



energie atomique • énergies alternatives



UNIVERSITE DE CAEN BASSE-NORMANDIE



# Spectrométrie gamma haute résolution et hauts taux de comptage sur primaire de réacteur de type génération 4 au sodium liquide

M. Romain Coulon

CEA Saclay

Laboratoire Capteurs et Architectures Electroniques

Directeur de Thèse : Gilles Ban  
Encadrant CEA : Stephane Normand

# Sommaire

---



energie atomique • énergies alternatives



- I. **Enjeux sociétaux des réacteurs de Génération IV**
- II. **Applications** de la spectrométrie gamma pour la filière **RNR-Na**
- III. Mise en œuvre de la chaîne de **spectrométrie gamma**
- IV. **Faisabilité** du suivi de puissance par spectrométrie gamma
- V. **Essai de validation** sur le réacteur Phénix de Marcoule
- VI. **Simulation** de la mesure
- VII. Exploitation des **résultats**
- VIII. Etude d'**optimisation**



énergie atomique • énergies alternatives



## **Partie I :**

# **Enjeux sociétaux des réacteurs de Génération IV**

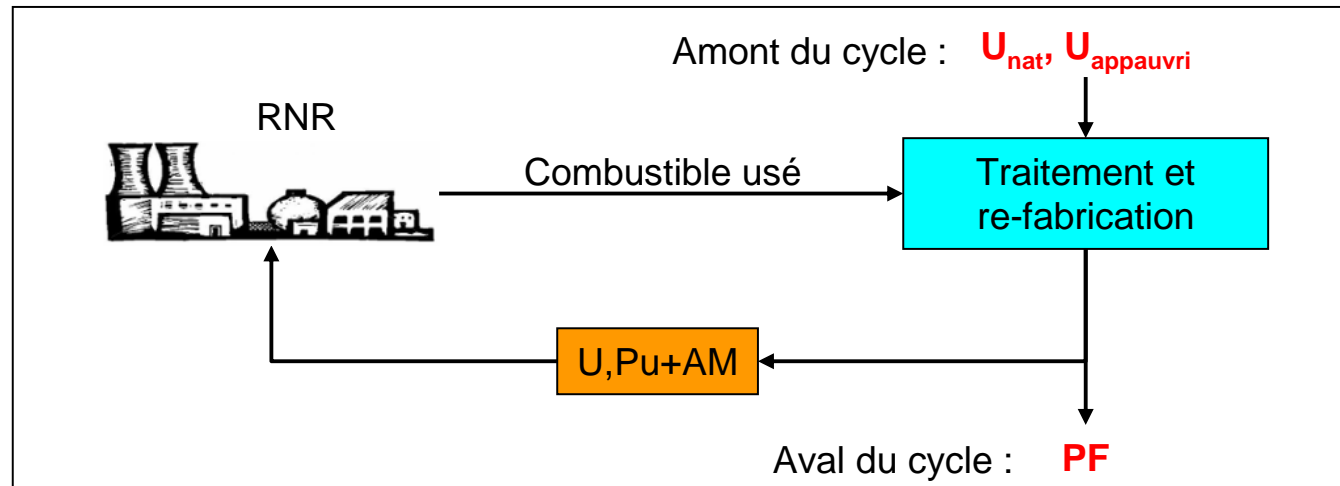
# I.1 Les systèmes de génération 4

## Le forum génération 4

- Déploiement industrielle : **2040**
- **Rentabilité** économique
- Amélioration de la **sûreté**
- **Gestion durable** du minerai d'uranium
- Diminution de la **radiotoxicité** des déchets
- Politique de **non-prolifération**

## Les filières

- La filière à sel fondu
- La filière à eau supercritique
- La filière à très hautes températures
- **Les filières à neutrons rapides (RNR)**
  - Caloporteur : Gaz, **sodium**, plomb
  - **Surgénération**  $^8\text{U}/^9\text{Pu}$
  - **Transmutation** des actinides mineurs
  - **Cycle fermé** avec recyclage intégral



*Principe du cycle fermé*

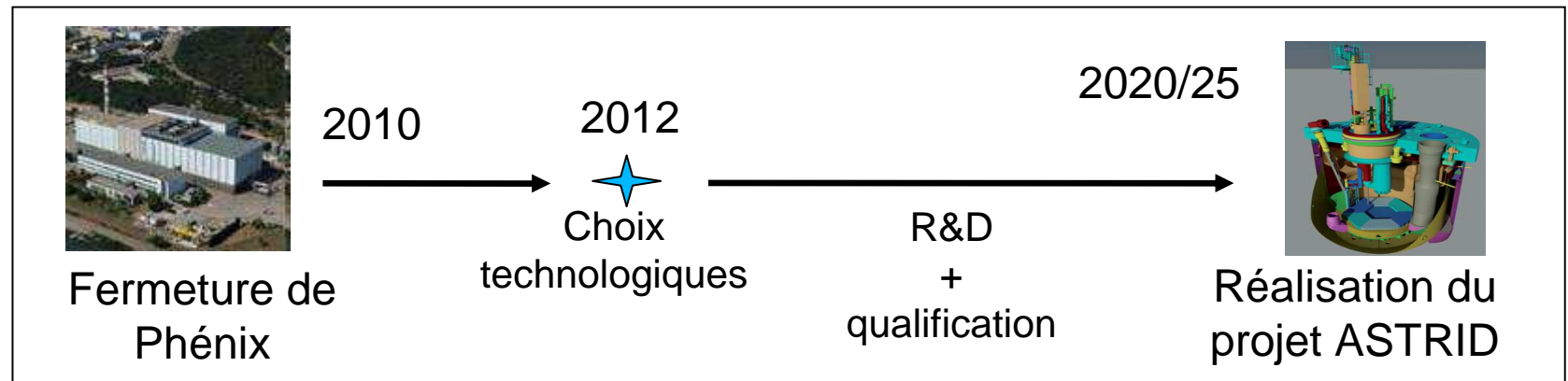
## I.2 La filière à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na)

### Filière stratégique:

- Retour d'expérience : Rapsodie, Phénix, Superphénix, EFR
- Hautes puissances : 3000 MWth (Superphénix)
- Hauts rendements thermodynamiques : 45 % (Phénix)
- Surgénération, transmutation

### Quatrième génération : Réacteur prototype **ASTRID**

- Puissance : 600 MWe
- Risque Na+H<sub>2</sub>O : Caloporteur secondaire alternatif au Na
- Effet de vide du sodium : Design du cœur





énergie atomique • énergies alternatives



## Partie II :

# Applications de la spectrométrie gamma pour la filière RNR-Na

## II.1 Etat des lieux : Le réacteur Phénix

### Particularités du réacteur Phénix

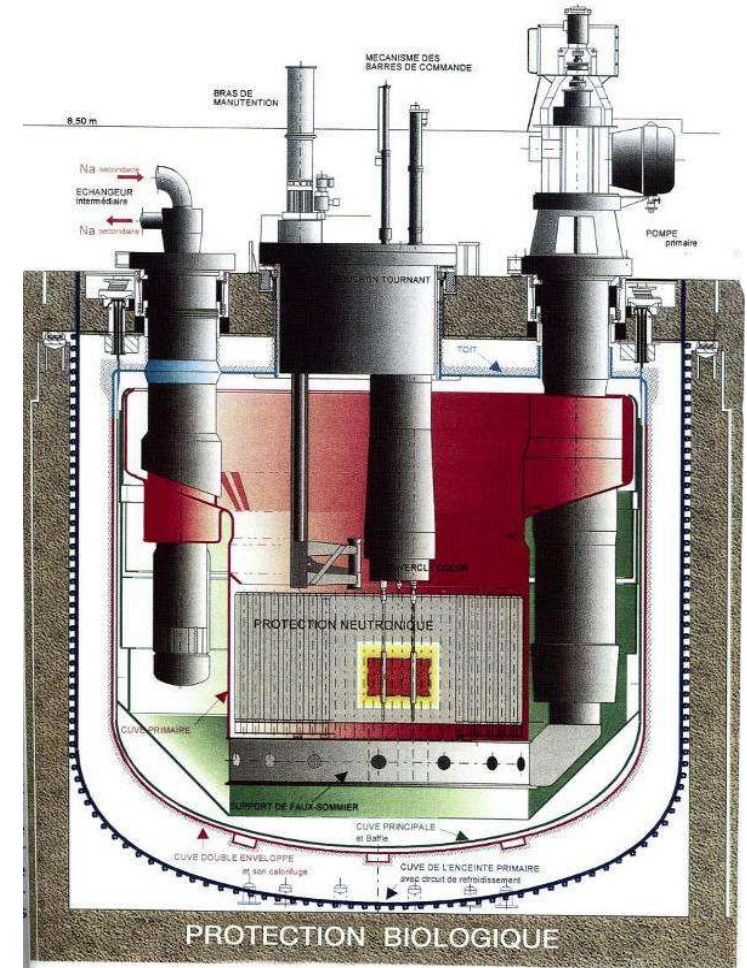
- Conception intégrée
- Hautes températures : 560°C
- Chambres neutroniques sous cuve

### Signaux vs. puissance thermique

- Représentativité
- Température
- Taux de combustion (*Burn-up*)

### Mise en œuvre

- Correction de température
- Bilans enthalpiques



*Cuve primaire de Phénix*

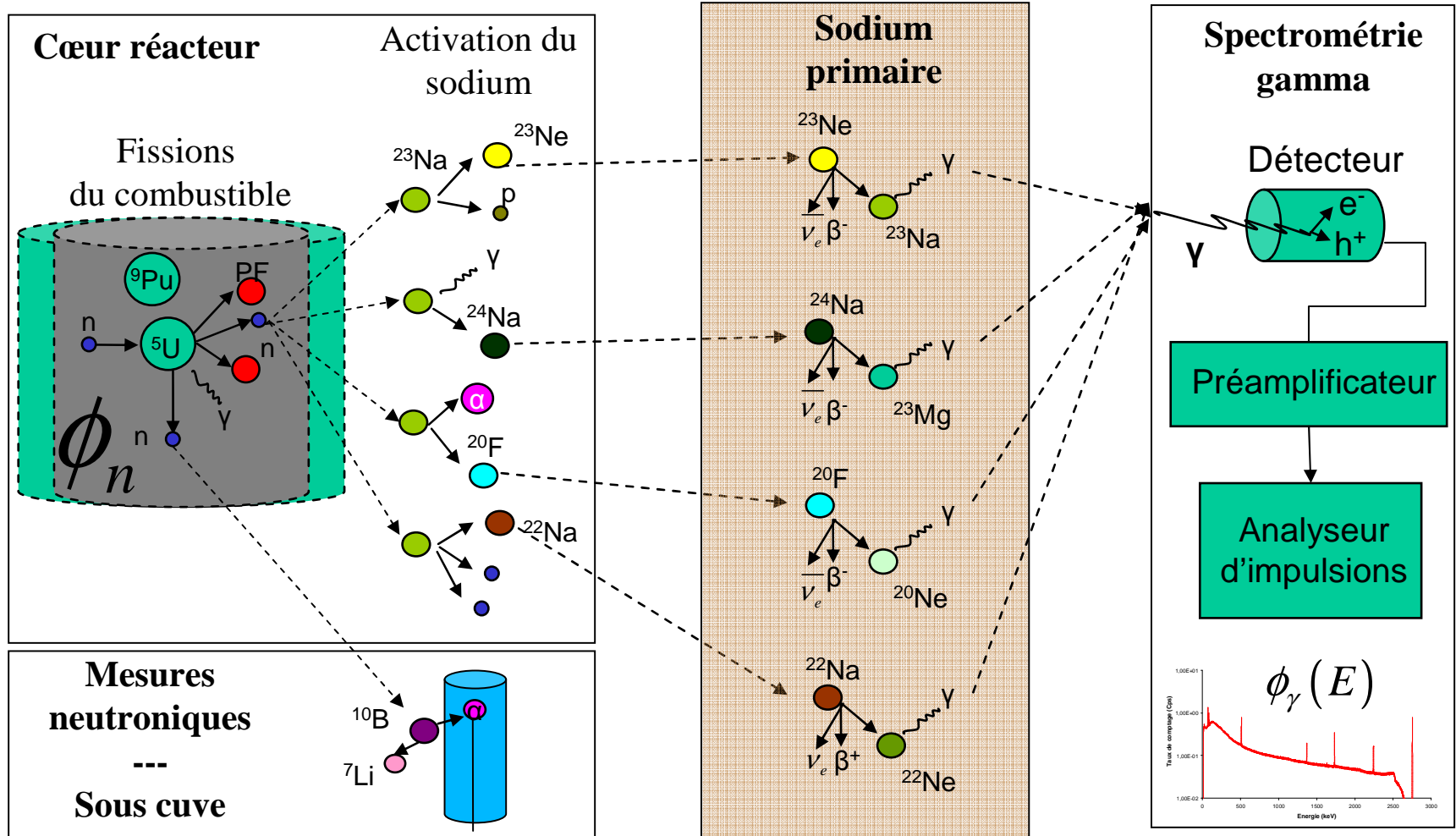
**Apport de la spectrométrie gamma ?**

## II. 2 Suivi de puissance par spectrométrie gamma

Méthode inspirée du suivi de l'azote 16 sur les REP

↳ **Corrélation**  $\phi_n \rightarrow \phi_\gamma(E)$

- Partie I :
- Gén. IV
- Partie II :
- Applications
- II.1 PHX
- II.2 Puiss.**
- II.3 DRG
- II.4 Bilan
- Partie III :
- Spectro  $\gamma$
- Partie IV :
- Faisabilité
- Partie V :
- Essai PHX
- Partie VI :
- Simulation
- Partie VII :
- Résultats
- Partie VIII :
- Optimisation

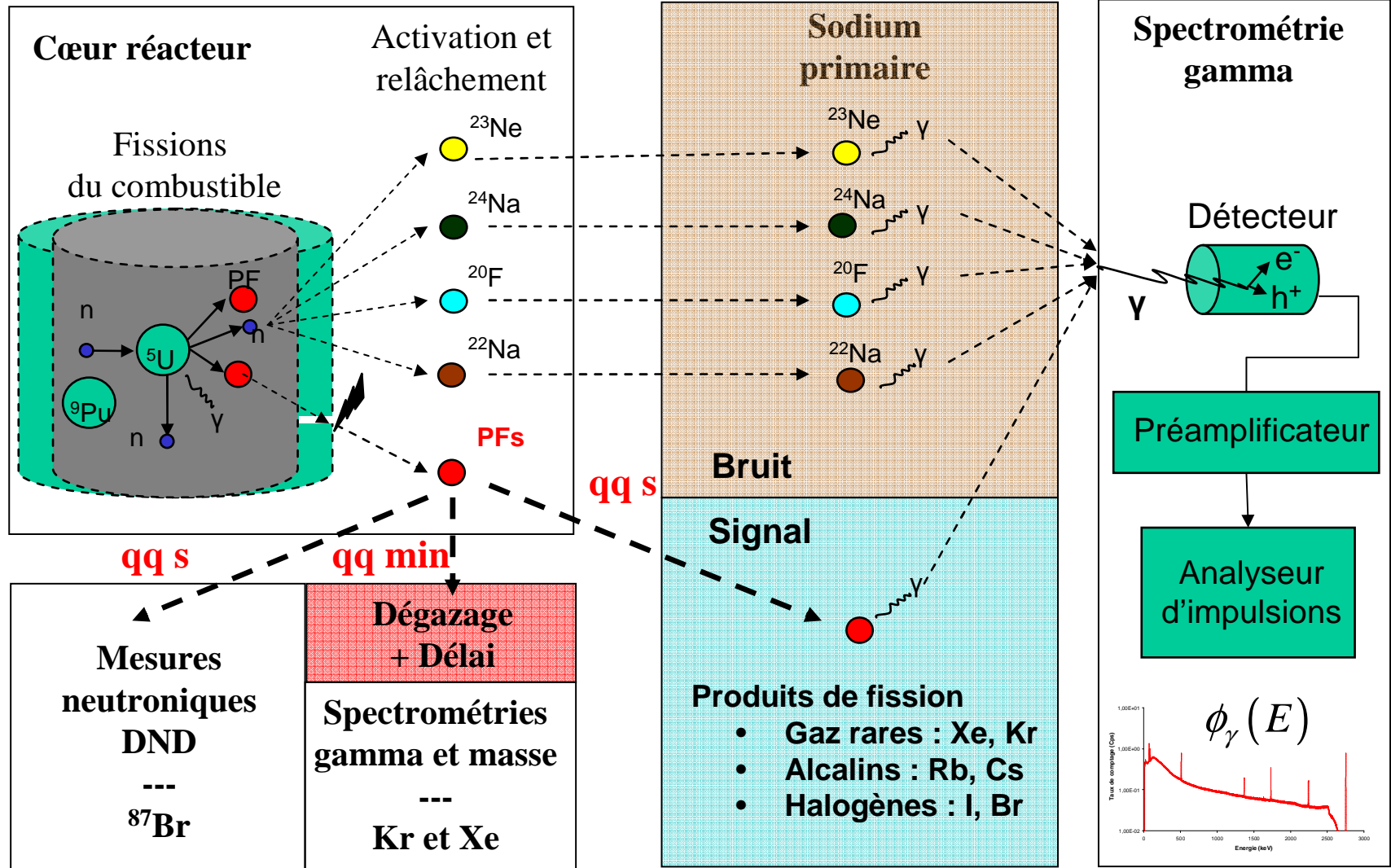




## II.3 Détection des ruptures de gaine par spectrométrie gamma

### Mesures en situation accidentelle

Partie I :
Gén. IV
Partie II :
Applications
II.1 PHX
II.2 Puiss.
<b>II.3 DRG</b>
II.4 Bilan
Partie III :
Spectro $\gamma$
Partie IV :
Faisabilité
Partie V :
Essai PHX
Partie VI :
Simulation
Partie VII :
Résultats
Partie VIII :
Optimisation



## II.4 Bilan : Application de la spectrométrie gamma

### Spectrométrie gamma du sodium primaire :

En fonctionnement normal :

- **Un suivi de la puissance thermique du cœur**



Gain de précision / mesures neutroniques

- Gain de représentativité
- Influence de la température
- Influence du *burn-up*

En fonctionnement accidentel :

- **Une détection des ruptures de gaine combustible**



Rapidité de détection

- Suppression de l'étape de dégazage
- Suppression des lignes à retard

Partie I :

Gén. IV

Partie II :

Applications

II.1 PHX

II.2 Puiss.

II.3 DRG

**II.4 Bilan**

Partie III :

Spectro  $\gamma$

Partie IV :

Faisabilité

Partie V :

Essai PHX

Partie VI :

Simulation

Partie VII :

Résultats

Partie VIII :

Optimisation



énergie atomique • énergies alternatives



## **Partie III :**

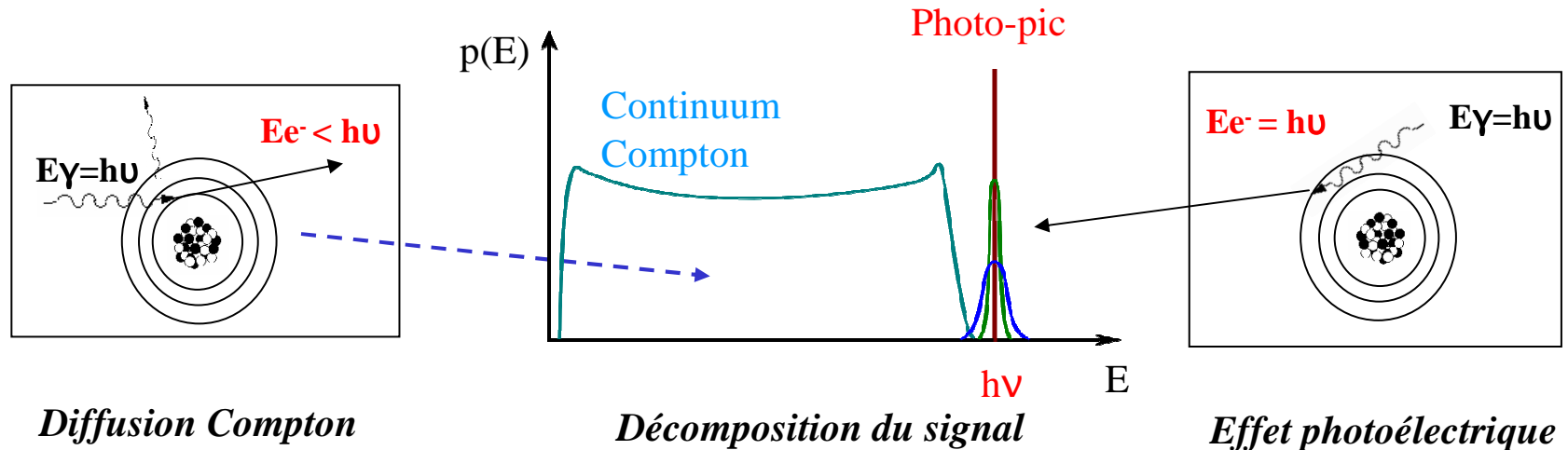
# **Mise en œuvre de la chaîne de spectrométrie gamma**

# III.1 Particularité de la spectrométrie gamma

Bruit de fond : Diffusion Compton

Résolution : Processus discrets + électronique

Partie I :  
 Gén. IV  
 Partie II :  
 Applications  
 Partie III :  
 Spectro  $\gamma$   
**III.1 Mesure**  
 III.2 Chaîne  
 III.3 Adonis  
 Partie IV :  
 Faisabilité  
 Partie V :  
 Essai PHX  
 Partie VI :  
 Simulation  
 Partie VII :  
 Résultats  
 Partie VIII :  
 Optimisation

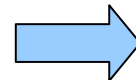


Précision statistique

$$\frac{\sigma(S)}{S} = \frac{1}{\sqrt{St}}$$

Sensibilité de détection

$$\frac{S}{B} \propto \sqrt{\frac{S}{FWHM}}$$



$\Sigma$  photoélectrique /  $\Sigma$  Compton

Hauts taux de comptage

Haute résolution en énergie

## III.2 La chaîne de spectrométrie gamma

### a. Diode **HPGe**

- $\rho$  et  $Z$  élevés :  
➔ Efficacité de détection
- $E_g=0,67$  eV + pureté :  
➔ Résolution en énergie



*Diode HPGe montée sur un Cryostat hybride Cryo-Cycle*

### b. Préamplificateur à « **reset** »

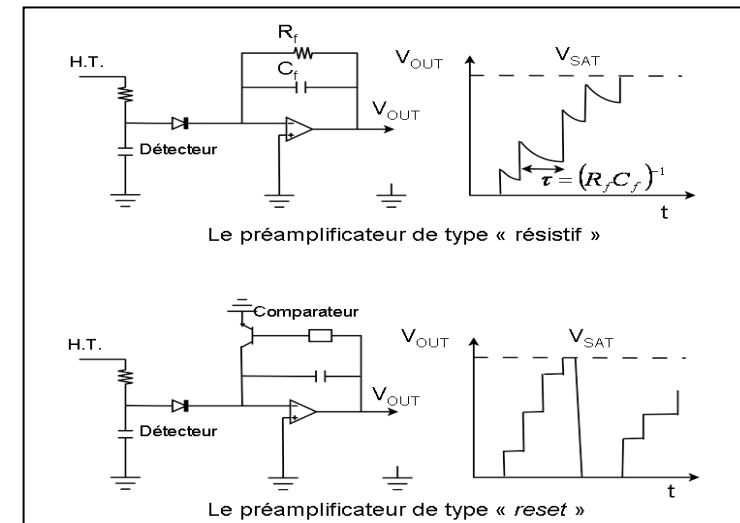
- Bruit résistif réduit
- Maîtrise de la dynamique

### c. Analyseur d'impulsion **ADONIS**

- Maximise S/B
- Métrologie à hauts taux de comptage



*Electronique ADONIS*



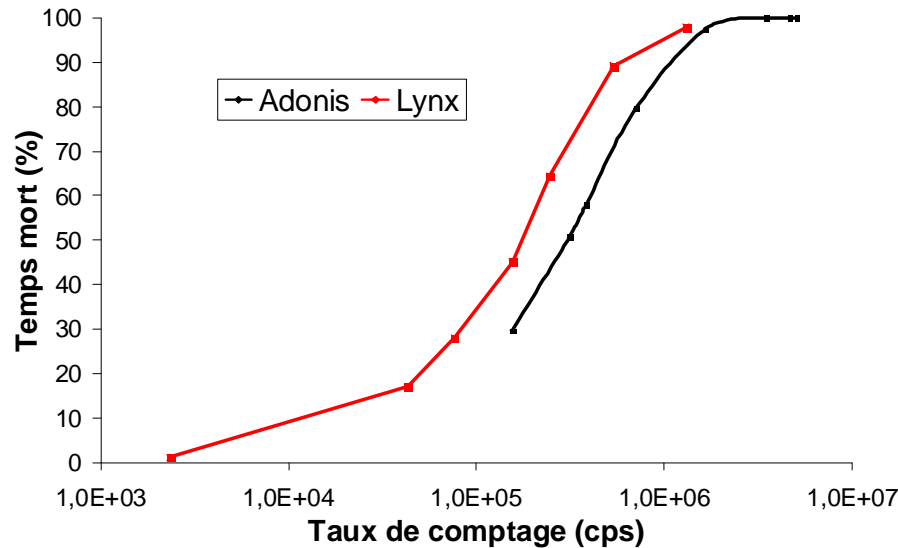
*Principe des préamplificateurs*

Partie I :  
 Gén. IV  
 Partie II :  
 Applications  
 Partie III :  
 Spectro  $\gamma$   
 III.1 Mesure  
**III.2 Chaîne**  
 III.3 Adonis  
 Partie IV :  
 Faisabilité  
 Partie V :  
 Essai PHX  
 Partie VI :  
 Simulation  
 Partie VII :  
 Résultats  
 Partie VIII :  
 Optimisation

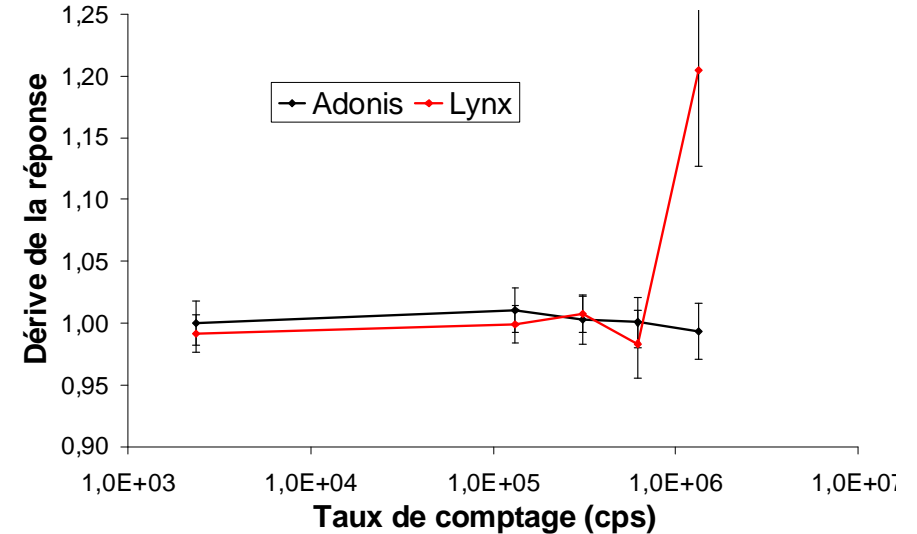
# III.3 Innovations du système ADONIS

## Métrologie à hauts taux de comptage

- Pas de mise en forme :  
➡ Temps mort réduit
- Toujours adapté :  
➡ Pas de réglage opérateur
- Variable d'occupation :  
➡ **Métrologie du temps actif**



*Temps mort des chaînes*



*Stabilité métrologique des chaînes*

## Applications aux RNR-Na

- **Mesure de puissance :**  
Précision statistique
- **Ruptures de gaine :**  
Sensibilité de détection

Partie I :  
 Gén. IV  
 Partie II :  
 Applications  
 Partie III :  
 Spectro γ  
 III.1 Mesure  
 III.2 Chaîne  
**III.3 Adonis**  
 Partie IV :  
 Faisabilité  
 Partie V :  
 Essai PHX  
 Partie VI :  
 Simulation  
 Partie VII :  
 Résultats  
 Partie VIII :  
 Optimisation



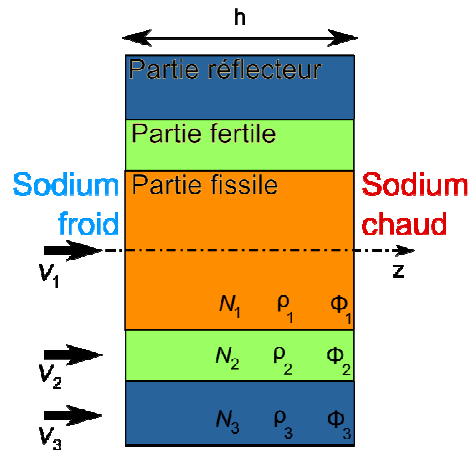
énergie atomique • énergies alternatives



## Partie IV :

# Faisabilité du suivi de puissance par spectrométrie gamma

# IV.1 Modélisation de l'activation neutronique

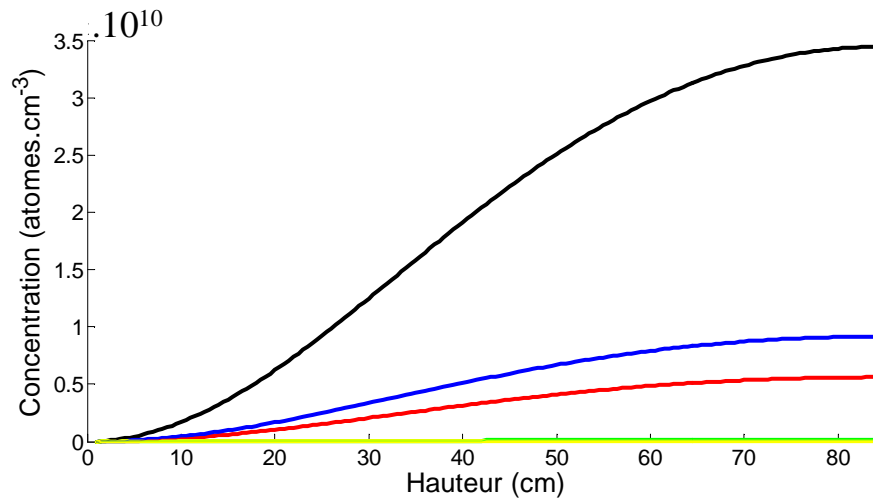


Géométrie simplifiée du cœur Phénix

$$v \frac{\partial N_{j,c}}{\partial z} + N_{j,c} \frac{\partial v_c}{\partial z} = N_{i,c} \int_E \sigma_j(E) \phi_c(E) - \lambda_j N_{j,c}$$

Eq. de conservation de masse

- Flux neutronique
- Sections efficaces d'activation
- Constantes radioactives
- Eq. de conservation du débit massique :  $\rho$  et  $v$



**Sodium 24**  
**Néon 23**  
**Fluor 20**  
**Sodium 22**

Profils de concentration des produits d'activation

Partie I :  
 Gén. IV  
 Partie II :  
 Applications  
 Partie III :  
 Spectro γ  
 Partie IV :  
 Faisabilité  
**IV.1 Modèle**  
 IV.2 Cumul  
 IV.3 Bilan  
 Partie V :  
 Essai PHX  
 Partie VI :  
 Simulation  
 Partie VII :  
 Résultats  
 Partie VIII :  
 Optimisation





energie atomique • énergies alternatives



# IV.2 Modélisation du mélange et de l'accumulation

## Modèle du mélange

$$N_j(0) = \frac{\sum_c N_{j,c}(h) S_c v_c}{\sum_c S_c v_c}$$

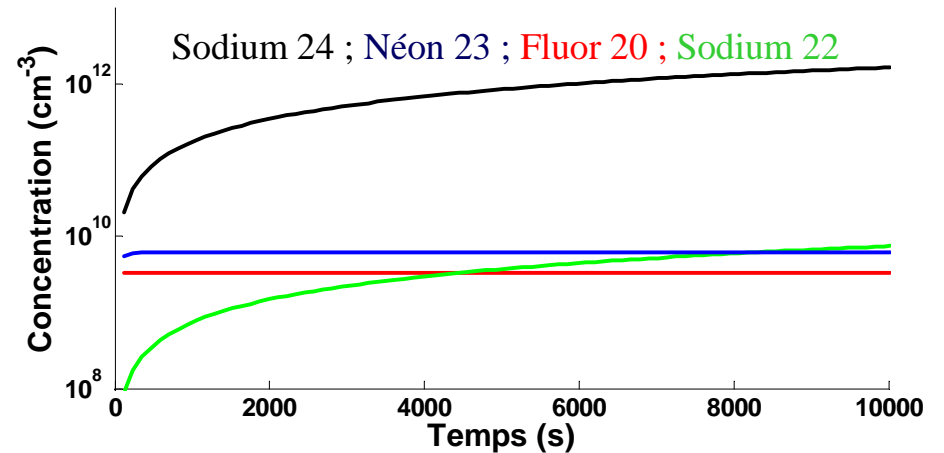


## Atomes produits (1 passage)

- Sodium 24 :  $1,4 \cdot 10^{10}$  atomes.cm<sup>-3</sup>
- Sodium 22 :  $7,0 \cdot 10^7$  atomes.cm<sup>-3</sup>
- Néon 23 :  $3,4 \cdot 10^9$  atomes.cm<sup>-3</sup>
- Fluor 20 :  $2,2 \cdot 10^9$  atomes.cm<sup>-3</sup>

## Modèle de l'accumulation

$$\begin{cases} N_j(n) = N_j(0) \left( 1 + \sum_{m=1}^n e^{-m\lambda_j\tau} \right) \\ N_j(\infty) = N_j(0) \left( 1 + \frac{e^{-\lambda_j\tau}}{\lambda_j\tau} \right) \end{cases}$$



*Cumul des radionucléides*

## Atomes produits (valeurs cumulées)

- Sodium 24 :  $9,2 \cdot 10^{12}$  atomes.cm<sup>-3</sup>
- Sodium 22 :  $7,0 \cdot 10^{13}$  atomes.cm<sup>-3</sup>
- **Néon 23** :  **$3,6 \cdot 10^9$  atomes.cm<sup>-3</sup>**
- **Fluor 20** :  **$2,2 \cdot 10^9$  atomes.cm<sup>-3</sup>**

Partie I :  
Gén. IV  
Partie II :  
Applications  
Partie III :  
Spectro y  
Partie IV :  
Faisabilité  
IV.1 Modèle  
**IV.2 Cumul**  
IV.3 Bilan  
Partie V :  
Essai PHX  
Partie VI :  
Simulation  
Partie VII :  
Résultats  
Partie VIII :  
Optimisation



energie atomique • energies alternatives



Partie I :  
Gén. IV  
Partie II :  
Applications  
Partie III :  
Spectro  $\gamma$   
Partie IV :  
Faisabilité  
IV.1 Modèle  
IV.2 Cumul  
**IV.3 Bilan**  
Partie V :  
Essai PHX  
Partie VI :  
Simulation  
Partie VII :  
Résultats  
Partie VIII :  
Optimisation

## IV.3 Bilan de l'étude de faisabilité

### Accumulation

- Sodium 24 cumul = 66000 %
- **Néon 23** cumul = 5,2 %
- **Fluor 20** cumul = 0,01 %
- Sodium 22 cumul =  $1.10^8$  %

### Affinité chimique

- Sodium 24 : isotope du sodium 23
- **Néon 23** : gaz rare
- **Fluor 20** : fluorure de sodium
- Sodium 22 : isotope du sodium 23

### Energie des Photons

- Sodium 24  $E_1 = 1,369$  MeV (100%)  $E_2 = 2,754$  MeV (100%)
- **Néon 23**  $E_1 = 0,44$  MeV (33%)
- **Fluor 20**  $E_1 = 1,634$  MeV (100%)
- Sodium 22  $E_1 = 1,275$  MeV (100%)

Deux marqueurs identifiés :  $^{23}\text{Ne}$  et  $^{20}\text{F}$

Inconvénient :  $^{24}\text{Na}$

Optimisation : 



**Faible refroidissement**  
**Hauts taux**



énergie atomique • énergies alternatives

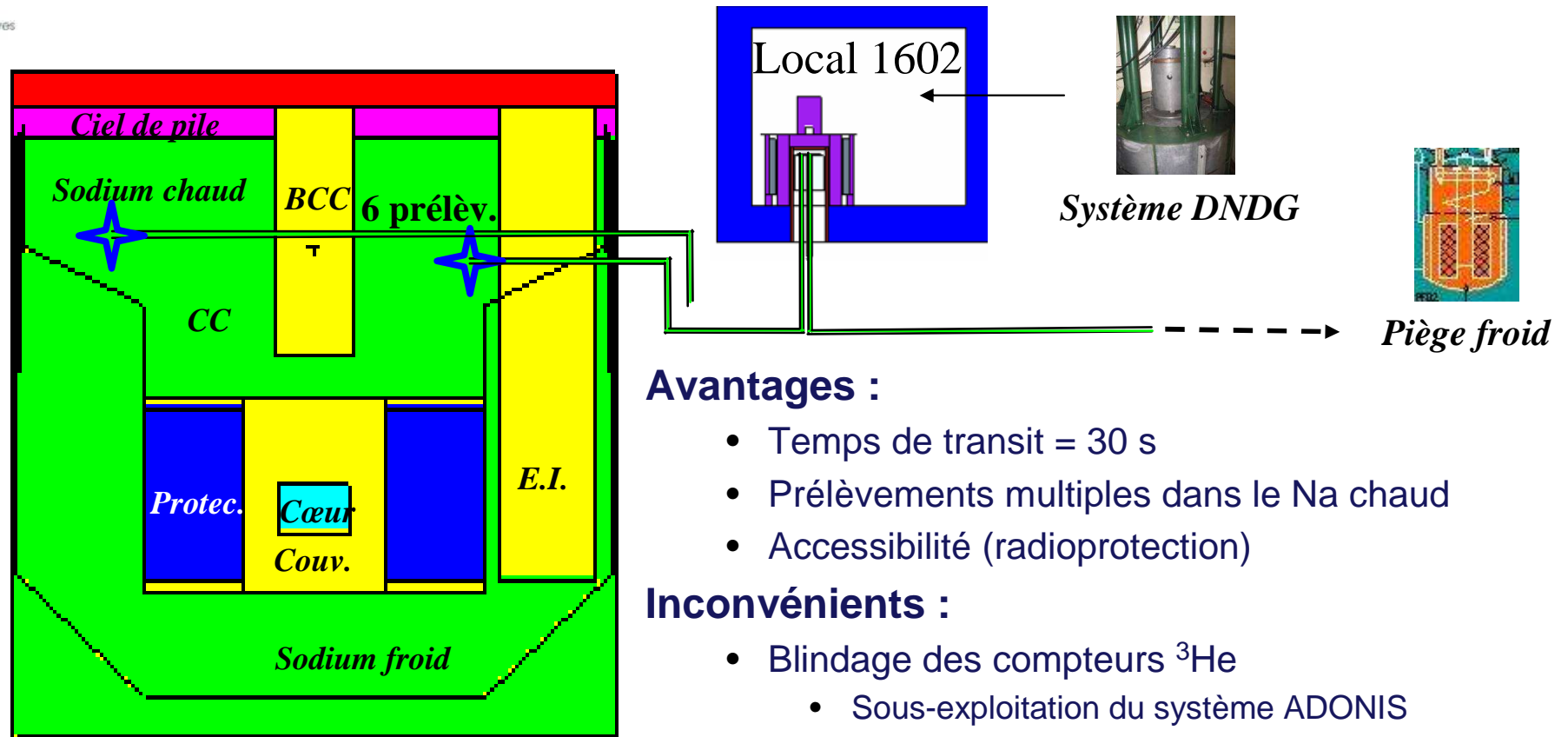


## **Partie V :**

# **Essai de validation sur le réacteur Phénix de Marcoule**

## V.1 Emplacement de l'essai

Emplacement : Système de **Détection des Neutrons Différés Global (DND/G)**



*Schéma de la cuve primaire du réacteur Phénix*

### Avantages :

- Temps de transit = 30 s
- Prélèvements multiples dans le Na chaud
- Accessibilité (radioprotection)

### Inconvénients :

- Blindage des compteurs  $^3\text{He}$ 
  - Sous-exploitation du système ADONIS
  - Pénalise la mesurabilité du  $^{20}\text{F}$  et du  $^{23}\text{Ne}$
- ➡ **Réalisation d'un trou de collimation**
- Canalisations parasites
  - ➡ **Réalisation d'un blindage de la diode HPGe**

# V.2 Présentation du dispositif expérimental

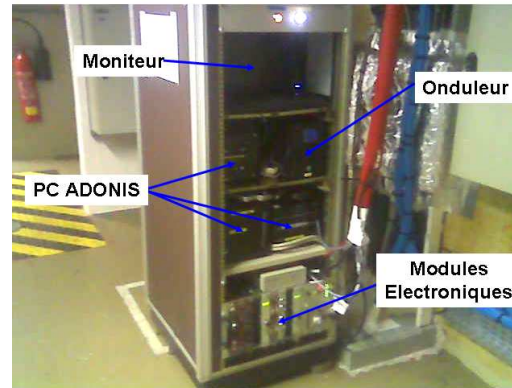
Partie I :  
Gén. IV  
Partie II :  
Applications  
Partie III :  
Spectro γ  
Partie IV :  
Faisabilité  
Partie V :  
Essai PHX  
V.1 Empl.  
**V.2 Dispo.**  
Partie VI :  
Simulation  
Partie VII :  
Résultats  
Partie VIII :  
Optimisation

## Baie de mesure

- Electronique et PC ADONIS
- Analyseur commercial DSA1000

## Etudes de sûreté

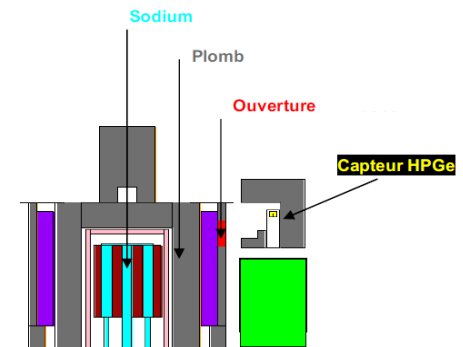
- Impact du carottage (seuils DRG)
- Risque sismique (Briques Pb)



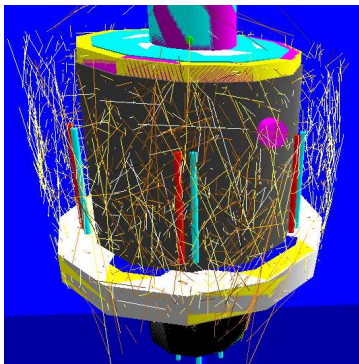
*Baie de mesure*

## Détecteur

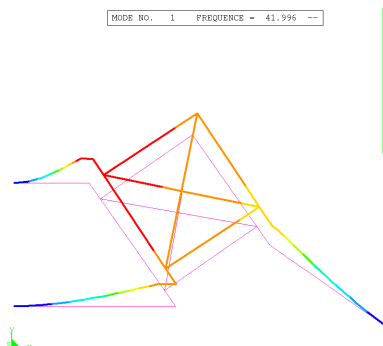
- Cryostat hybride : CryoCycle
- Blindage
- Trou de collimation



*Système de mesure*



*Simulation MCNP des compteurs <sup>3</sup>He*



*Calcul sismique (AREVA NP)*



*Blindage et capotage*



*Diode HPGe et collimateur*



énergie atomique • énergies alternatives



# Partie VI :

# Simulation de la mesure

[Partie I :](#)  
[Gén. IV](#)  
[Partie II :](#)  
[Applications](#)  
[Partie III :](#)  
[Spectro y](#)  
[Partie IV :](#)  
[Faisabilité](#)  
[Partie V :](#)  
[Essai PHX](#)  
[Partie VI :](#)  
[Simulation](#)  
**[VI.1 Transit](#)**  
[VI.2 MC](#)  
[Partie VII :](#)  
[Résultats](#)  
[Partie VIII :](#)  
[Optimisation](#)

# VI.1 Simulation de l'écoulement du sodium

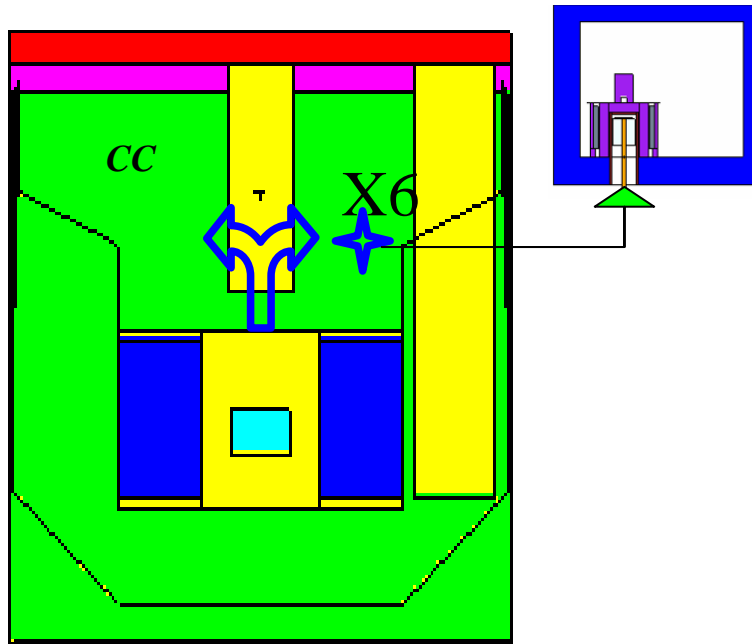


Schéma de la cuve primaire

## Transit dans les lignes de prélèvement

$$A_j = \lambda_j N_j(\infty) e^{-\lambda_j \tau_l} \int_t F_j(t) dt$$

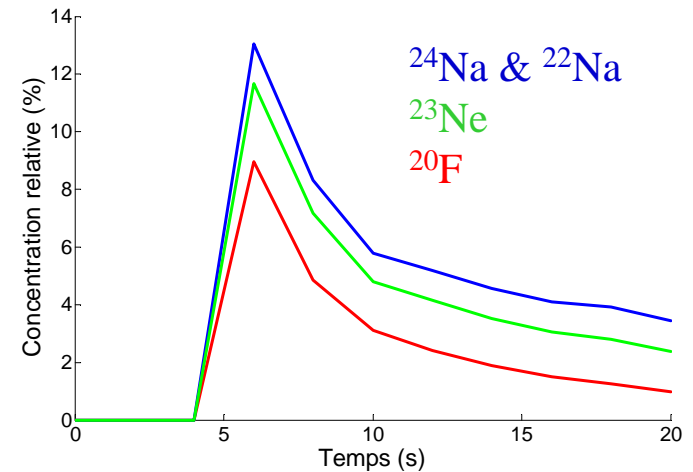
**Sodium 24** :  $3,3 \cdot 10^8 \text{ Bq.cm}^{-3}$

**Néon 23** :  $7,2 \cdot 10^7 \text{ Bq.cm}^{-3}$

## La maquette COLCHIX

- 1:8 du collecteur chaud de Phénix
- Injection de traceurs fluorescents
- Analyse par fluorimétrie laser

$$F(t) = \frac{1}{n_{ass} n_{ei}} \sum_{ass} \sum_{ei} R_{ei,ass}(t) e^{-\lambda_j t}$$

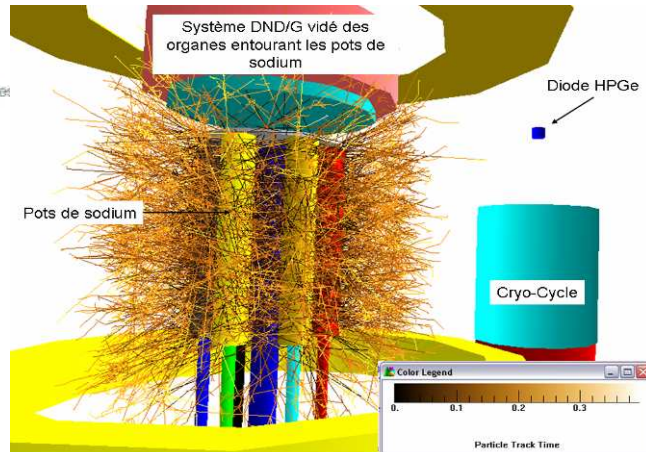


Réponse impulsionnelle de l'écoulement

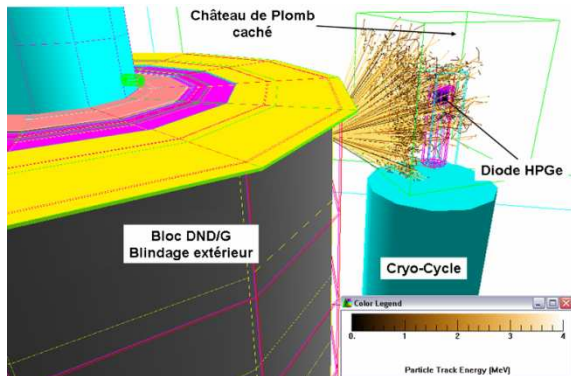
**Fluor 20** :  $1,43 \cdot 10^7 \text{ Bq.cm}^{-3}$

**Sodium 22** :  $4,27 \cdot 10^3 \text{ Bq.cm}^{-3}$

## VI.2 Simulation de la réponse du détecteur



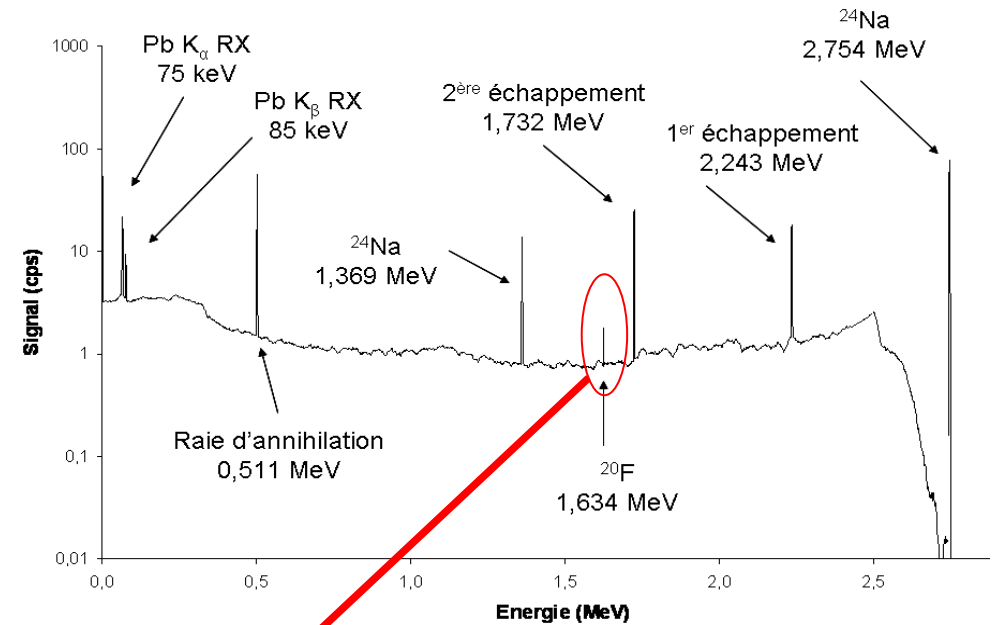
*Représentation 3D des émissions gamma des pots de sodium*



*Représentation 3D de l'irradiation de la diode HPGe*

### Simulation du transport des $\gamma$ (code MCNP)

- Flux photonique (collimateur)
- Réponse de spectrométrie gamma (diode HPGe)



*Signal de spectrométrie simulé*

- **Signal : [0,57 ; 3,30] cps**
- **(Bruit : 4,76 cps)**

Partie I :  
Gén. IV  
Partie II :  
Applications  
Partie III :  
Spectro  $\gamma$   
Partie IV :  
Faisabilité  
Partie V :  
Essai PHX  
Partie VI :  
Simulation  
VI.1 Transit  
**VI.2 MC**  
Partie VII :  
Résultats  
Partie VIII :  
Optimisation





énergie atomique • énergies alternatives



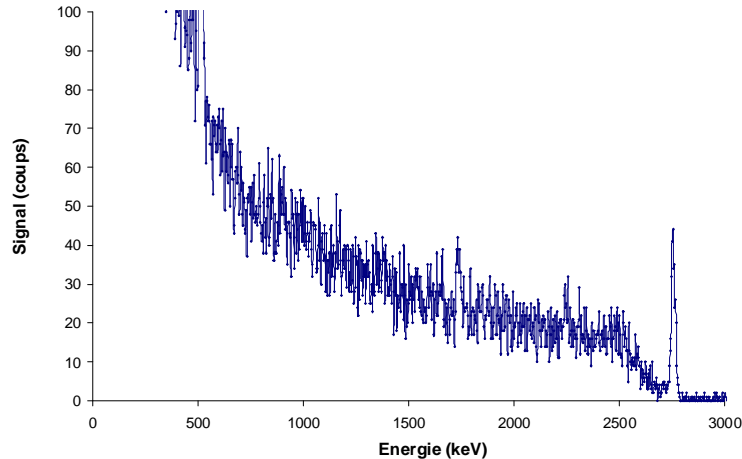
# Partie VII :

# Exploitation des résultats

- Partie I :
- Gén. IV
- Partie II :
- Applications
- Partie III :
- Spectro γ
- Partie IV :
- Faisabilité
- Partie V :
- Essai PHX
- Partie VI :
- Simulation
- Partie VII :
- Résultats
- VII.1 Spec.**
- VII.2 PHX
- VII.3 Résul.
- Partie VIII :
- Optimisation

# VII.1 Spectres mesurés

12 mai 2009 : 1<sup>ere</sup> divergence

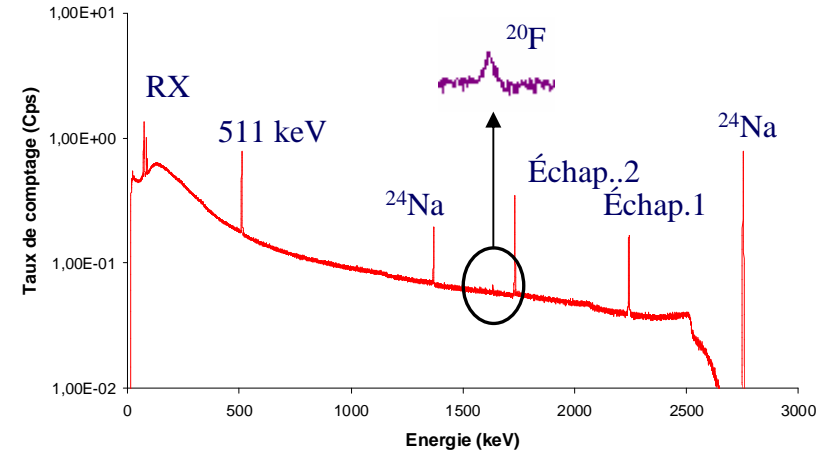


*Spectre du sodium 24*

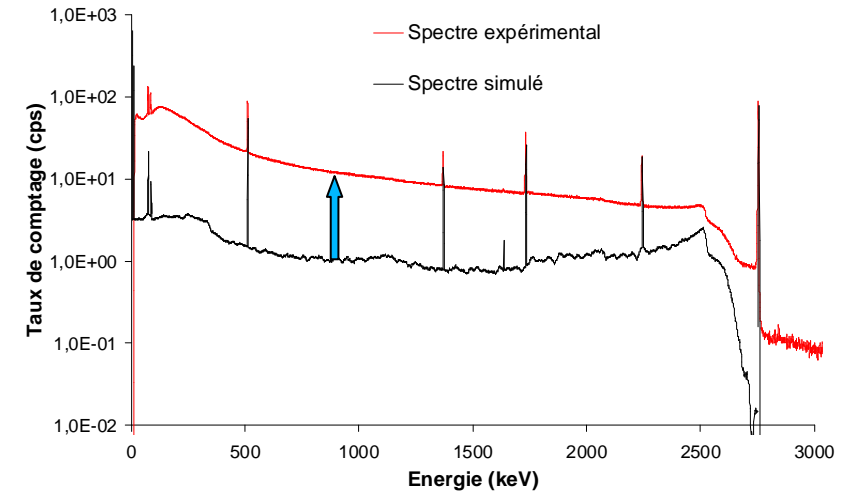
	Simulation	Mesure
<sup>24</sup> Na	217 cps	248 cps
<sup>20</sup> F	[0,57 ; 3,30] cps	1,74 cps
Bdf	4,76 cps	42,6 cps

*Comparaison simulation / mesure*

21 mai 2009 : Mise en eau du GV



*Spectre du sodium 24 + fluor 20*



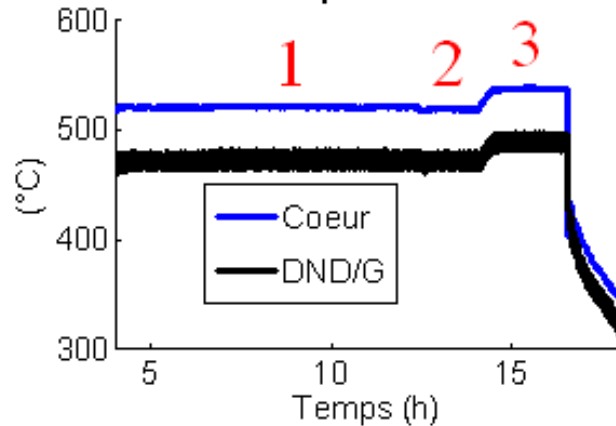
*Spectre expérimental / spectre simulé*

## VII.2 Mesures à la centrale Phénix

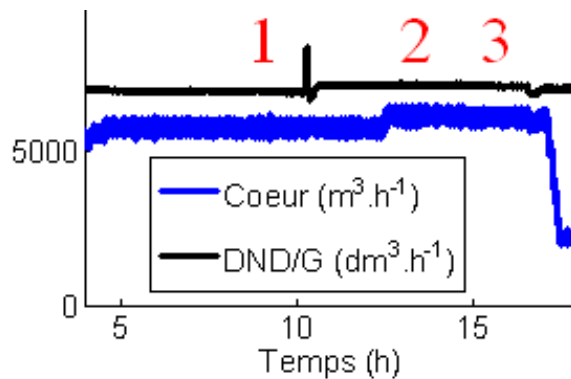
- Mesures de la plateforme SARA (1452 voies ; 250 Hz)
- Bilans enthalpiques eau/vapeur : code Bilther v2.  $\sigma(P) = \pm 4 \text{ MWth}$

$$P_{GV} = \sum Q C_p \Delta T$$

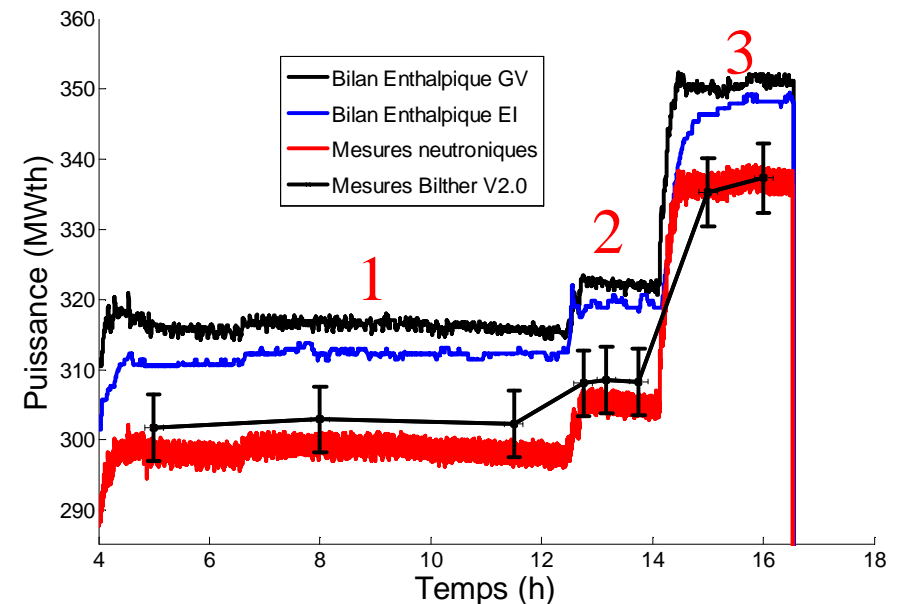
- + Puissance dissipée dans le collecteur chaud
- + Puissance perdue dans les pièges froids
- + Pertes incontrôlables
- Apport des pompes



*Températures du circuit primaire*



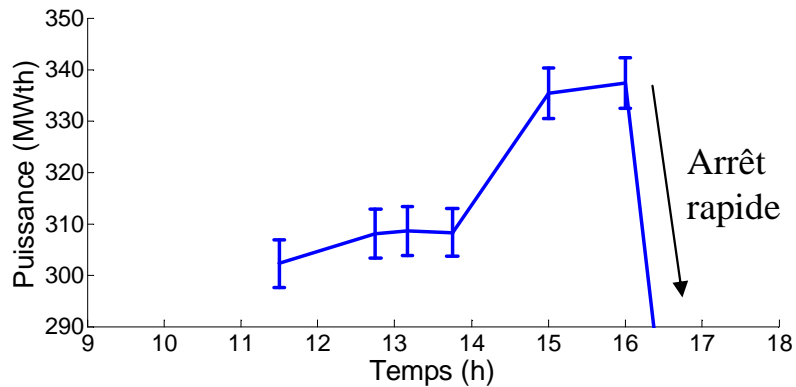
*Débits du circuit primaire*



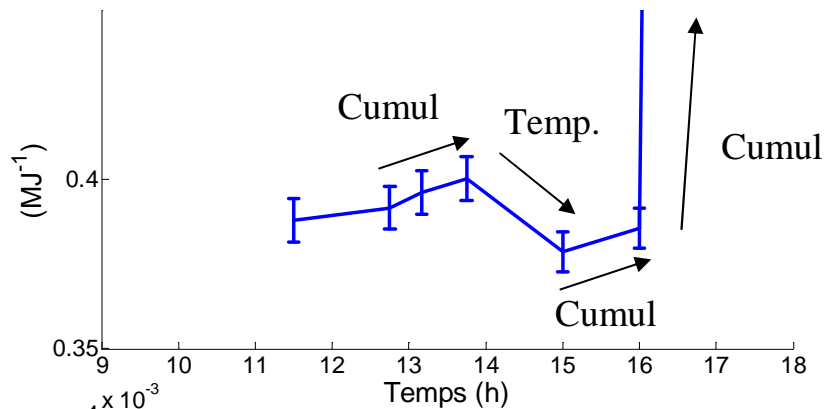
*Mesures de puissance*

## VII.3 Résultats des essais sur la montée à 350 MWth

Partie I :  
 Gén. IV  
 Partie II :  
 Applications  
 Partie III :  
 Spectro γ  
 Partie IV :  
 Faisabilité  
 Partie V :  
 Essai PHX  
 Partie VI :  
 Simulation  
 Partie VII :  
 Résultats  
 VII.1 Spec.  
 VII.2 PHX  
**VII.3 Résul.**  
 Partie VIII :  
 Optimisation

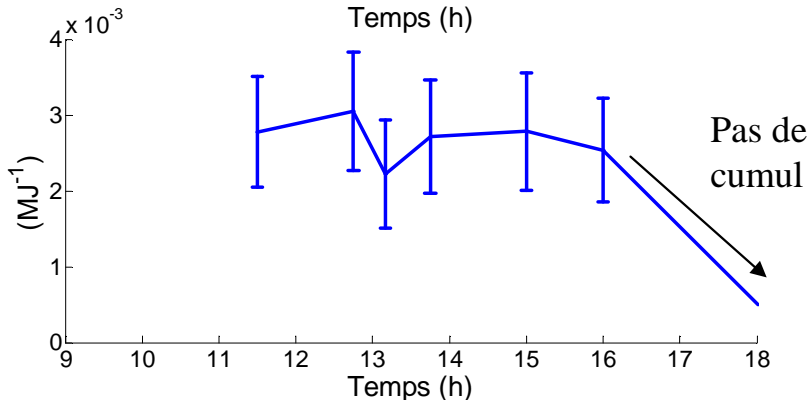


Evolution de la puissance thermique



Signal du <sup>24</sup>Na vs. puissance thermique

- Effet d'accumulation du <sup>24</sup>Na
- Impact de la température



Signal du <sup>20</sup>F vs. puissance thermique

- **Erreur stochastique : 28 %**
- **Pas d'accumulation**
- **Marqueur de la puissance**



énergie atomique • énergies alternatives



# Partie VIII :

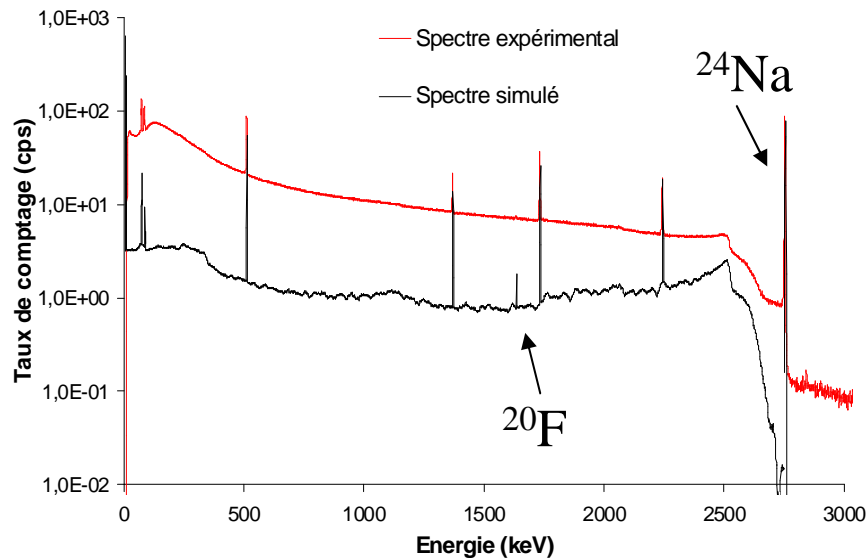
# Etude d'optimisation

## VIII.1 Optimisation des conditions de mesure

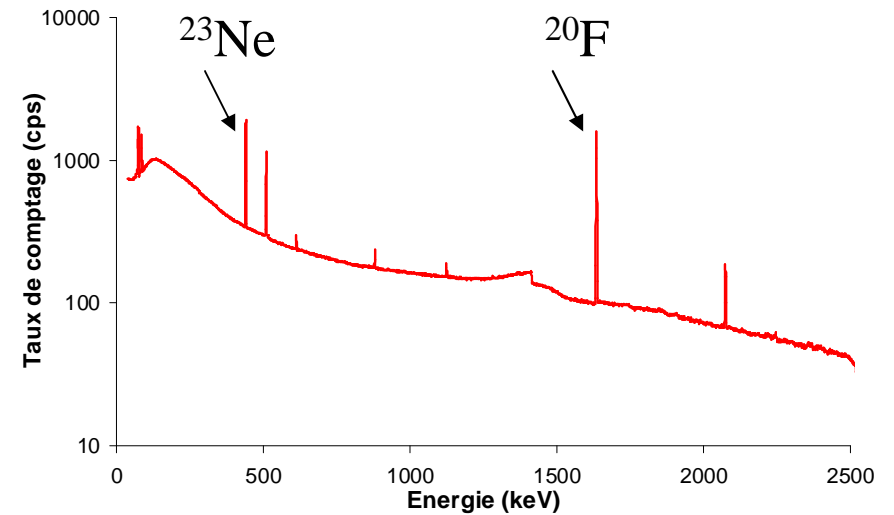
### Optimisation de la mesure :

- Réduction des temps de transit : 30s → 5s
- Hauts taux de comptage : 30 kcps → 600 kcps
- Suppression des écrans plombés : 17 cm → 0 cm

Partie I :  
Gén. IV  
Partie II :  
Applications  
Partie III :  
Spectro  $\gamma$   
Partie IV :  
Faisabilité  
Partie V :  
Essai PHX  
Partie VI :  
Simulation  
Partie VII :  
Résultats  
Partie VIII :  
Optimisation  
**VIII.1 Optim.**  
VIII.2 Dériv.  
VIII.3 DRG



*Spectre gamma en condition Phénix*



*Spectre gamma en condition optimisée*

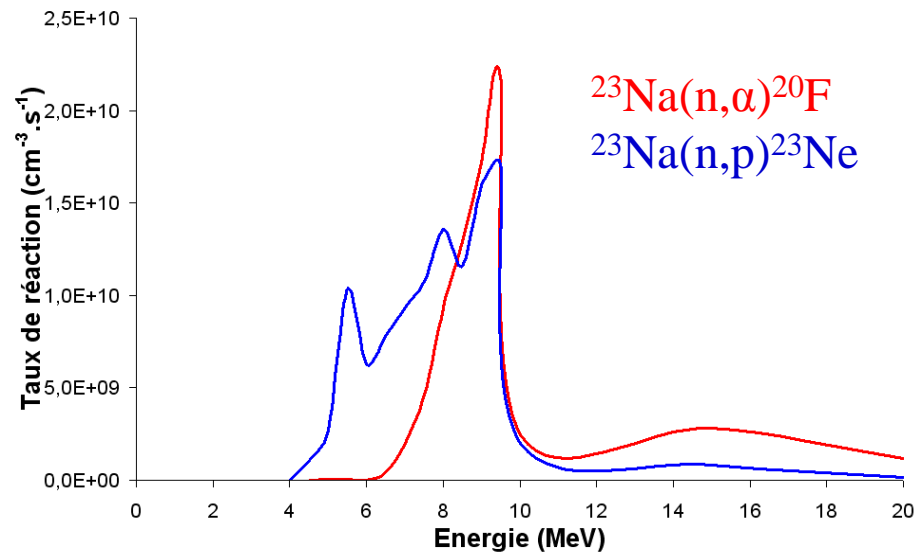
### Performances statistiques :

- Mesurabilité du **fluor 20** et du **néon 23**
- Erreur stochastique d'environ **3% pour 2 s** d'intégration
- Dynamique de plusieurs décades (fonction du bruit parasite)

## VIII.2 Impact des paramètres de fonctionnement

### Gestion des dérives liées à l'évolution des paramètres de fonctionnement :

- Influence du **débit primaire** : Nécessité de correction en ligne
- Influence de la **température primaire** : Nécessité de correction en ligne
  - Impact limité : réaction à seuil > 1 MeV du  $^{20}\text{F}$  et du  $^{23}\text{Ne}$
- Influence du **taux de combustion** : Etalonnage périodique par bilan enthalpique
  - Possibilité de limiter les dérives par la comparaison des signaux  $^{20}\text{F}$  /  $^{23}\text{Ne}$



*Distribution des taux de réactions en fonction de l'énergie des neutrons incidents*

Suivi de puissance par  $^{20}\text{F}$  et  $^{23}\text{Ne}$



Mesure rapide et précise  
Gain de stabilité / mesure neutronique

# VIII.3 La détection des ruptures de gaine

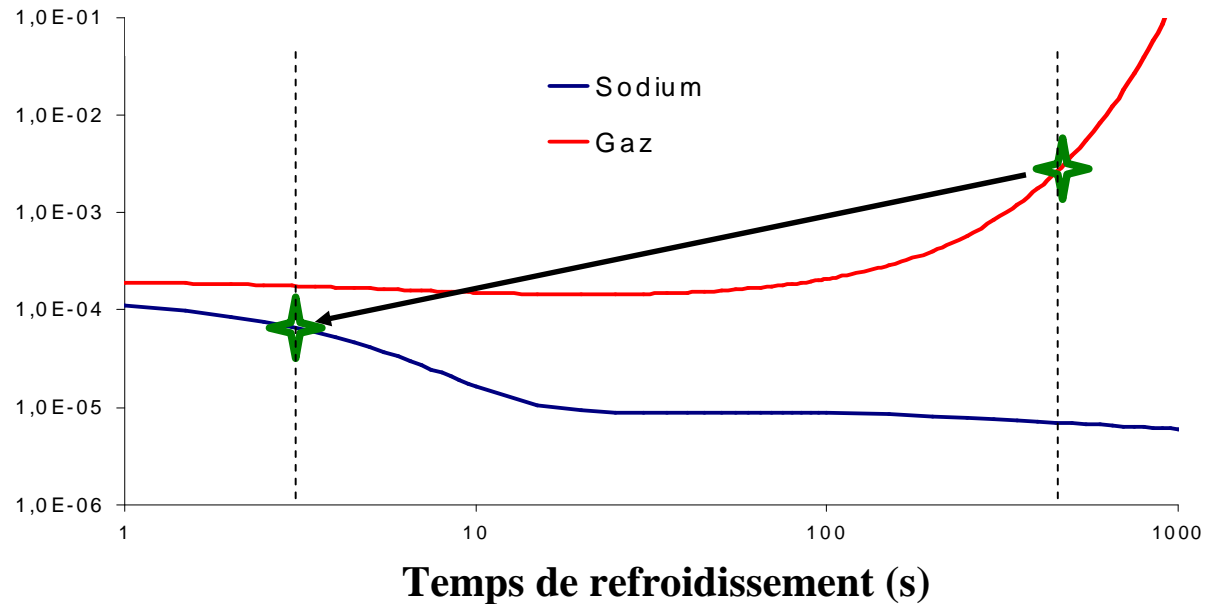
## Activité des produits de fission

$$A_{PF} = 2PX \eta_{\gamma_{PF}} Y_{PF} \frac{(1 - e^{-\lambda_{PF} \tau_{irr}}) e^{-\lambda_{PF} \tau_{rf}}}{193 \times 217}$$

Taux de fission/W
Rendements de fission cumulés

- Partie I :
- Gén. IV
- Partie II :
- Applications
- Partie III :
- Spectro γ
- Partie IV :
- Faisabilité
- Partie V :
- Essai PHX
- Partie VI :
- Simulation
- Partie VII :
- Résultats
- Partie VIII :
- Optimisation
- VIII.1 Optim.
- VIII.2 Dériv.
- VIII.3 DRG**

Activité PF  
/  
Activité PA



Ratio des activités PF / produits d'activation

**Perte de sensibilité de détection**  
(partiellement compensée par les  
hauts taux de comptage)

**Gain de rapidité significatif**  
(600 s → 5 s)





énergie atomique • énergies alternatives



# Conclusion

# Conclusion

---

## Définition d'applications de la spectrométrie $\gamma$ pour les RNR-Na

- Suivi de **puissance** et détection des **ruptures** de gaine
- Etude théorique de faisabilité (activation neutronique)
  - Faisabilité théorique du suivi de puissance (**marqueur  $^{20}\text{F}$** )

## Mise en œuvre de la spectrométrie gamma sur le réacteur Phénix

- Choix d'un emplacement assurant un faible temps de refroidissement
- Déploiement de la chaîne de spectrométrie gamma
  - Etude comparative des analyseurs : ADONIS, LYNX, DSPEC-PRO
- Optimisation de la mesure en conditions sous-optimales (collimation, blindage)
- Simulation de la mesure par codes de transport des photons
  - Estimation du signal mesuré sur le réacteur Phénix
  - Etude comparative de codes : TRIPOLI et MCNP
- Etudes de sûreté et insertion dans le programme des essais ultimes de la centrale
- Mise en place du dispositif et réalisation des acquisitions

## Analyse des résultats

- Mesure en première mondiale du  $^{20}\text{F}$  par spectrométrie gamma
- Filtrage des signaux gamma pour optimiser la précision statistique des mesures
- Extraction des mesures de la centrale et réalisation de bilans enthalpiques
- Utilisation prometteuse du fluor 20 comme marqueur de la puissance du réacteur



energie atomique • énergies alternatives



# Perspectives

---

## Etude d'optimisation

- Simulation en conditions nominales
- Estimation de la sensibilité de détection des ruptures de gaine

## Suivi de la puissance thermique du cœur par gamma retardés

- **Précision statistique** (erreur stochastique = 3 % ; temps d'intégration = 2 s)
- Impact limité de la **température**
- Compensation de l'impact du **burn-up** par comparaison  $^{20}\text{F}$  /  $^{23}\text{Ne}$

## Détection des ruptures de gaine à faible temps de refroidissement

- **Rapidité** de détection de quelques secondes (600 s → 5s)
- Optimisation de la sensibilité (délai, taux de comptage, dimension du capteur)



énergie atomique • énergies alternatives



**Merci de votre attention**