par le constructeur, de 0.2 ° C), ainsi qu'un RMS de 0.1°C par capteur en barre d'erreur (On retrouve bien la redondance capteur de 0.1 °C).
Comme on a 5 capteurs qui mesurent la température au même endroit, l'erreur totale sur la température en sortie de cœur est donc de

$$\delta(TSC) = \sqrt{0.07^2 + \frac{0.1^2}{5}} = 0.09°C$$

Détermination de $\delta(TEC)$

Pour la détermination de $\delta(TEC)$, on a utilisé des données présentes dans des fiches de calibration des capteurs de température [9] (les mêmes que pour $\delta(TSC)$) .
De la même manière qu'en sortie de cœur on représente sur un graphe l'écart moyen par année, avec comme barre d'erreur le RMS.

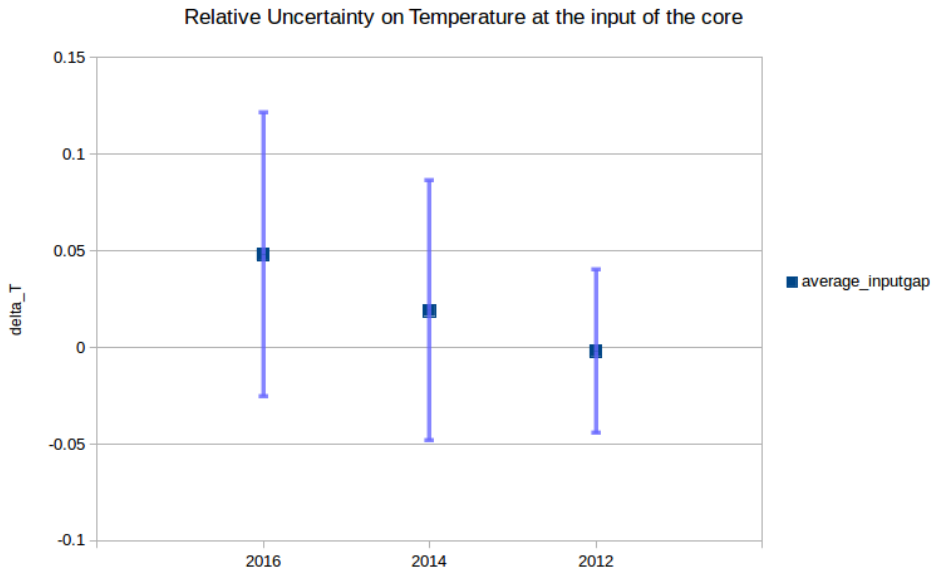


Figure 7.5: Incertitude relative TEC par an

Comme on n'a les données que pour 3 années, on ne considère pas l'erreur sur la température en entrée telle qu'elle est ici ($\simeq 0.06°C$), on prend plutôt la même erreur que pour la température en sortie, ce qui permet de majorer l'erreur et d'instituer une marge de sécurité :

$$\delta TEC = \delta TSC = 0.09°C$$

D'où l'erreur sur l'écart de température :

$$\delta(TSC - TEC) = \sqrt{2} \times 0.09°C = 0.13°C$$

Une fois de plus on majore et on dit que:

$$\boxed{\delta(TSC - TEC) = 0.15°C}$$

Détermination de $\delta(q_{MmRS})$

On a utilisé ici des fiches de calibration du diaphragme de mesure de débit en sortie de bloc pile [10]. Plus précisément ce n'est pas le diaphragme qui est étalonné mais les capteurs de pression qui le composent, puisque la valeur qu'ils renvoient dépend du diaphragme, la calibration de ces derniers étalonne aussi le diaphragme. Ces capteurs envoient le signal à TCMS1 et TCMS2 qui transforment la pression différentielle mesurée en valeur de débit.
Ci dessous est représenté le graphe d'écart moyen par année pour les valeurs de débit en sortie de cœur (même technique que pour TSC et TEC) (les données qui amènent à ce graphe sont en Annexe 2) :

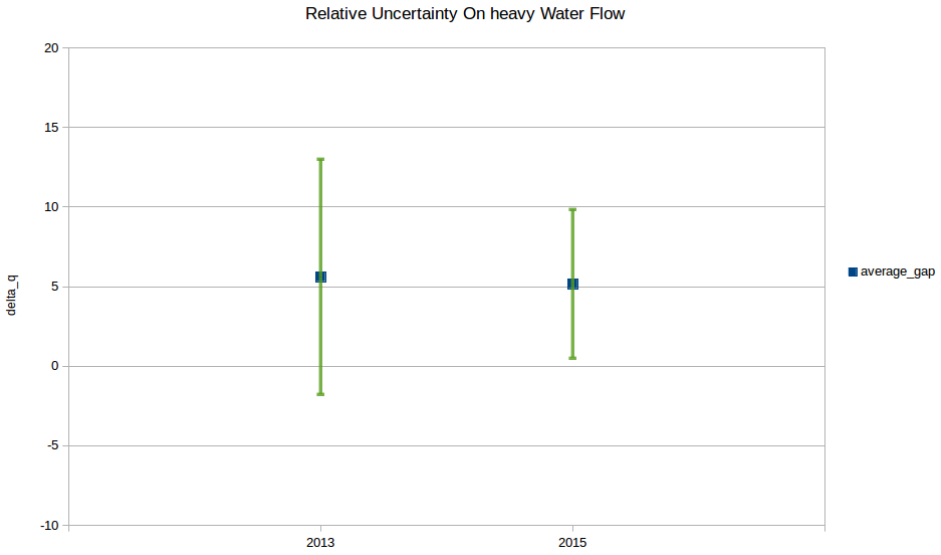


Figure 7.6: Incertitude relative $\delta_{calib}(q_{MmRS})$ par an

Comme pour la température, chaque point bleu est la moyenne de 10 débit mesurés, car il y a 5 capteurs et on a prit les données de calibration pour 2 débits (2200 et 2342 $m^3.h^{-1}$). À la vue de ce dernier graphe, on remarque la présence d'une erreur corrélée (commune à toute les prises de données) de $6m^3.h^{-1}$ environ et d'une erreur due au capteur de presque $10m^3.h^{-1}$ pour prendre large (la valeur exacte est la valeur du RMS des écart de 2013 et 2015).

$$\delta_{calib}(q_{D_2O}) = \sqrt{6^2 + \frac{7^2}{5}} = 7m^3.h^{-1}$$

On prend une bonne marge d'erreur puisque c'est un terme qui apparaîtra dans la puissance extraite par le cœur (qui compte à 96.03%)

$$\delta_{calib}(q_{MmRS}) = 10m^3.h^{-1}$$

Soit

$$\boxed{\frac{\delta_{calib}(q_{MmRS})}{q_{MmRS}} = \frac{10m^3.h^{-1}}{2350m^3.h^{-1}} = 0.43\% = \mathbf{0.5\%}}$$

Il faut ajouter à cette incertitude relative de calibration deux autres sources d'erreurs potentielles. La première est issue de la modification empirique de la formule du débit en raison du non respect des normes des tuyauteries de ce circuit (voir figure 5.3 partie 5.2.1 sur l'organe déprimogène). La formule théorique est $q_v = \alpha\sqrt{\Delta P}$, mais comme les normes ne sont pas respectées, le diaphragme a été testé dans une reproduction échelle 1:1 des tuyauteries du circuit primaire. Après modification empirique on a la formule

$$q_v = \gamma \times \sqrt{\Delta P - \zeta \times \sqrt{\Delta P}}$$

Où γ, ζ sont les coefficients qui permettent l'accord avec le débit mesuré par le diaphragme normalisé situé en aval. Dans l'annexe 3 Mission 7 [17] il y a des courbes d'étalonnage représentant $q_v = f(\Delta P)$. Dans ce documents on nous donne aussi la valeur numérique des coefficients γ, ζ .En reprenant les valeurs des différents

points sur cette courbe (par graph-click), et en contraignant l'ordinateur à trouver les coefficients γ, ζ tels qu'ils respectent $q_v = \gamma \times \sqrt{\Delta P - \zeta \times \sqrt{\Delta P}}$, on trouve une incertitude globale sur l'ajout des coefficients γ et ζ :

$$\frac{\delta\alpha}{\alpha} = 0.9\%$$

C'est à dire qu'en partant de leur graphes on ne retrouve pas exactement les coefficients qu'ils ont trouvé eux, à 0.9% près.
On a donc

$$\boxed{\frac{\delta q_{MmRS}}{q_{MmRS}} = \sqrt{(0.5\%)^2 + (0.9\%)^2} = 1.03\%}$$

L'autre terme à ajouter est un terme de vieillissement. En effet les données traitées précédemment sont des données provenant du même diaphragme d'origine depuis 40 ans. Les deux termes γ et ζ sont des ajout empiriques qui correspondent de manière assez précise à la géométrie du diaphragme, mais ils n'ont été déterminés qu'une fois, à la pose du diaphragme en 1970. Le temps peut avoir rongé le diaphragme, ou un dépôt a pu se former sur ce dernier... Alors ces coefficients ne correspondent plus à la nouvelle géométrie du diaphragme et on a une erreur supplémentaire sur le débit du cœur. On a pour cela récupéré les données de débit en début de cycle sur plus de 40 ans, représentant 180 cycles (1970-2012, bien-sûr nous n'avons pas les données inexistante de l'arrêt de 1990 à 1996). Nous recherchons une potentielle modification progressive de la valeur de débit mesurée sur ces années.
Si on regarde l'ensemble des cycles de 1999 à 2012, on obtient ceci :

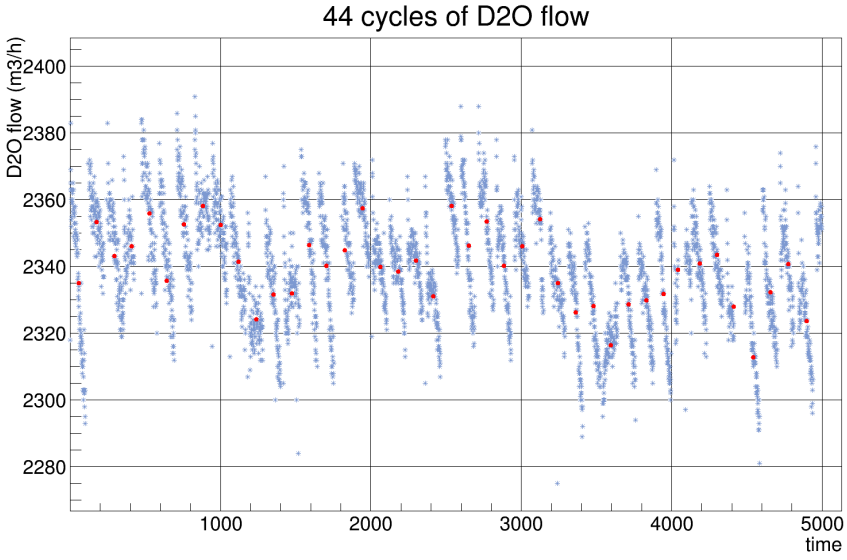


Figure 7.7: Historique du débit cœur de 1999 à 2012

Chaque barre bleue qui semble verticale représente un cycle. Cette pente est un effet réel : la décroissance de débit durant un cycle ($\simeq 2\%$ en moyenne). Chaque point rouge est la moyenne de débit sur le cycle considéré. Sur l'image ci dessous on voit 6 cycles, et on voit mieux la baisse systématique de débit durant chaque cycle.

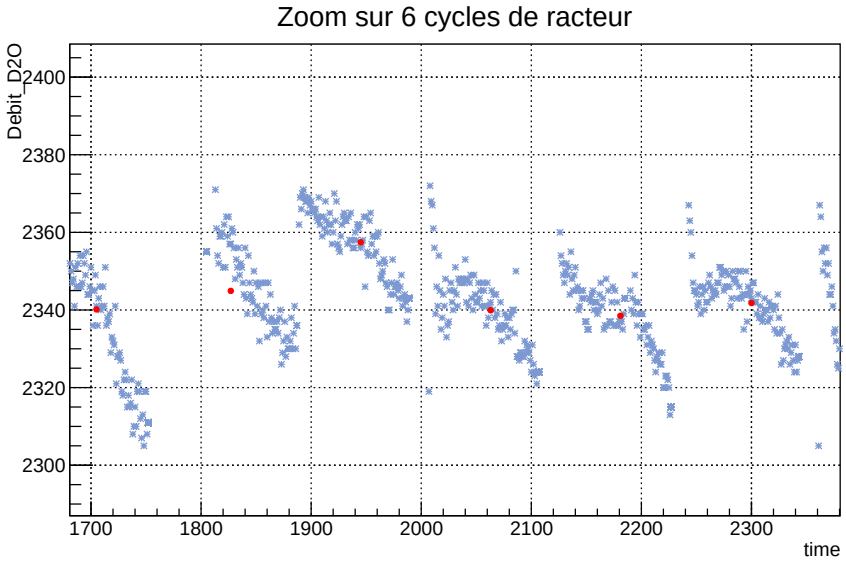


Figure 7.8: Focus sur 6 cycles de marche du réacteur de l'ILL

Ceci serait dû au gonflement des plaques de combustible, ce qui induirait une perte de charge par friction croissante au cours du cycle et donc un débit décroissant. Rien à voir avec l'usure du diaphragme. Mais revenons sur l'ensemble des cycles. On ne peut pas dire à première vue si le débit est constant, augmente ou diminue au cours du temps. Pour cette raison, nous avons testé ces hypothèses :

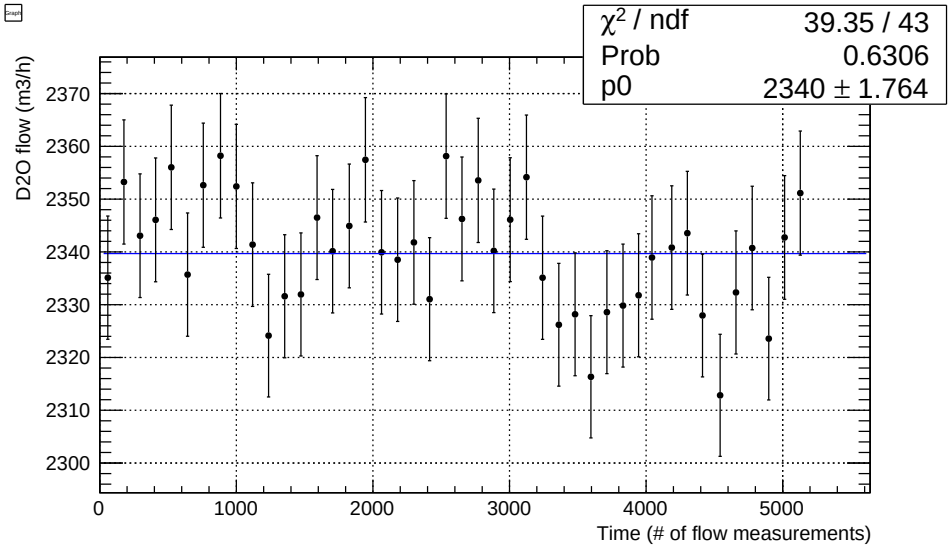


Figure 7.9: Hypothèse d'un débit constant avec le temps (1cycle=1point)

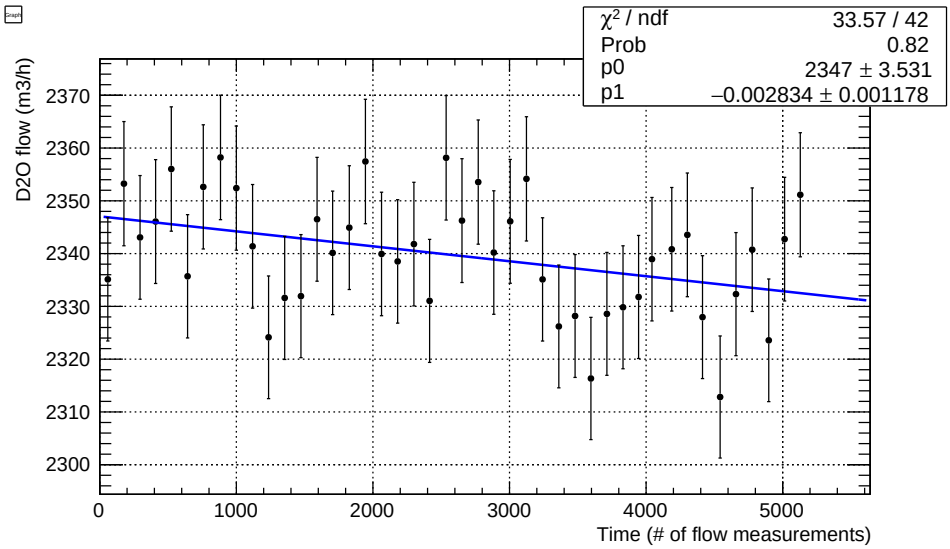


Figure 7.10: Hypothèse d'un polynôme du 1^{er} degré au cours du temps (1cycle=1point)

On remarque que de 1999 à 2012, le débit ne semble pas augmenter car le polynôme de degré 1 décroit. Mais le fit par une valeur constante donne une bonne probabilité et un $\chi^2 \simeq 1$. la probabilité du fit par le polynôme de degré 1 est meilleure mais c'est normal, à chaque degré supplémentaire du polynôme interpolateur, on ajoute un degré de liberté, en s'écartant de la vérité. L'hypothèse qui pour le moment semble le mieux est l'hypothèse d'un débit constant avec le temps.
Rien n'empêche une usure du diaphragme ou même une usure des pompes qui propulsent le fluide dans les tuyauteries, mais on ne le remarque pas sur ces graphes.
De plus, si on regarde le débit de 1971 à 1990, le fit par un polynôme de degré 1 semble dire que le débit augmente, ce qui serait en contradiction avec le fit par un polynôme de degré 1 des années 1999 à 2012, encourageant l'hypothèse constante. Cette question reste ouverte, sachant que le terme correctif pourrait potentiellement être dominant pour l'erreur sur le débit, et donc sur la puissance.

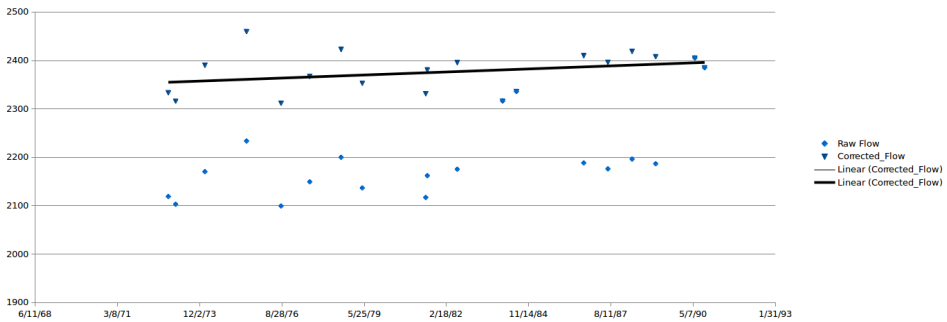


Figure 7.11: Moyenne par cycle (1cycle=1point) de 1971 à 1990

On peut cependant essayer de trouver des corrélations entre les variations locales de débit (j'entends par locale, sur 4 cycles environ) et les variations d'autres grandeurs physique telles que la température du Drac qui influence directement la température d'entrée de cœur en eau lourde, et donc le débit nécessaire afin de rester

loin du seuil d'ébullition en sortie de cœur. Où la saison, car la température extérieure peut affecter la température du Drac... etc.
Sinon, une vérification directe sera peut-être possible en 2019, avec un démontage des circuits du cœur et donc du diaphragme de mesure de débit en sortie de cœur.

Détermination de $\delta(q_{DRG})$, de $\delta(q_{BP})$ et de $\delta(q_{PISC})$

Pour la détermination des incertitudes relatives pour les trois débit restant, on a utilisé des fiches de calibration [13], [14], [15]. Comme pour le diaphragme principal en sortie de cœur, les diaphragmes des petits circuit DRG, BP et PISC sont régulièrement testés dans les circuits pour estimer la déviation à la valeur réelle.
On pose une valeur qui englobe l'erreur relevée dans les 3 fiche de calibrations de ces trois diaphragmes de $\delta q_i = 2m^3.h^{-1}$ (i = DRG,BP,PISC). Pour ce qui est du respect ou non des normes de tuyauterie, on n'a pas d'informations sur le fait que ces diaphragmes soient aux normes ou pas, on va donc prendre 10% comme incertitude sur un potentiel étalonnage par un diaphragme normalisé. Soit $\frac{\delta\alpha_i}{\alpha_i} = 10\%$ (i = DRG,BP,PISC).

Détermination de $\delta(TSPISC - TEPISC)$

Pour l'incertitude sur la variation de température du circuit Piscine, on a utilisé des fiches de calibration [11] & [12]:

$$\delta(TSPISC) = 0.3°C \qquad \& \qquad \delta(TEPISC) = 0.3°C$$

D'où

$$\boxed{\delta(TSPISC - TEPISC) = \sqrt{2} \times 0.3°C = 0.43°C}$$

Détermination de $\delta(TSBP - TEC)$

D'après des fiches de calibration pour la température en sortie de la barre de pilotage [16] :

$$\delta(TSBP) = 0.5°C$$

Détermination de $\frac{\delta(C_p^{D_2O})}{C_p^{D_2O}}$

On trouve dans les tables thermodynamiques des valeurs très précises de $C_p^{D_2O}$, pour prendre large, on choisi

$$\frac{\delta(C_p^{D_2O})}{C_p^{D_2O}} = 0.1\%$$

Ce qui enveloppe les variations de ce terme dans les plages de températures et de pression de notre cas.

Détermination de $\frac{\delta(C_p^{H_2O})}{C_p^{H_2O}}$

On trouve aussi dans les tables thermodynamiques des valeurs très précises de $C_p^{H_2O}$, donc pour prendre large, on choisi pour l'eau légère la même incertitude absolue que pour l'eau lourde :

$$\frac{\delta(C_p^{H_2O})}{C_p^{H_2O}} = 0.1\%$$

On prendra la même incertitude de 0.1% pour les masses volumiques ($\frac{\delta\rho}{\rho} = \mathbf{0.1\%}$)

7.2.1 Détermination de $\frac{\delta P_C}{P_C}$

Rappel :

$$P_C = \frac{1}{3600}\left[q_{D_2O} \times \rho_{D_2O} \times C_p^{D_2O}(TSC - TEC)\right]$$

De plus,

$$q_{D_2O} = \frac{33.3456}{\sqrt{\rho_{D_2O}}} q_{MmRS}\sqrt{1 - \frac{30.136}{q_{MmRS}}}$$

L'expression générale de l'incertitude sur P_C est la suivante

$$\frac{\delta P_C}{P_C} = \sqrt{\left(\frac{\frac{\partial P_C}{\partial q_{D_2O}}\delta q_{D_2O}}{P_C}\right)^2 + \left(\frac{\frac{\partial P_C}{\partial(\Delta T)}\delta \Delta T}{P_C}\right)^2 + \left(\frac{\frac{\partial P_C}{\partial C_p^{D_2O}}\delta C_p^{D_2O}}{P_C}\right)^2 + \left(\frac{\frac{\partial P_C}{\partial \rho_{D_2O}}\delta \rho_{D_2O}}{P_C}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\delta q_{D_2O}}{q_{D_2O}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta T}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\delta C_p^{D_2O}}{C_p^{D_2O}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \rho_{D_2O}}{\rho_{D_2O}}\right)^2}$$

On tire de la partie **7.2** :

$$\frac{\delta C_p^{D_2O}}{C_p^{D_2O}} = \mathbf{0.1\%}$$

$$\frac{\delta \rho_{D_2O}}{\rho_{D_2O}} = \mathbf{0.1\%}$$

$$\frac{\delta \Delta T}{\Delta T} = \frac{\sqrt{(\delta TSC)^2 + (\delta TEC)^2}}{\Delta T} = \frac{0.15°C}{17.85°C} = \mathbf{0.85\ \%}$$

Pour le terme restant :

$$\frac{\delta q_{D_2O}}{q_{D_2O}} = \sqrt{\left(\frac{1}{q_{MmRS}} + \frac{30.136}{2q_{MmRS}^2\left(1 + \frac{30.136}{q_{MmRS}}\right)}\right)^2 \delta q_{MmRS}^2 + \left(\frac{\delta \rho_{D_2O}}{2\rho_{D_2O}}\right)^2}$$

Or on a $\frac{1}{q_{MmRS}} + \frac{30.136}{2q_{MmRS}^2\left(1+\frac{30.136}{q_{MmRS}}\right)} \simeq \frac{1}{q_{MmRS}}$ et $\frac{\delta \rho_{D_2O}}{2\rho_{D_2O}} = 0.05\%$ négligeable, d'où

$$\frac{\delta q_{D_2O}}{q_{D_2O}} \simeq \frac{\delta q_{MmRS}}{q_{MmRS}} = \mathbf{1.03\%}$$

Soit

$$\boxed{\frac{\delta P_C}{P_C} = \sqrt{(0.1\%)^2 + (0.1\%)^2 + (0.85\%)^2 + (1.03\%)^2} + = \mathbf{1.34\%}}$$

7.2.2 Détermination de $\frac{\delta P_{DRG}}{P_{DRG}}$

$$P_{DRG} = \frac{1}{3600}\left[q_{DRG} \times \rho_{D_2O} \times C_p^{D_2O}(TSC - TEC)\right]$$

On a

$$\frac{\delta P_{DRG}}{P_{DRG}} = \sqrt{\left(\frac{\frac{\partial P_{DRG}}{\partial q_{DRG}}\delta q_{DRG}}{P_{DRG}}\right)^2 + \left(\frac{\frac{\partial P_{DRG}}{\partial(\Delta T)}\delta\Delta T}{P_{DRG}}\right)^2 + \left(\frac{\frac{\partial P_{DRG}}{\partial C_p^{D_2O}}\delta C_p^{D_2O}}{P_{DRG}}\right)^2 + \left(\frac{\frac{\partial P_{DRG}}{\partial \rho_{D_2O}}\delta\rho_{D_2O}}{P_{DRG}}\right)^2}$$
$$= \sqrt{\left(\frac{\delta q_{DRG}}{q_{DRG}}\right)^2 + \left(\frac{\delta\Delta T}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\delta C_p^{D_2O}}{C_p^{D_2O}}\right)^2 + \left(\frac{\delta\rho_{D_2O}}{\rho_{D_2O}}\right)^2}$$

Seule différence avec $\frac{\delta P_C}{P_C}$, c'est le terme de débit qui n'est plus mesuré par 5 capteurs de pression différentielle mais un seul, et qui a des erreurs différentes.

$$\frac{\delta q_{DRG}}{q_{DRG}} = \sqrt{\left(\frac{100 \times 2}{22.87}\%\right)^2 + (10\%)^2} = \mathbf{13.3\%}$$

$$\boxed{\frac{\delta P_{DRG}}{P_{DRG}} = \mathbf{13.32\%}}$$

7.2.3 Détermination de $\frac{\delta P_{BP}}{P_{BP}}$

$$P_{BP} = \frac{1}{3600}\left[q_{BP} \times \rho_{D_2O}^{BP} \times C_p^{D_2O}(TSBP - TEC)\right]$$

$$\frac{\delta C_p^{D_2O}}{C_p^{D_2O}} = \mathbf{0.1\%}$$
$$\frac{\delta \rho_{D_2O}}{\rho_{D_2O}} = \mathbf{0.1\%}$$
$$\frac{\delta\Delta T}{\Delta T} = \frac{0.51°C}{10.5°C} = \mathbf{5\%}$$
$$\frac{\delta q_{BP}}{q_{BP}} = \sqrt{\left(\frac{100 \times 2}{65}\%\right)^2 + (10\%)^2} = \mathbf{10.5\%}$$

Soit

$$\boxed{\frac{\delta P_{BP}}{P_{BP}} = \mathbf{11.6\%}}$$

7.2.4 Détermination de $\frac{\delta P_{PISC}}{P_{PISC}}$

$$P_{PISC} = \frac{1}{3600}\left[q_{PISC} \times \rho^{H_2O} \times C_p^{H_2O}(TSPISC - TEPISC)\right]$$

$$\frac{\delta C_p^{H_2O}}{C_p^{H_2O}} = \mathbf{0.1\%}$$
$$\frac{\delta \rho_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} = \mathbf{0.1\%}$$
$$\frac{\delta \Delta T}{\Delta T} = \frac{0.43°C}{5.4°C} = \mathbf{7.8\%}$$
$$\frac{\delta q_{PISC}}{q_{PISC}} = \sqrt{\left(\frac{100 \times 2}{126}\%\right)^2 + (10\%)^2} = \mathbf{10.12\%}$$

Soit

$$\boxed{\frac{\delta P_{PISC}}{P_{PISC}} = \mathbf{12.78\%}}$$

7.2.5 Conclusions

À partir de toutes les valeurs obtenues précédemment, et de la formule de l'erreur sur la puissance, on peut conclure et :

$$\frac{\delta P_{th}}{P_{th}} = \sqrt{(0.96 \times 1.34)^2 + (0.0093 \times 13.32\%)^2 + (0.0164 \times 11.6\%)^2 + (0.014 \times 12.78\%)^2} = \mathbf{1.32\%}$$

L'erreur globale est inférieure à celle sur P_C qui pourtant compte à 96.06%, mais c'est normal, ce n'est pas une somme linéaire, c'est la racine d'une somme quadratique. De plus le terme dominant est pondéré par un facteur inférieur à 1.

En unité physique, on a :

$$\delta P_{th} = 0.735 MW$$

On résume tout cela dans un tableau :

Élément	Contribution (MW)	Contribution (%)	Erreur associée (MW)	Erreur associée (%)
Circuit cœur	53.52	96.034	0.72	1.34
Circuit DRG	0.521	0.934	0.069	13.32
Circuit BP	0.911	1.635	0.106	11.63
Circuit Piscine	0.7824	1.4	0.089	12.78
TOTAL	55.73	100	0.73	1.32

Prenons une marge, et disons pour conclure que :

$$\boxed{\frac{\delta P_{th}}{P_{th}} = \mathbf{1.4\%}}$$

Soit :

$$\boxed{P_{th} = 55.73 \pm 0.78 MW}$$

Il ne faut pas oublier que la contribution du vieillissement n'est pas présente dans cette valeur et qu'elle peut potentiellement être un terme majorant de l'erreur globale. Cette contribution due au vieillissement est à déterminer dans l'avenir.

Mais de toute manière, on peut remarquer que la puissance du réacteur de recherche de l'Institut Laue-Langevin est très bien contrôlée, ceci est dû à la calibration régulière de tout les capteurs, et à une instrumentation de qualité.
On peut trouver en annexe 3 les résultats obtenus avec le codage informatique (Je rappelle que la formule utilisée dans le programme n'est pas tout à fait la même. En effet pour le calcul analytique on a fait l'approximation d'une masse volumique et d'une chaleur spécifique qui ne varient pas avec la température et on a englobé cette variation avec la température dans une erreur de 0.1%, alors que dans le programme, ces deux paramètres sont calculés à chaque itération ainsi que leurs erreurs. Mais on peut voir que l'approximation est bonne car les résultats du codage sont très proches des résultats analytiques !)
On peut remarquer que la quasi-totalité de la puissance du cœur est extraite par le circuit primaire en eau lourde, à 98.6%, le reste est extrait par la piscine, car les pertes sont négligeable, comme nous allons le voir dans la prochaine partie.

7.3 Estimation des pertes d'énergie

La tâche est ici de déterminer des phénomènes physiques qui peuvent déposer leur énergie hors du domaine où cela est mesuré (c'est à dire au delà de la piscine), tels que des réactions (n^0, xn^0) trop proche du bord, de l'émission gamma due à une capture neutron proche du bord, etc... Nous avons pour cela eu recours à une simulation, à l'aide du code MCNP (Monte Carlo N-Particle).
Dans ce code il faut entrer la géométrie et la composition du réacteur de l'ILL, ainsi que certains paramètres initiaux. Les lois physiques, déjà présentes dans l'algorithme, feront le reste du travail (des tables de sections efficaces, de spectres d'énergie dont on prendra une valeur aléatoire à chaque étape du calcul... etc).
Ce code envoie un neutron sur un noyau de ^{235}U et regarde tout les phénomènes physiques induit par ce dernier. Quand plus rien ne se passe, il renvoie un autre neutron... etc. Ainsi, nous avons fait une simulation où plus de 6M de neutrons ont été envoyés fissionner un noyau de ^{235}U, ce qui donne une bonne statistique sur les phénomènes engendrés par ces neutrons créés par la fission de ^{235}U.
Les résultats de la simulation sont les suivants :
Le neutron envoyé fissionne ^{235}U et d'autres neutrons sont créés. Parmi ces neutrons créés, 43% retournent fissionner ^{235}U et ≃57% vont générés d'autres phénomènes physiques. Ces 57% vont déposer leur énergie par bremsstrahlung en engendrant quelques photons peu énergétiques (0.083 MeV) qui seront vite atténués dans l'eau. Mais, une fois leur énergie déposée, ces neutrons vont se faire capturés, engendrant une cascade de réactions et créant des γ de 1.45 MeV environ. D'autres γ peuvent aussi être créés par fluorescence (excitation électronique du milieu) ou par annihilation proton.
Ainsi, par neutron initial de 2.02 MeV envoyé, on génère environ 2.4 neutrons par fission de ^{235}U dont 1 retourne fissionner l'Uranium, et les 1.4 autres se thermalisent par bremsstrahlung et se font capturer pour créer en moyenne 5 à 6 photons.
Seulement 0.005% des neutrons s'échappent de la piscine. Pour ce qui est des photons créés, seulement 0.1% s'échappent, ce qui est négligeable.

Il semble que les pertes d'énergie soient négligeables. Le calorimètre formé par l'ensemble cuve à eau lourde et piscine est de grande qualité.

La conclusion est que la puissance calculée précédemment est la bonne, c'est bien la puissance totale car les pertes sont quasi-inexistantes. On va pouvoir prendre cette valeur de puissance pour déterminer le flux d'antineutrinos, en passant tout d'abord par l'énergie moyenne par fission.

8 Détermination du flux d'antineutrinos du cœur

Nous avons maintenant la puissance, soit l'énergie par unité de temps. En divisant ce terme par l'énergie par fission, nous aurons le nombre de fission par unité de temps. Puis, si on connaît le nombre d'antineutrinos émis par fission, on connaîtra le flux d'antineutrinos, c'est à dire le nombre de neutrinos émis par unité de temps ! L'énergie moyenne délivrée par fission est de la forme suivante :

$$E_f = E_{tot} - \left(< E_{\bar{\nu}} > + \Delta E_{\beta\gamma}\right) + E_{nc}$$

Où :

- E_{tot} = Énergie cinétique des produits de fission.
- $< E_{\bar{\nu}} >$ = Énergie portée par les antineutrinos (on la soustrait elle n'est pas déposée).
- $\Delta E_{\beta\gamma}$ = Énergie portée par les particules β
- E_{nc} = Énergie délivrée par les captures neutrons.

Cette énergie délivrée par fission sert dans l'estimation du flux de neutrinos :

$$S_{\bar{\nu}} = \frac{P_{th}}{\sum_i \left(\frac{f_i}{F}\right) E_f(i)} \sum_i \left(\frac{f_i}{F}\right) S_i(E_{\bar{\nu}})$$

Où :

- P_{th} = Puissance thermique de la source (eV.s^{-1}).
- $\frac{f_i}{F}$ = Fraction de chaque isotope dans le nombre total de fission.
- $E_f(i)$ = Énergie délivrée par fission par isotope i (eV/fission).
- $S_i(E_i)$ = Nombre moyen de neutrinos émis par l'isotope i.

On peut, pour le contexte de ce stage, considérer une composition pure en ^{235}U (ce qui n'est pas insensé car plus de 93% de ^{235}U constitue le cœur du réacteur, le reste étant de l'Aluminium, qui ne fait pas de fission, et une part infime de ^{238}U et de ^{241}Pu en fin de cycle) La précédente expression se simplifie alors grandement pour devenir :

$$S_{\bar{\nu}} = \frac{P_{th}}{< E_f >} N_{\bar{\nu}/f}$$

Où $\frac{P_{th}}{<E_f>} = N_{f/s}$ est le nombre de fissions par seconde dans un cœur constitué uniquement d'Uranium 235. On estime le nombre d'antineutrinos émis par fission de ^{235}U à $N_{\bar{\nu}/f} = 2$ [19].
Pour la détermination de l'énergie par fission, on a eut recours au même code MCNP qui donne l'énergie déposée, et comme on a vu que les pertes sont négligeables, l'énergie déposée correspond à l'énergie totale par fission. Nous avons comparé le résultat de la simulation MCNP à des informations provenant de la littérature [18].
Dans l'énergie moyenne par fission, en négligeant le terme $\left(< E_{\bar{\nu}} > + \Delta E_{\beta\gamma}\right)$ ($< E_\nu >$ n'est pas déposée et $\Delta E_{\beta\gamma}$ est très faible), on obtient :

$$N_{f/s} = \frac{P_{th}}{E_{tot} + E_{nc}}$$

Notre simulation nous donne E_{nc} = 8.44 MeV, (contre E_{nc} = 8.57 MeV dans l'article [18], la légère différence est sûrement due aux 0.1% de perte totale), nous sommes en bon accord avec l'article, dont on va prendre les données pour estimer l'énergie moyenne par fission.

Soit E_{nc} = 8.57 ± 0.22 MeV et E_{tot} = 193.79 ± 0.14 MeV, ce qui donne

$$\boxed{< E_f >= 202.36 \pm 0.26 MeV}$$

. Pour ce qui est de la puissance, il y a ici une petite subtilité, la puissance totale P_{th} calculée précédemment comprend la puissance délivrée par les pompes pour faire circuler les fluides dans les tuyauteries, de l'ordre de $P_{Pompe} \simeq$ 600 kW, et les pompes ne créent pas de neutrinos par réaction nucléaire... Cette énergie donnée au fluide par les pompes est déposée par friction dans le cœur et dans les tuyauterie pendant un tour de circuit. Et la plupart de cette énergie est déposée dans le cœur (présence des 280 plaques de combustible et de grilles en entrée et en sortie), donc notre bilan thermique entre l'entrée et la sortie du cœur prend en compte la quasi-totalité de cette énergie déposée due aux pompes, ce qui permet de simplement la soustraire à la puissance totale. On ne prend que la puissance utile au réactions nucléaires en gardant $\frac{\delta P_{th}}{P_{th}} = \mathbf{1.4\%}$.

$$P_{th} = (55.13 \pm 0.78) MW$$

Soit en eV :

$$P_{th} = (8.83 \pm 0.125) \times 10^{26} eV.s^{-1}$$

Finalement, en divisant par l'énergie moyenne par fission, on obtient :

$$N_{f/s} = \frac{8.83 \times 10^{26}}{202.36 \times 10^6} = 4.36 \times 10^{18} fis.s^{-1}$$

(N.B : On compte environ 2.43 neutrons par fission, soit un flux à la source pour le réacteur de recherche de l'ILL d'environ $1.06 \times 10^{19} n^0.s^{-1}$)
On doit encore déterminer l'incertitude sur ce nombre de fission par seconde :

$$\begin{aligned}
\frac{\delta N_{f/s}}{N_{f/s}} &= \frac{1}{N_{f/s}} \times \sqrt{\left(\frac{\partial N_{f/s}}{\partial P_{th}}\right)^2 \delta P_{th}^2 + \left(\frac{\partial N_{f/s}}{\partial < E_f >}\right)^2 \delta < E_f >^2} \\
&= \frac{1}{N_{f/s}} \times \sqrt{\left(\frac{\delta P_{th}}{< E_f >}\right)^2 + \left(\frac{P_{th} \delta < E_f >}{< E_f >^2}\right)^2} \\
&= \mathbf{1.42\%}
\end{aligned}$$

L'erreur sur le nombre de fissions par seconde est largement dominée par l'erreur sur la puissance thermique, d'où l'importance d'une grande précision sur cette dernière.
On a donc :

$$\boxed{N_{f/s} = (4.36 \pm 0.062) \times 10^{18} fis.s^{-1}}$$

Comme dit précédemment, une étude faite par (entre autres) des physiciens du CEA/IRFU/DPhN de Saclay (dont mon maître de stage) estime (en moyenne) à 2 le nombre d'antineutrinos par fission, avec une erreur de 2% sur cette valeur ($N_{\bar{\nu}/f} = (2 \pm 0.04) \bar{\nu}/f$). On a

$$\begin{aligned}
S_{\bar{\nu}} &= N_{f/s} \times N_{\bar{\nu}/f} \\
&= 8.72 \times 10^{18} \bar{\nu}/s
\end{aligned}$$

ce qui donne comme incertitude :

$$\begin{aligned}\frac{\delta S_{\bar{\nu}}}{S_{\bar{\nu}}} &= \frac{1}{S_{\bar{\nu}}} \times \sqrt{\left(\frac{\partial S_{\bar{\nu}}}{\partial N_{f/s}}\right)^2 \delta N_{f/s}^2 + \left(\frac{\partial S_{\bar{\nu}}}{\partial N_{\bar{\nu}/s}}\right)^2 \delta N_{\bar{\nu}/f}^2} \\ &= \frac{1}{S_{\bar{\nu}}} \times \sqrt{\left(N_{\bar{\nu}/f} \times \delta N_{f/s}\right)^2 + \left(N_{f/s} \times \delta N_{\bar{\nu}/f}\right)^2} \\ &= \mathbf{2.45\%}\end{aligned}$$

On obtient finalement un flux d'antineutrinos pour le réacteur de recherche de l'Institut Laue-Langevin de :

$$\boxed{S_\nu = (8.72 \pm 0.21) \times 10^{18} \bar{\nu}/s}$$

Ce résultat sera à comparer avec une mesure précise du nombre de neutrinos détecté par STEREO, en prenant compte de l'angle solide et de toutes le difficultés de la manipulation. C'est ici, à mon plus grand regret, que ma petite contribution s'arrête, à cause du temps et de mon niveau encore insuffisant pour aller plus loin. Mais j'ai tout de même grandement apprécié cette contribution, je voudrais donc continuer par des remerciements mille fois mérités.

Remerciements

Ce stage a été l'occasion pour moi de me rendre à l'évidence : J'aime le monde de la recherche, que j'ai totalement découvert durant cette période. Mais j'ai beaucoup à apprendre... D'après moi, le fait que, durant ce stage, j'ai souvent eu l'impression de ne rien savoir est plutôt une bonne chose, j'ai davantage prit conscience de la vastité de la physique, et de ce qu'il me reste à apprendre. Je suis néophyte et je ne demande qu'à apprendre. Cette expérience m'a grandement motivé.

Et elle n'aurait pas été possible sans David LHUILLIER, mon tuteur, qui a eu la patience et la gentillesse de céder son temps à m'expliquer plein de choses. C'est quelqu'un d'une grande culture qu'on a pas envie de décevoir. Mille mercis.

je tiens aussi à remercier l'équipe STEREO, notamment Adrien BLANCHET et Alain LETOURNEAU qui étaient toujours prêt à m'expliquer un tas de choses. Je remercie évidemment tout les autres membres, thésards, stagiaire ou permanents de l'équipe qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre.

Je remercie les experts de l'Institut Laue-Langevin de Grenoble qui ont su prendre le temps d'aller dans les archives pour me transmettre les données dont j'avais besoin pour divers aspect de ces travaux.

Et je remercie le personnel de l'IRFU/DPhN pour m'avoir aidé dans les différentes démarches administratives qui sont parfois d'une complexité supérieure à la physique.

J'ai appris énormément de choses, merci pour tout ces conseils dans les méthodes de recherche d'informations et pour toute la physique transmise. Cela a été un véritable plaisir.

Bibliographie

[1] R. SCHRÖETER : *"Méthode de reconstruction du spectre d'énergie des neutrinos pour l'expérience K2K"*, Travail de diplôme, Université de Genève, Section de Physique (2004)

[2] F. REINES, C.L. COWAN : Physical Review 90, (1953) 492

[3] T. LASERRE : *"Rencontre du quatrième type"*, Colloque de l'Orme, Dsm-Irfu-Spp, (2015)

[4] M. PEQUIGNOT : *"Les expériences NUCIFER et STEREO, étude des antineutrinos de réacteurs à courte distance"*, Thèse, IRFU/SPhN (2015)

[5] SOCIETE CHIMIQUE DE FRANCE : *"http://www.societechimiquedefrance.fr/eau-lourde.html"*

[6] EDUSCOL : *"http://eduscol.education.fr"*, organes déprimogenes.pdf

[7] Technique de l'ingénieur : *"http://www.techniques-ingenieur.fr "*

[8] J.M. ASTUC : *"Calcul du débit massique principal eau lourde et calcul du bilan thermique"*, Fiche technique n°149, Institut Laue Langevin, Division Réacteur (1994)

[9] M. BERTOLI : *"Fiche de test 2/2 indice A des mesures 411MT02 A à E"*, Données TCMS2, Maintenance régulière, N° de procédure 05-549 ind L (04/2017)

[10] M. BERTOLI ; M. LOIODICE : *"Fiches de mesures"*, Données TCMS2+TCMS1, Maintenance régulière, N° de procédure 05-529 ind E (27/08/2013;26/05/2015)

[11] M. BERTOLI ; M. BLOT : *"Fiche de test 2/2 indice A de la mesure 451MT11"*, Données TCMS2+TCMS1, Maintenance régulière, N° de procédure 05-549 ind L (26/01/2016)

[12] M. BERTOLI ; M. BLOT : *"Fiche de test 2/2 indice A de la mesure 451MT10"*, Données TCMS2+TCMS1, Maintenance régulière, N° de procédure 05-549 ind L (26/01/2016)

[13] M. BERTOLI ; M. VIAL : *"Fiche de test 2/2 indice B de la mesure 421MD02"*, Données TCMS2+TCMS1, Maintenance régulière, N° de procédure 05-527 ind Y (04/08/2016)

[14] M. ZORATTI ; M. LEMOINE : *"Fiche de test 2/2 indice C de la mesure 438MD02"*, Données TCMS2+TCMS1, Maintenance régulière, N° de procédure 05-527 ind AA (12/06/2017)

[15] M. NOBLE ; M. PUYDRENIER : *"Fiche de test 2/2 indice B de la mesure 451MD10"*, Données TCMS2+TCMS1, Maintenance régulière, N° de procédure 05-527 EP ind W (11/05/2016)

[16] M. BERTOLI ; M. RUGGNER : *"Fiche de test 2/2 indice C de la mesure 421MT01"*, Données TCMS2+TCMS1, Maintenance régulière, N° de procédure 05-549 ind L (04/03/2016)

[17] G. MULLER, K. NOWAK : *"Étalonnage du diaphragme de mesure du réacteur à haut flux Grenoble"*,Annexe 3 à la lettre DRe/mc-90/074, Rapport n° 44.01.10 (30/01/1990)

[18] X. B. Ma, W. L. Zhong, L. Z. Wang, Y. X. Chen and J. Cao : *"Improved calculation of the energy release in neutron-induced fission"*, Physical Review C88 (12/07/2013)

[19] D. Lhuillier, Th. A. Mueller, M. Fallot, A. Letourneau, S. Cormon, M. Fechner, L. Giot, T. Lasserre, J. Martino, G. Mention, A. Porta, and F. Yermia : *"Improved predictions of reactor antineutrino spectra"*, Physical Review C83 (23/05/2011)

Table des figures

1.1 Spectre en énergie des particules α . . . 1
1.2 Spectre en énergie des particules β . . . 2
1.3 Modèles d'oscillation à 3ν et à 4ν . . . 4
3.1 Emplacement du détecteur . . . 7
3.2 Vue en coupe du détecteur STEREO . . . 8
3.3 Fission de ^{235}U . . . 9
3.4 Réactions nucléaires dans le cœur . . . 10
3.5 Illustration des événements Prompt-Delayed . . . 11
4.1 Schéma du bloc pile . . . 12
4.2 Schéma de la partie Haute Pression (en jaune) . . . 13
4.3 Cote de la barre de pilotage au cours du temps . . . 14
4.4 Schéma de la partie Basse Pression (en jaune) . . . 15
5.1 Représentation schématique de l'effet Venturi . . . 17
5.2 Représentation schématique de la vena contracta . . . 18
5.3 Circuit 1:1 d'étalonnage du diaphragme de mesure de débit D_2O sortie cœur . . . 19
6.1 Graphe obtenu avec la formule préconisée . . . 23
6.2 Différence absolue entre la puissance de notre expression et la puissance donnée par l'ILL . . . 23
7.1 Écart de température entre capteurs en sortie de cœur . . . 24
7.2 Écart de température entre capteurs en entrée de cœur . . . 25
7.3 Écart de débit D_2O entre capteurs en sortie de cœur . . . 26
7.4 Incertitude relative TSC par an . . . 28
7.5 Incertitude relative TEC par an . . . 29
7.6 Incertitude relative $\delta_{calib}(q_{MmRS})$ par an . . . 30
7.7 Historique du débit cœur de 1999 à 2012 . . . 31
7.8 Focus sur 6 cycles de marche du réacteur de l'ILL . . . 32
7.9 Hypothèse d'un débit constant avec le temps (1cycle=1point) . . . 32
7.10 Hypothèse d'un polynôme du 1^{er} degré au cours du temps (1cycle=1point) . . . 33
7.11 Moyenne par cycle (1cycle=1point) de 1971 à 1990 . . . 33
10.1 (Tableau) Valeurs température sortie de cœur relevées dans les fiches de calibration . . . 47
10.2 (Tableau) Valeurs température entrée de cœur relevées dans les fiches de calibration . . . 49
10.3 (Tableau) Valeurs de débit en sortie de cœur relevées dans les fiches de calibration . . . 51

9 Annexe 1 : Explicitation des termes de la puissance

Nous allons décrire tout les termes participant aux quatre contributions de la Puissance Thermique totale.

Les capacités calorifiques :
- $C_p^{D_2O}$ = Capacité calorifique de l'eau lourde ($J.g^{-1}.K^{-1}$)
- $C_p^{H_2O}$ = Capacité calorifique de l'eau légère ($J.g^{-1}.K^{-1}$)

Les températures :
- TEC = Température Entrée Cœur

$$TEC = \frac{A009 + A010 + A011 + A012 + A013}{5}$$

- TSC = Température Sortie Cœur

$$TSC = \frac{A004 + A005 + A006 + A007 + A008}{5}$$

- TSBP = A069 = Température Sortie Barre Pilotage
- TEPISC = A113 = Température Entrée Piscine = Température Sortie Échangeur B23
- TSPISC = A112 = Température Sortie Piscine = Température Entrée Échangeur B23

Les masses volumiques :
- $\rho_{D_2O}^S = a_1\,TSC + b_1$ = Masse volumique D_2O en sortie de cœur ($T.m^{-3}$)

$$\begin{aligned} TSC < 20°C &\iff a_1 = 0 \\ &\quad\; b_1 = 1.105 \\ 20°C < TSC < 40°C &\iff a_1 = -2.45 \times 10^{-4} \\ &\quad\; b_1 = 1.1099 \\ TSC > 40°C &\iff a_1 = -3.6 \times 10^{-4} \\ &\quad\; b_1 = 1.1144 \end{aligned}$$

- $\rho_{D_2O}^E = a_2\,TSC + b_2$ = Masse volumique D_2O en entrée de cœur ($T.m^{-3}$)

$$\begin{aligned} TEC < 20°C &\iff a_2 = 0 \\ &\quad\; b_2 = 1.105 \\ 20°C < TEC < 40°C &\iff a_2 = -2.45 \times 10^{-4} \\ &\quad\; b_2 = 1.1099 \\ TEC > 40°C &\iff a_2 = -3.6 \times 10^{-4} \\ &\quad\; b_2 = 1.1144 \end{aligned}$$

- $\rho_{D_2O}^{BP} = a_3\,TSC + b_3$ = Masse volumique D_2O en sortie Barre de Pilotage ($T.m^{-3}$)

$$\begin{aligned} TSBP < 20°C &\iff a_3 = 0 \\ &\quad\ b_3 = 1.105 \\ 20°C < TSBP < 40°C &\iff a_3 = -2.45 \times 10^{-4} \\ &\quad\ b_3 = 1.1099 \\ TSBP > 40°C &\iff a_3 = -3.6 \times 10^{-4} \\ &\quad\ b_3 = 1.1144 \end{aligned}$$

- $\rho_{H_2O}^{PISC} = 1.0005 - 3.89286 \times 10^{-5} TSPISC - 4.17857 \times 10^{-6} TSPISC^2$ = Masse volumique H_2O Sortie Piscine $(T.m^{-3})$

Le fait de ne prendre qu'une masse volumique à la place d'une masse volumique en entrée et une masse volumique en sortie (cf Partie sur le calcul d'erreur) est une approximation pour faciliter le calcul de l'erreur. Cette approximation n'a pas été faite dans le programme qui a donné la valeur de 55.74MW.

Les débits :
- q_{DRG} = Débit D_2O dans le circuit DRG $(m^3.h^{-1})$
- q_{Bp} = Débit D_2O dans le circuit Barre de Pilotage $(m^3.h^{-1})$
- q_{PISC} = Débit H_2O dans le circuit Piscine $(m^3.h^{-1})$
- q_{D_2O} = Débit réel D_2O indiqué par les cinq capteurs de ΔP au TCMS en sortie de cœur et corrigé par calibration $(m^3.h^{-1})$

$$q_{D_2O} = \frac{33.3456}{\sqrt{\rho_{D_2O}}} q_{MmRS} \sqrt{1 - \frac{30.136}{q_{MmRS}}}$$

Où q_{MmRS} est le débit donné par l'électronique TCMS, voir la fiche technique n°149 [8] et l'annexe 3 [17] pour avoir des précisions sur ce débit, qui était utilisé dans l'ancienne formule de Puissance.

$$q_{MmRS} = \frac{A014 + A015 + A016 + A024 + A025}{5}$$

Ci-dessous un tableau qui résume les valeurs de différentes grandeurs utiles dans le calcul de la puissance thermique totale :

Name	Element	C_p (J.g.°C^{-1})	ρ (T.m^3)	q ($m^3.h^{-1}$)	Δ T (°C)
P_C	Heavy Water (principal output)	4.2105	1.105	2350	17.85
P_{DRG}	Heavy water (DRG output)	4.2105	1.105	22.87	17.85
P_{BP}	Heavy Water (BP output)	4.2105	1.105	65	10.5
P_{Pool}	Water (Pool)	4.186	1.0005	126	5.54

10 Annexe 2 : Données de calibration des capteurs de température en entrée et sortie de cœur

Incertitude relative de température en sortie de cœur

Ci dessous un tableau résumant les données présentes dans les fiches pour les 5 capteurs de température en sortie de cœur, car, rappelons le

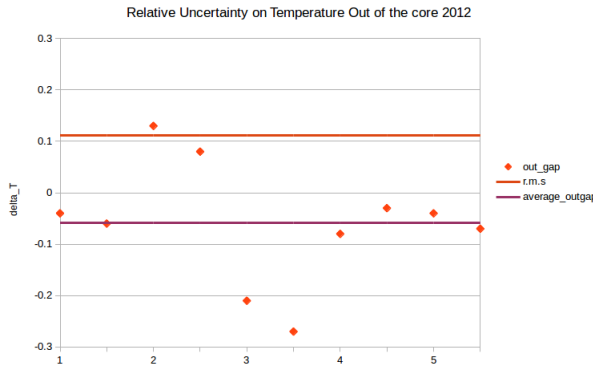
$$TSC = \frac{A004 + A005 + A006 + A007 + A008}{5}$$

où A004 à A008 sont les équivalents des capteurs 1 à 5 du tableau ci-dessous. Le signal venant de ces capteurs de températures n'a été envoyé qu'à TCMS2, les données de TCMS1 ne sont pas présentes dans ces fiches.

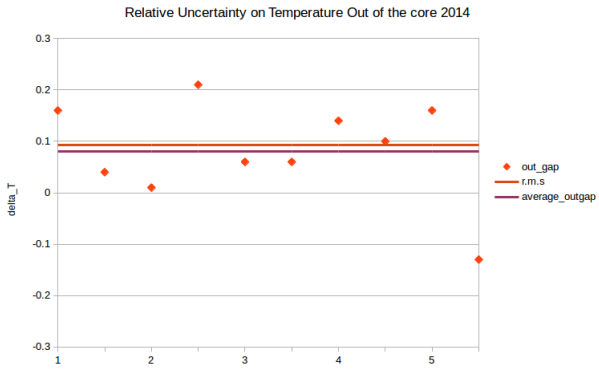
TCMS2	Capteur	À Obtenir	TSC	Écart	Écart moyen	RMS
2016	1	20	20.12	-0.12	0.059	0.106
		40	39.97	0.03		
	2	20	19.74	0.26		
		40	39.92	0.08		
	3	20	19.94	0.06		
		40	39.89	0.11		
	4	20	20.03	-0.03		
		40	39.81	0.19		
	5	20	19.94	0.06		
		40	40.05	-0.05		
2014	1	20	19.84	0.16	0.081	0.092
		40	39.96	0.04		
	2	20	19.99	0.01		
		40	39.79	0.21		
	3	20	19.94	0.06		
		40	39.94	0.06		
	4	20	19.86	0.14		
		40	39.9	0.1		
	5	20	19.84	0.16		
		40	40.13	-0.13		
2012	1	20	20.04	-0.04	-0.059	0.112
		40	40.06	-0.06		
	2	20	19.87	0.13		
		40	39.92	0.08		
	3	20	20.21	-0.21		
		40	40.27	-0.27		
	4	20	20.08	-0.08		
		40	40.03	-0.03		
	5	20	20.04	-0.04		
		40	40.07	-0.07		

Figure 10.1: (Tableau) Valeurs température sortie de cœur relevées dans les fiches de calibration

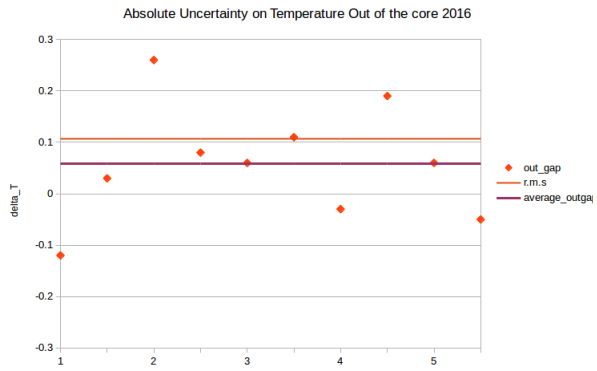
Ces données sont résumées dans ces graphes :



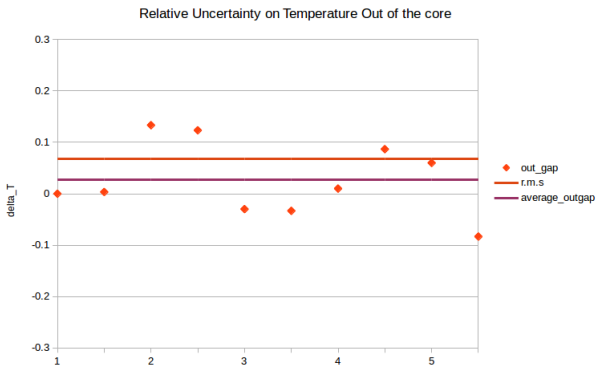
Calibration en 2012



Calibration en 2014



Calibration en 2016



Moyenne 3 années

Faisons de même pour la température en entrée de cœur.

Incertitude relative de température en entrée de cœur

Ci dessous un tableau résumant les données présentes dans les fiches [9] pour les 5 capteurs de température en entrée de cœur, car, rappelons le

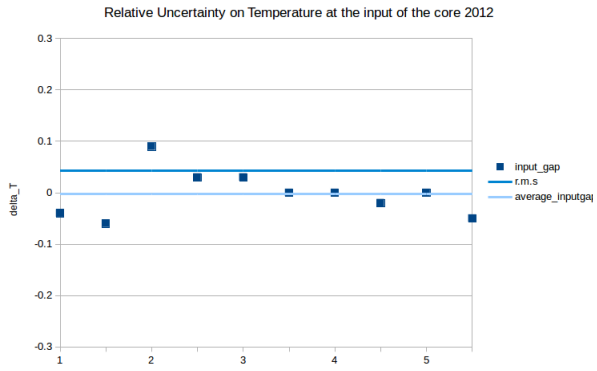
$$TEC = \frac{A009 + A010 + A011 + A012 + A013}{5}$$

où A009 à A013 sont les équivalents des capteurs 1 à 5 du tableau ci-dessous. Comme pour $\delta(TSC)$, le signal des capteurs n'a été transmis qu'à TCMS2.

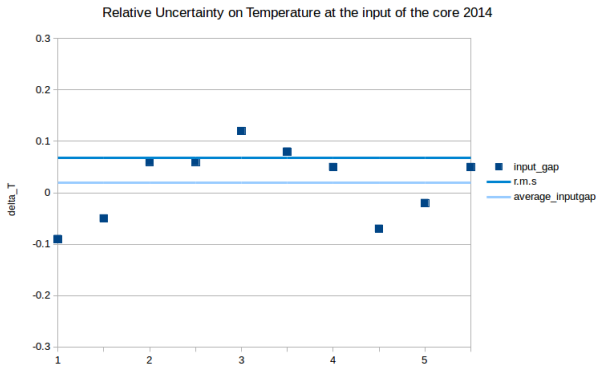
TCMS2	Capteur	À Obtenir	TEC	Écart	Écart moyen	RMS
2016	1	20	20.07	-0.07	0.048	0.073
		40	39.98	0.02		
	2	20	19.89	0.11		
		40	39.93	0.07		
	3	20	19.88	0.12		
		40	39.82	0.18		
	4	20	19.99	0.01		
		40	39.98	0.02		
	5	20	19.93	0.07		
		40	40.05	-0.05		
2014	1	20	20.09	-0.09	0.019	0.067
		40	40.05	-0.05		
	2	20	19.94	0.06		
		40	39.94	0.06		
	3	20	19.88	0.12		
		40	39.92	0.08		
	4	20	19.95	0.05		
		40	40.07	-0.07		
	5	20	20.02	-0.02		
		40	39.95	0.05		
2012	1	20	20.04	-0.04	-0.002	0.042
		40	40.06	-0.06		
	2	20	19.91	0.09		
		40	39.97	0.03		
	3	20	19.97	0.03		
		40	40	0		
	4	20	20	0		
		40	40.02	-0.02		
	5	20	20	0		
		40	40.05	-0.05		

Figure 10.2: (Tableau) Valeurs température entrée de cœur relevées dans les fiches de calibration

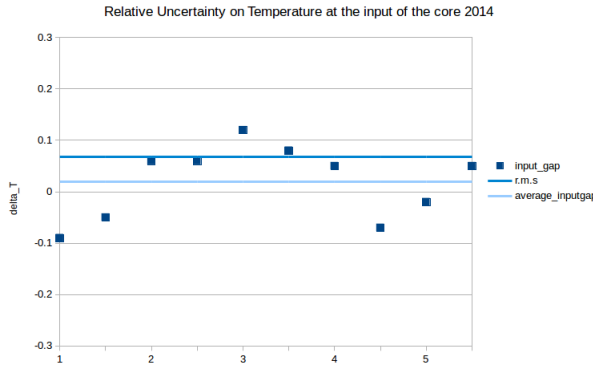
Ces données sont résumées dans ces graphes :



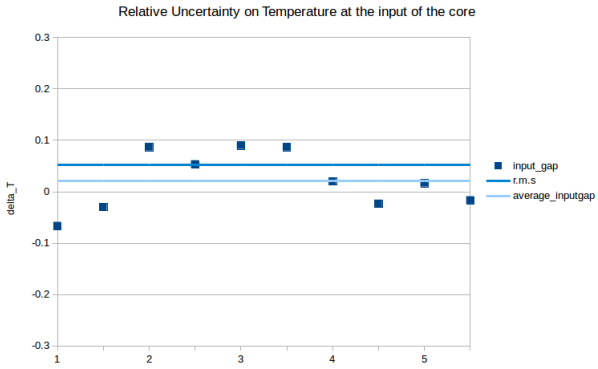
Calibration TEC en 2012



Calibration TEC en 2014



Calibration TEC en 2016



Moyenne 3 années

Incertitude relative de débit D_2O en sortie de cœur

A014 à A025 sont les valeurs renvoyées par TCMS d'après le signal des capteurs de pression différentielle. Dans le calcul de la puissance, on utilise :

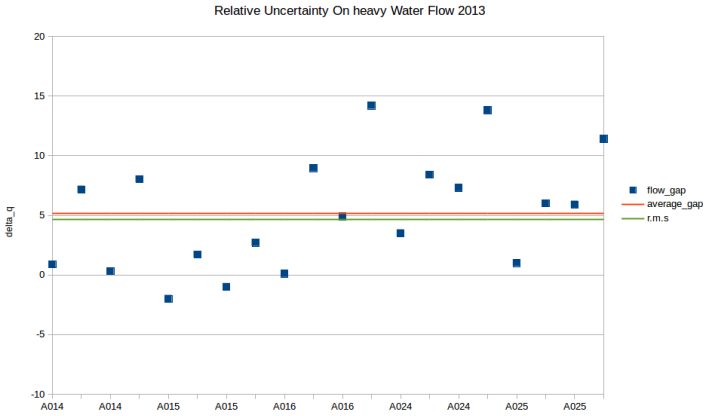
$$MmRS = \frac{A014 + A015 + A016 + A024 + A025}{5}$$

Ci-dessous les données de calibration de ces 5 capteurs.

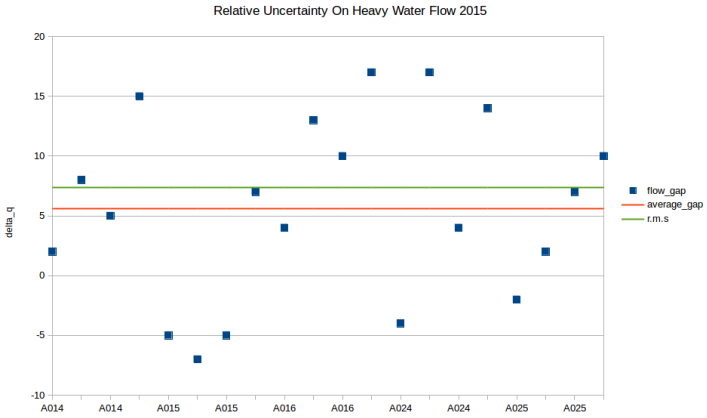
	Électronique	Capteur	À Obtenir	q_MmRS	Écart	Écart moyen	RMS
2015	TCMS1	A014	2201	2199	2	5.6	7.371567
			2542	2534	8		
		A015	2201	2206	-5		
			2542	2549	-7		
		A016	2201	2197	4		
			2542	2529	13		
		A024	2201	2197	4		
			2542	2528	14		
		A025	2201	2203	-2		
			2542	2540	2		
	TCMS2	A014	2201	2196	5		
			2542	2527	15		
		A015	2201	2206	-5		
			2542	2535	7		
		A016	2201	2191	10		
			2542	2525	17		
		A024	2201	2205	-4		
			2542	2525	17		
		A025	2201	2194	7		
			2542	2532	10		
2013	TCMS1	A014	2201	2200.12	0.88	5.1615	4.6533131
			2542	2534.84	7.16		
		A015	2201	2203	-2		
			2542	2540.3	1.7		
		A016	2201	2200.9	0.1		
			2542	2533.04	8.96		
		A024	2201	2197.5	3.5		
			2542	2533.6	8.4		
		A025	2201	2200	1		
			2542	2536	6		
	TCMS2	A014	2201	2200.69	0.31		
			2542	2533.98	8.02		
		A015	2201	2202	-1		
			2542	2539.3	2.7		
		A016	2201	2196.1	4.9		
			2542	2527.8	14.2		
		A024	2201	2193.7	7.3		
			2542	2528.2	13.8		
		A025	2201	2195.1	5.9		
			2542	2530.6	11.4		

Figure 10.3: (Tableau) Valeurs de débit en sortie de cœur relevées dans les fiches de calibration

Ces données sont résumées sur les graphes qui suivent :

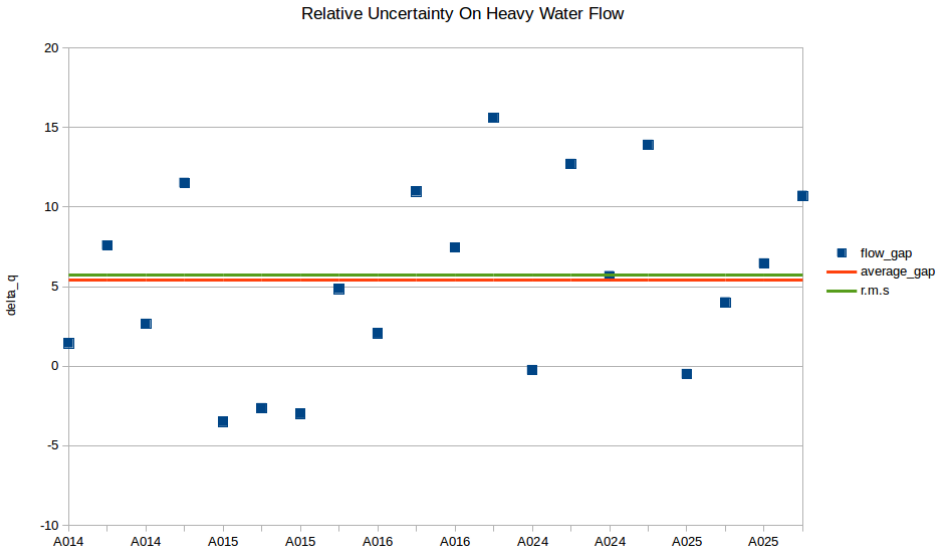


Incertitude absolue débit en 2013



Incertitude absolue débit en 2015

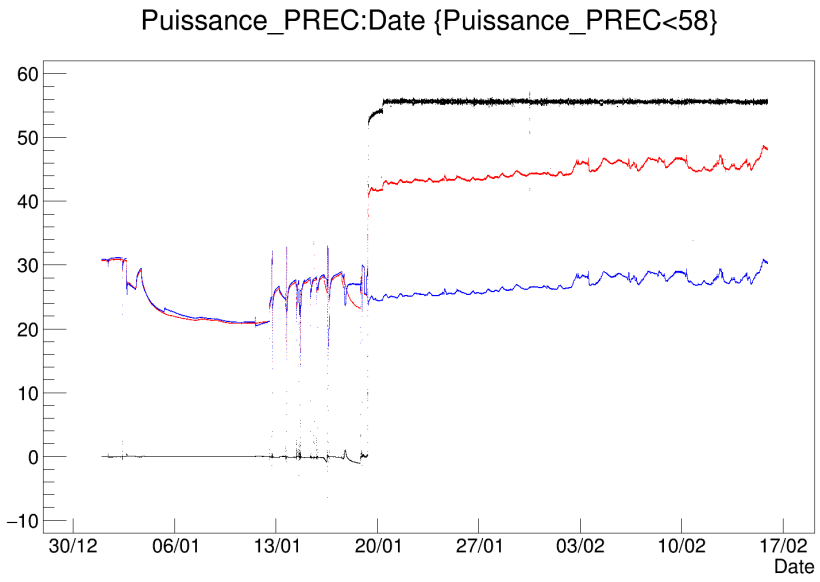
On retrouve sur ce dernier graphe la même erreur de 5 $m^3.h^{-1}$.
En moyennant chaque point sur les deux années :



Incertitude débit moyenne par capteur

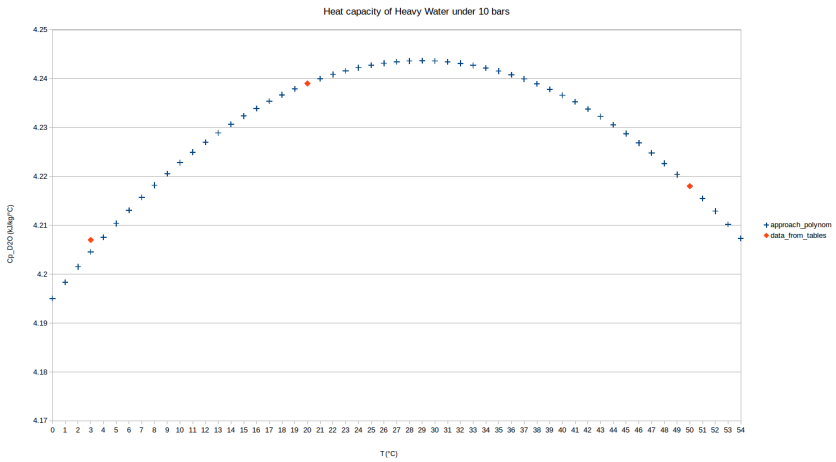
11 Annexe 3 : Divers graphes

On voit sur celui-ci la puissance totale en noir, TEC en bleu et TSC en rouge, on remarque la constance de la différence de température et donc de la puissance.



Puissance, TEC et TSC sur le cycle de début 2017

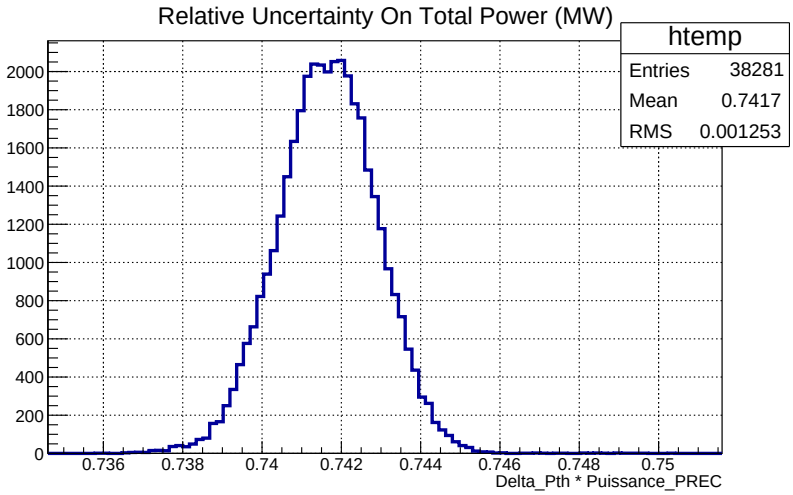
Sur le graphe suivant qui représente l'évolution de la capacité calorifique de l'eau lourde, on voit en rouge les point tirés de la littérature, et en bleu des points appartenant au polynôme d'interpolation qui a servi dans le programme informatique pour plus de précision :



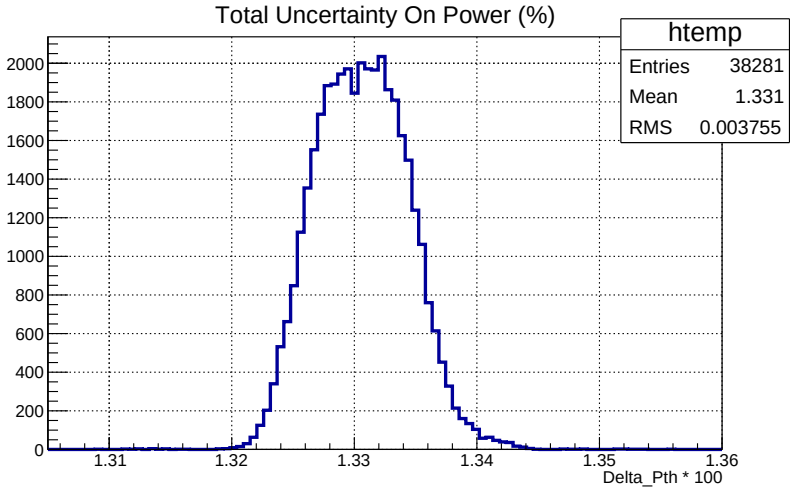
$$C_p^{D_2O} = f(T)$$

Sur les deux graphes suivant, les résultats par codage des erreurs relatives et absolues sur la puissance. On

peut remarquer que l'approximation faite pour le calcul analytique est bonne, les différences entre résultats informatiques et analytiques sont faibles.



Incertitude totale sur la Puissance Thermique en MW



Incertitude totale sur la Puissance Thermique en %