

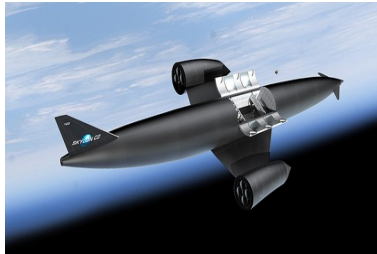
Énergie nucléaire du futur, aspects sociétaux, physiques et mathématiques

Jean-Pierre Demailly

Institut Fourier, Université de Grenoble I & Académie des Sciences de Paris

14 décembre 2015
Colloquium du Laboratoire
Jean-Alexandre Dieudonné, Nice

La technologie contemporaine repose sur la consommation et le stockage de l'énergie, avec une part croissante de l'électricité ...



3.7 milliards d'habitants
5 milliards tep

6 milliards d'habitants
9.2 milliards tep

8.2 milliards d'habitants
15.3 milliards tep



1970

1.35 tep/hab

2000

1.5 tep/hab

2030

1.9 tep/hab

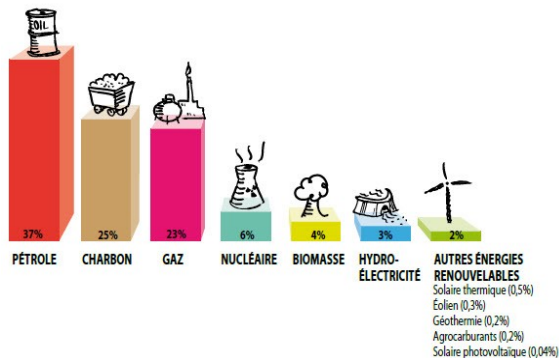
Croissance de la population et de la demande d'énergie

Centrale électrique au charbon

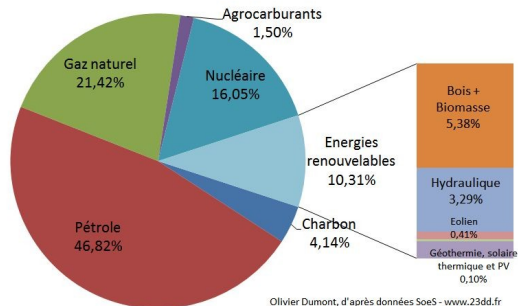


Sources d'énergie utilisées dans le monde et en France

SOURCES D'ÉNERGIE UTILISÉES DANS LE MONDE

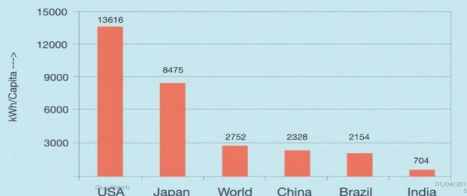


Sources d'énergie dans la consommation finale totale en France, 2009 (données corrigées du climat)

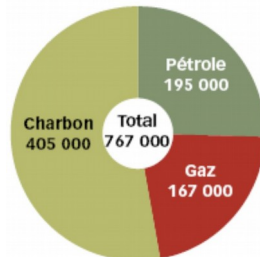


Une situation très hétérogène

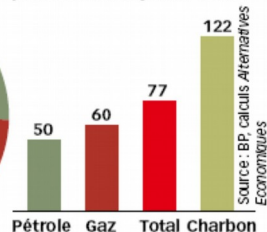
Per Capita Electricity Consumption in kWh



Réserves prouvées, en millions de tonnes d'équivalent pétrole



Nombre d'années de production au rythme actuel



Contexte nucléaire actuel : France

58 réacteurs / 63 GWe installés

75-77% de la production d'électricité

30% de la consommation totale d'énergie

Bilan électrique France

	2011 (TWh)	2010 (TWh)	Variation 2011/2010	Part dans la production 2011	Émissions de CO ₂ 2011 (en millions de tonnes)
Production nette	541,9	550,2	-1,5%	100%	27,4
Nucléaire	421,1	407,9	+3,2%	77,7%	0,0
Thermique à combustible fossile	51,2	59,5	-13,8%	9,5%	24,4
<i>dont charbon</i>	<i>13,4</i>	<i>19,1</i>	<i>-29,9%</i>	<i>2,5%</i>	<i>12,9</i>
<i>fioul</i>	<i>8,1</i>	<i>8,0</i>	<i>+0,7%</i>	<i>1,5%</i>	<i>2,3</i>
<i>gaz</i>	<i>29,7</i>	<i>29,9</i>	<i>-0,5%</i>	<i>5,5%</i>	<i>9,2</i>
Hydraulique	50,3	67,6	-25,6%	9,3%	0,0
Éolien	11,9	9,7	+22,8%	2,2%	0,0
Photovoltaïque	1,8	0,6	+208,7%	0,3%	0,0
Autres sources d'énergie renouvelables	5,6	4,9	+12,3%	1,0%	3,0

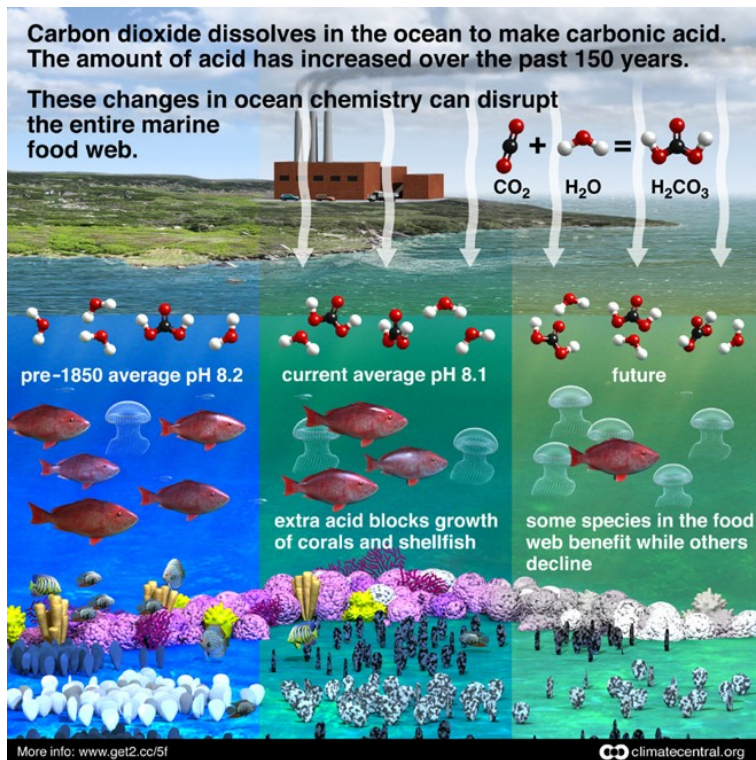
Une rue à Grenoble ...



Entre le 1^{er} janvier et le 20 août 2015, l'humanité avait déjà consommé toutes les ressources biologiques que la nature est capable de renouveler en une année, soit une surconsommation se situant à un niveau d'environ 156 % !

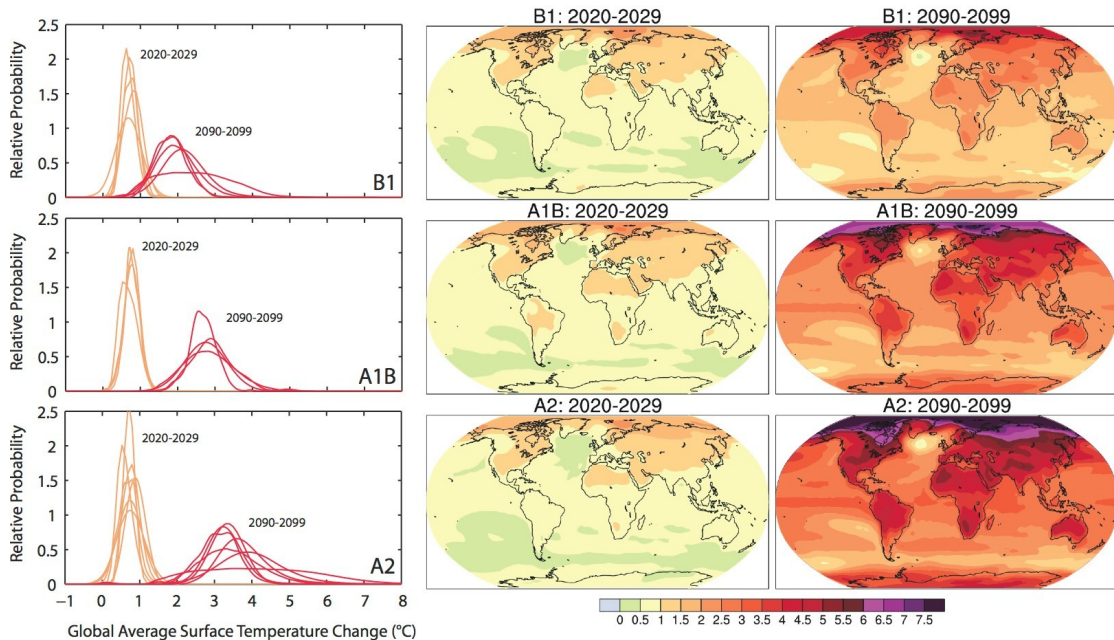


Acidification des océans, entraînant un dépérissement de la faune aquatique

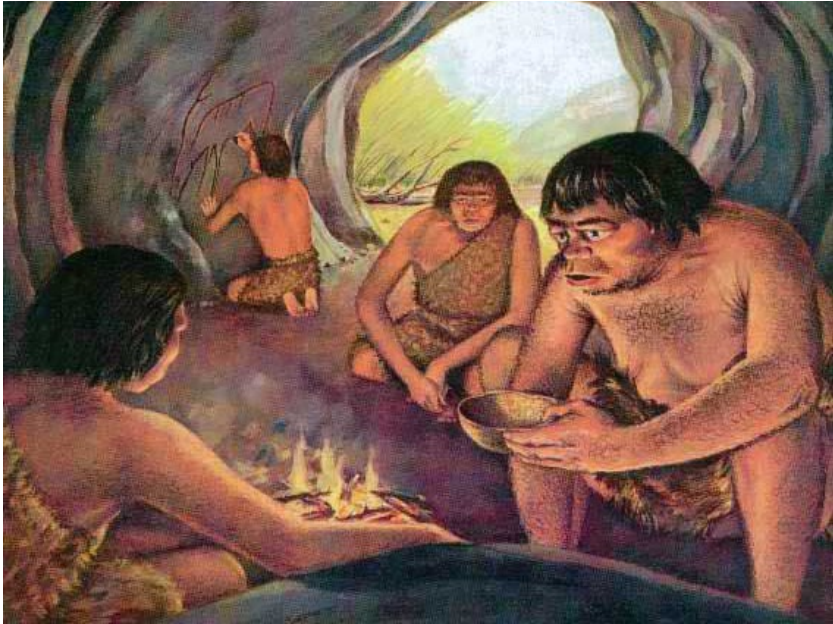


Réchauffement climatique

AOGCM Projections of Surface Temperatures



Faut-il en revenir à l'âge des cavernes ?



Continuer la fuite en avant avec des énergies fossiles non conventionnelles...

Gaz de schiste, fracturation hydraulique



Sables bitumeux Alberta Canada



Energies renouvelables ...

Solaire thermique Espagne



Convertisseurs de courants marins Canada



Guy Weets

01/04/201
5

Géothermie Japon

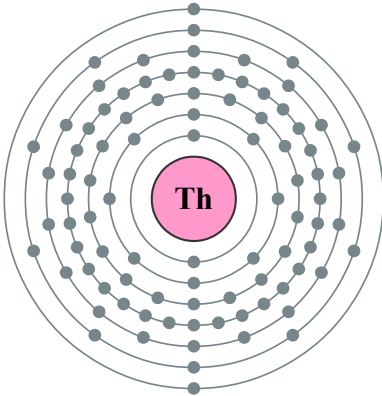


Energie nucléaire ??

L'énergie nucléaire dispose au plan théorique d'un avantage colossal : sa densité énergétique par unité de masse est plusieurs millions de fois supérieure à celle de l'énergie chimique.

90: Thorium

2,8,18,32,18,10,2



découvert en Norvège en 1829

Bille de 150 g de thorium = plus de 300 tonnes de pétrole



Energie : concentration

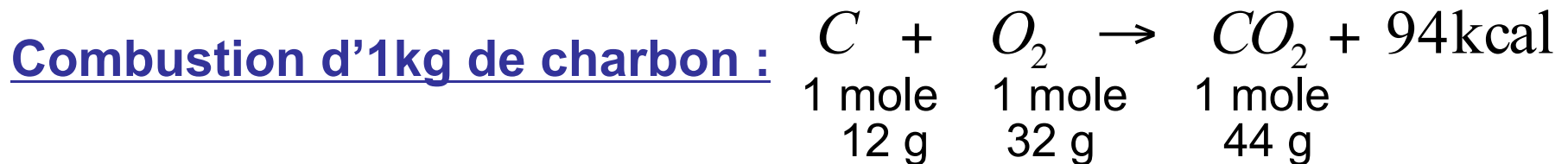
Fission d'1kg de ^{235}U :

Energie libérée / fission $\approx 200 \text{ MeV}$ (ou $3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}$)

$1 \text{ kg d}'^{235}\text{U} = 1000 \times N_A / 235 = 2,56 \cdot 10^{24} \text{ noyaux d}'^{235}\text{U}$

\Rightarrow Fission d'1 kg d' ^{235}U : produit $2,56 \cdot 10^{24} \times 200 = 5,12 \cdot 10^{26} \text{ MeV}$

+ Rendement thermique \rightarrow électrique de 33%



Combustion d'1 mole de C : libère 94 kcal soit $2,45 \cdot 10^{18} \text{ MeV}$ (ou $3,9 \cdot 10^5 \text{ J}$)

1 kg de charbon contient $1000/12 = 8,33 \text{ moles de C}$

\Rightarrow Combustion d'1kg de charbon : produit $2,04 \cdot 10^{20} \text{ MeV}$

+ Rendement thermique \rightarrow électrique de 45%

Energie : concentration



Il faut **1800 t** de charbon pour produire autant d'électricité qu'**1 kg d'²³⁵U**

OU

Par an, 1 personne (pays OCDE) consomme comme électricité
environ 1 kW en continu soit 32 GJ/an ou 9000 kWh/an

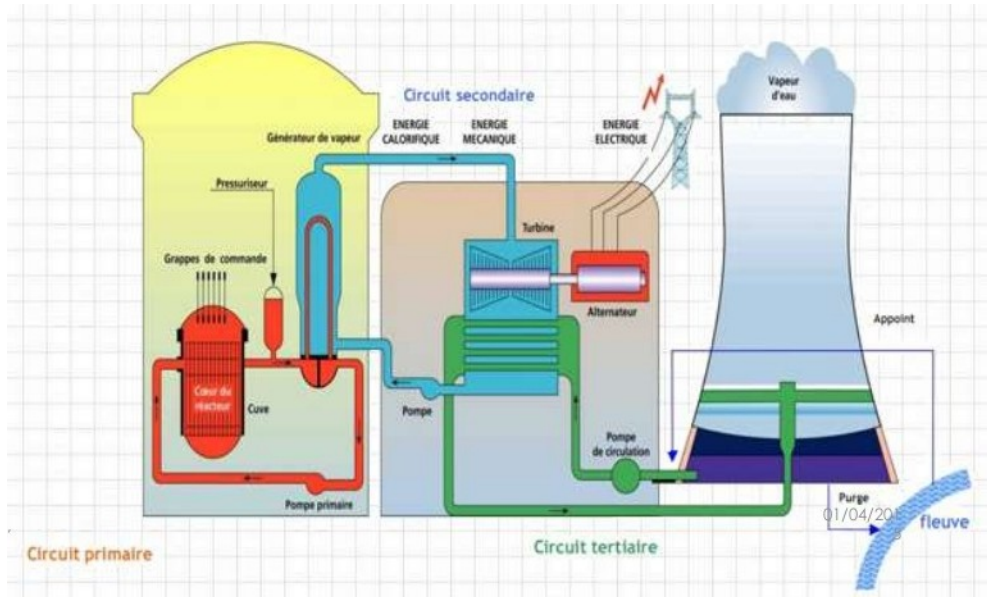
→ $32 \cdot 10^9 / 3,2 \cdot 10^{-11} / 0,33 = 3,03 \cdot 10^{21}$ fissions ⇒ **1,2 g d'²³⁵U ou 240g d'Unat**

→ $32 \cdot 10^9 / 3,9 \cdot 10^5 / 0,45 = 1,82 \cdot 10^5$ moles ⇒ **2150 kg de charbon**

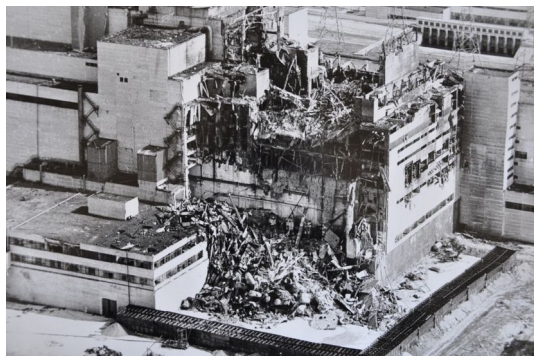


L'énergie nucléaire est une énergie très concentrée

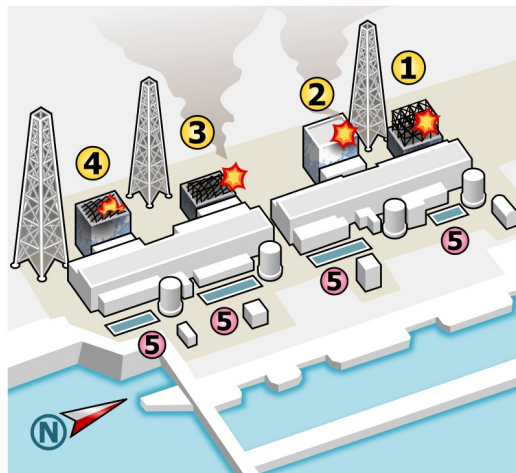
Principe de fonctionnement d'un réacteur nucléaire électrogène



Les désastres nucléaires de Tchernobyl et Fukushima témoignent de la sécurité insuffisante de la technologie nucléaire actuelle : environ 430 réacteurs dans le monde majoritairement des REP (eau pressurisée, 155 bars)

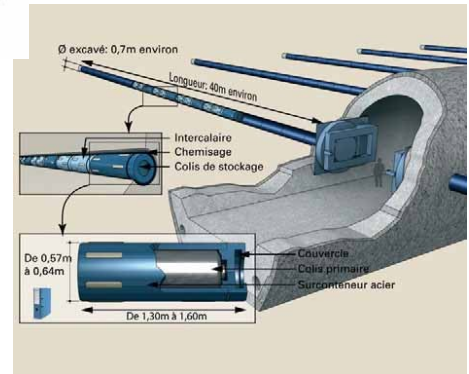
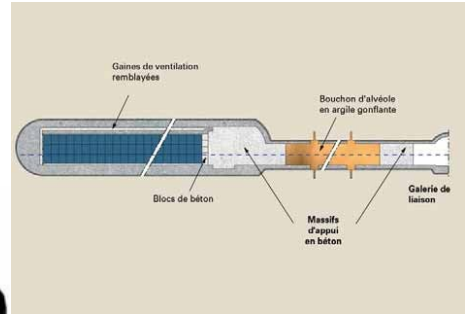


Réacteur de type RBMK
à eau bouillante,
modéré au graphite

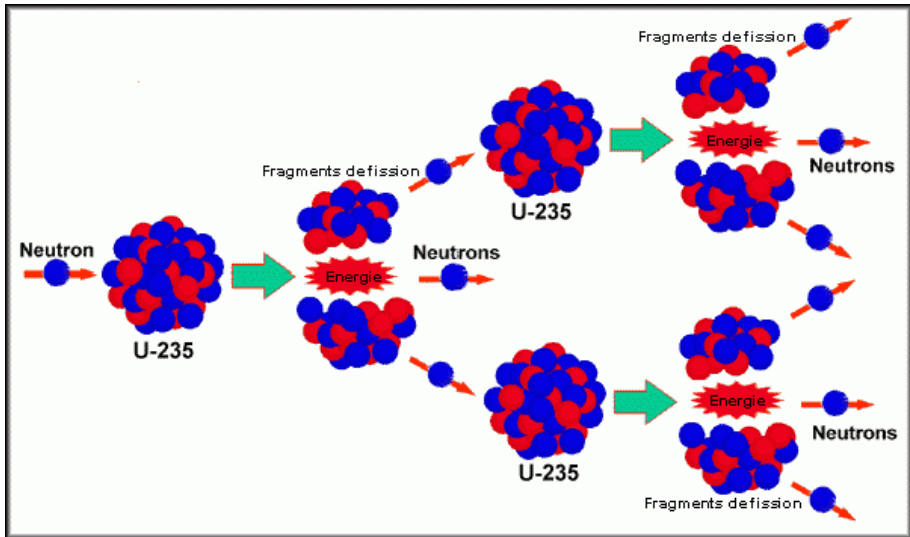


Réacteurs à eau bouillante

Problème des déchets / stockage géologique

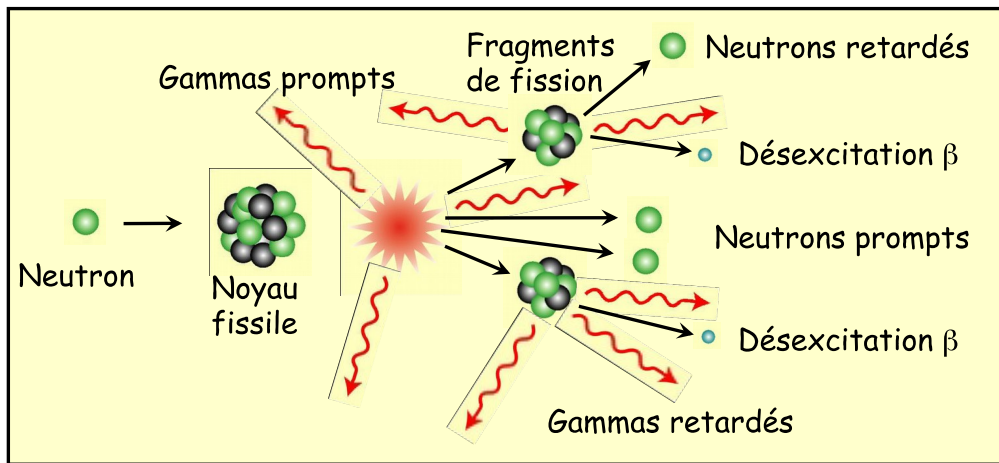
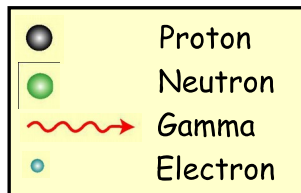


Principe des réactions en chaîne



On dit que l'Uranium 235 est fissile : il peut alimenter directement une réaction en chaîne – utilisable pour un réacteur électrogène ... ou pour une arme nucléaire

Une fission un peu plus réaliste...



Réaction en chaîne : facteur de multiplication et réactivité

Facteur de multiplication k_{eff} défini comme :

$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Nb neutrons produits}}{\text{Nb neutrons absorbés}}$$

Si $k_{\text{eff}} < 1$, la réaction en chaîne ne s'entretient pas
elle s'arrête après avoir produit $1/(1-k)$ neutrons

Si $k_{\text{eff}} > 1$, la réaction diverge (principe des bombes à fission)

Si $k_{\text{eff}} = 1$, la réaction en chaîne s'entretient d'elle même
Principe d'un réacteur CRITIQUE

Réactivité :

$$\square = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}}$$

Risques spécifiques d'un réacteur nucléaire :

- Stock d'énergie concentrée dans le combustible
- Accumulation de produits radioactifs (danger + chaleur)
- Dégagement significatif d'énergie même après arrêt

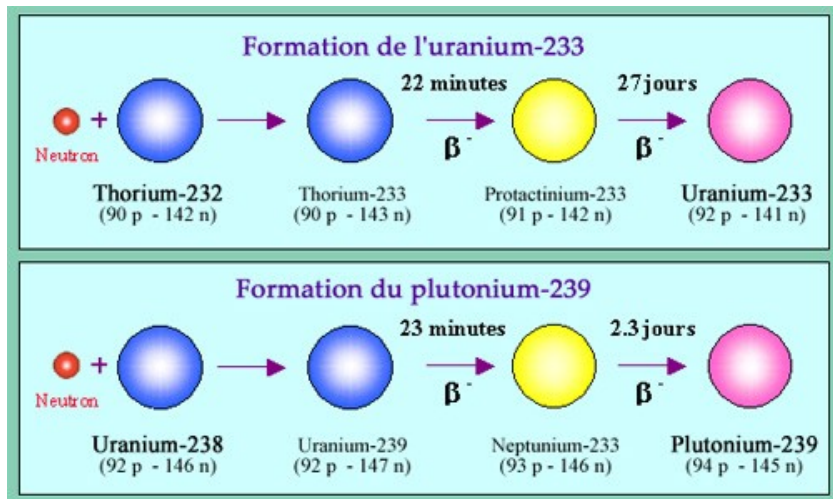
Bases de la sûreté nucléaire = maîtriser le réacteur

- Confiner les produits radioactifs □ 3 barrières
- Maîtriser la réaction en chaîne en tout instant = piloter le réacteur
- Evacuer la puissance y compris après l'arrêt de la réaction en chaîne

Seuls trois éléments sont exploitables dans la nature pour la fission : U235, U238, Th232

U235 est directement *fissile* ... mais il est peu abondant, sa teneur dans l'uranium naturel n'est que 0,72 %, le reste (99,28 %) étant essentiellement de l'U238

U238 et Th232 sont seulement « *fertiles* »



U233

et

Pu239

eux, sont
fissiles

Le rêve des physiciens nucléaires :

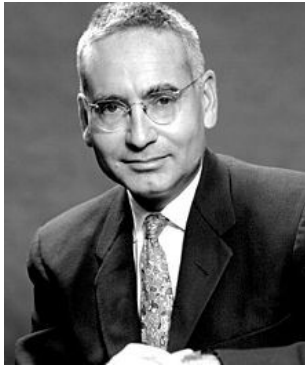
- un réacteur sûr, qui ne puisse en aucun cas connaître d'accident susceptible de disperser de la radioactivité, ceci quelles que soient les circonstances extérieures
- des ressources de combustible abondantes (des milliers d'années, ou plus !)
- une production de déchets très faible
- un réacteur non proliférant : la possibilité de le détourner pour produire des armes nucléaires doit être quasiment exclue

Ce sont les critères demandés pour les réacteurs dits de Génération IV (forum international années 2000)

Nous y ajouterons :

- des réacteurs fournissant une énergie compétitive avec les énergies « sales » comme le charbon, si possible même moins chère, de façon à pouvoir s'y substituer

La bonne nouvelle : un tel réacteur semble possible !



Un pionnier du
nucléaire :
Alvin Weinberg
1915 – 2006
Directeur ORNL
Oak Ridge



Modérateur graphite
du MSRE à Oak Ridge (1965)

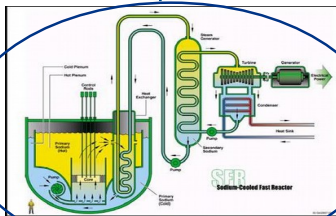
Forum International Génération 4

Forum international d'experts (GIF) créé en 2000 à l'initiative des USA pour définir les réacteurs de 4^{ème} génération

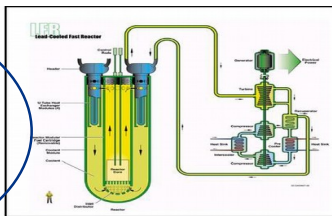
Critères de sélection:

- Économiser les ressources naturelles
- Améliorer encore la sûreté
- Minimiser la production de déchets
- Réduire les risques de prolifération
- Réacteurs économiquement rentables

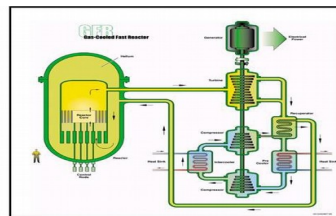
⇒ 6 concepts ont été retenus



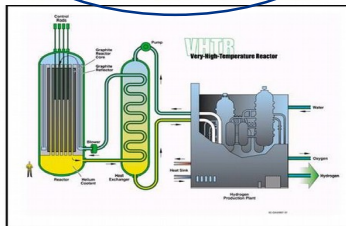
Réacteur rapide au Sodium



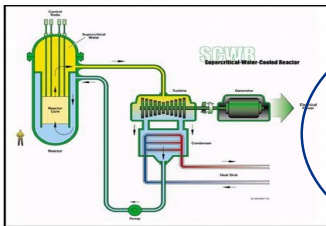
Réacteur rapide au Plomb



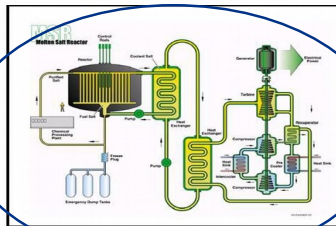
Réacteur rapide à gaz



Réacteur à gaz, Très Haute Température

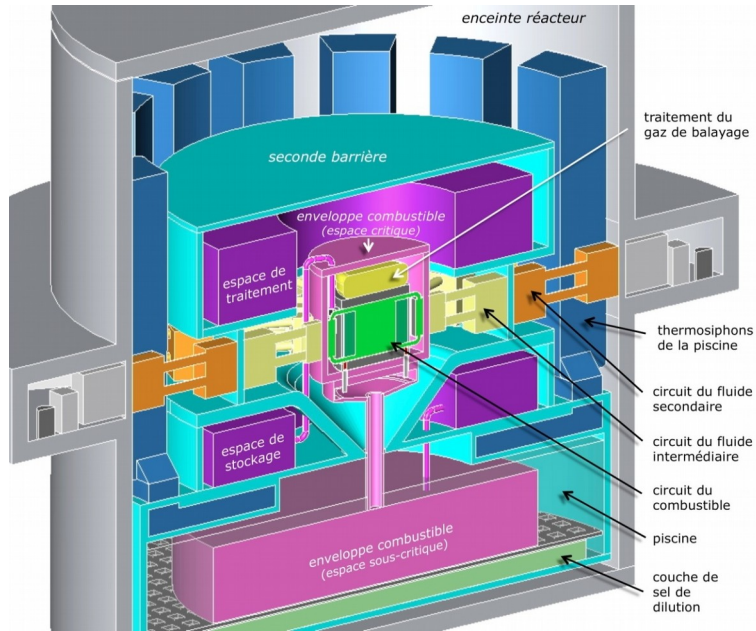


Réacteur à eau supercritique



Réacteur à sels fondus

Réacteur à sels fondus en cycle thorium (Th^{232} – U^{233})



MSFR : design de réacteur à neutrons rapides proposé par le CNRS (LPSC Grenoble) au forum international Gen IV

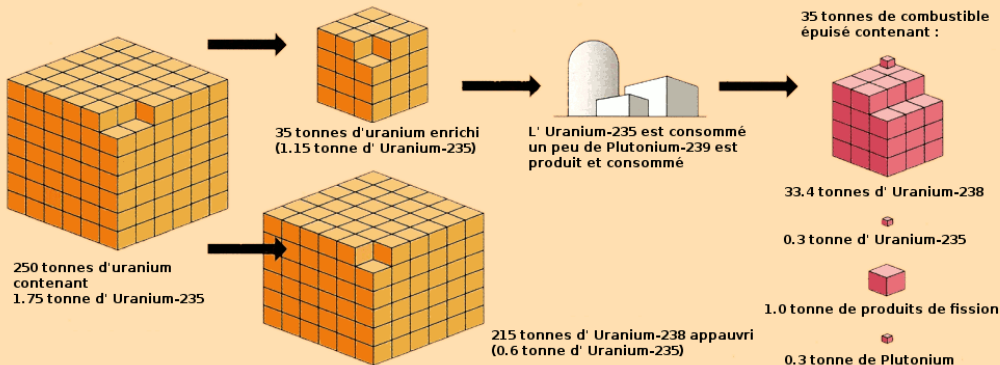
Principales caractéristiques :

- Les sels fondus (LiF + fluorures d'éléments fissiles/fertiles U , Pu , Th , ...) servent aussi de fluide caloporteur : le circuit primaire ne contient pas d'eau et fonctionne donc à pression atmosphérique
→ **sécurité très accrue**
- Les produits de fission sont retraités « en ligne » par des procédés physico-chimiques (bullage hélium...) à l'intérieur même du réacteur : celui-ci est donc en permanence beaucoup plus « propre » que les réacteurs actuels.
- Le combustible liquide étant homogène, celui-ci peut être utilisé en quasi-totalité (au delà de 99%), il n'y a plus de « pertes »

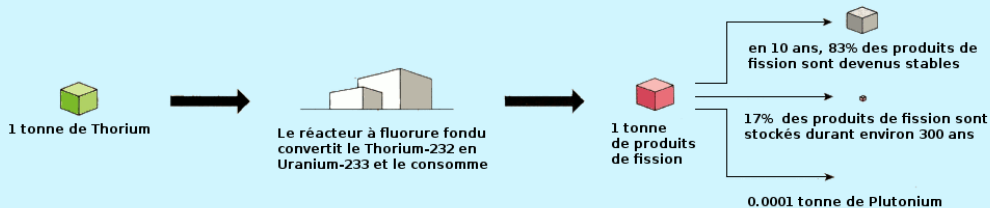
- Presque tous les produits de fission sont à durée de vie courte ou assez courte (moins de 30 ans) ; le réacteur ne produit **pratiquement plus de « transuraniens »**, déchets radioactifs à longue vie (de 1000 à 10000 fois moins!)
 - **le besoin de stockage géologique est extrêmement réduit**
- Le MSFR est capable d'incinérer en grande partie les transuraniens produits par les centrales nucléaires actuelles, donc de les valoriser tout en les éliminant !
- Le combustible irradié est impropre à la fabrication d'armements (présence d'U232 aboutissant à Tl208 → rayonnements gamma)
- Les coefficients de vide et de contre-réaction thermique sont négatifs : le réacteur est intrinsèquement stable
 - **un accident de criticité de type Tchernobyl est impossible**
- En cas d'arrêt du réacteur, une vidange par gravité des sels et un refroidissement thermique passif suffisent
 - **un accident de type Fukushima est impossible**

Comparaison de la production de déchets (REP vs MSFR)

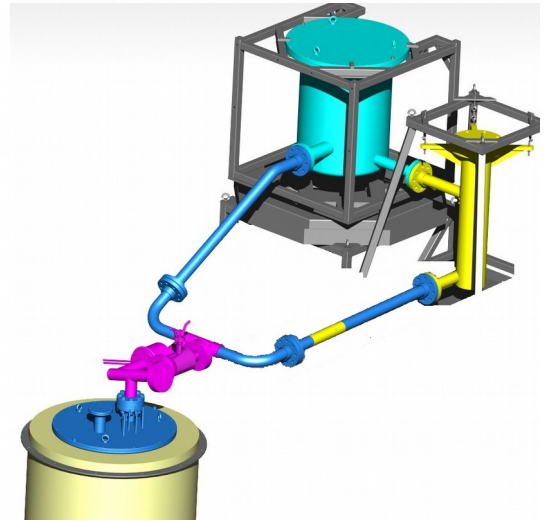
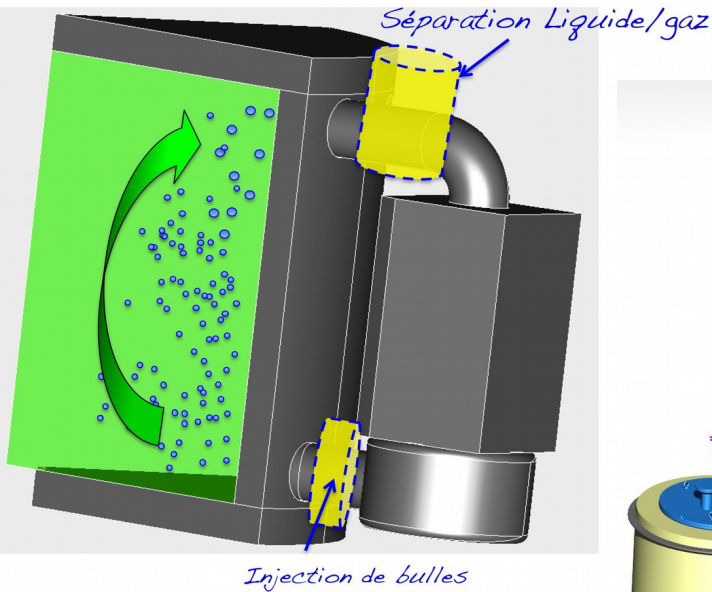
réacteur à uranium et eau pressurisée



réacteur à fluorure de thorium fondu



Retraitement chimique en ligne et bullage



RSF : résultats et travaux en cours

Configuration MSFR de référence

Sel initial : 77,5% ${}^7\text{LiF}$ + 22,5% (Th+fissile) F_4
Température de fonctionnement : 625 à 775 °C
Puissance : 3 GW_{th} (1,4 GW_{él})

Inventaire initial d' ${}^{233}\text{U}$ par Gw_{él} : 3600 kg
Alimentation en Th par Gw_{él} : 1100 kg par an

Diamètre intérieur du cœur : 2,26 m
Hauteur du cœur : 2,26 m

Volume de sel combustible : 18 m³

- 1/2 dans le cœur
- 1/2 dans les échangeurs et tuyaux

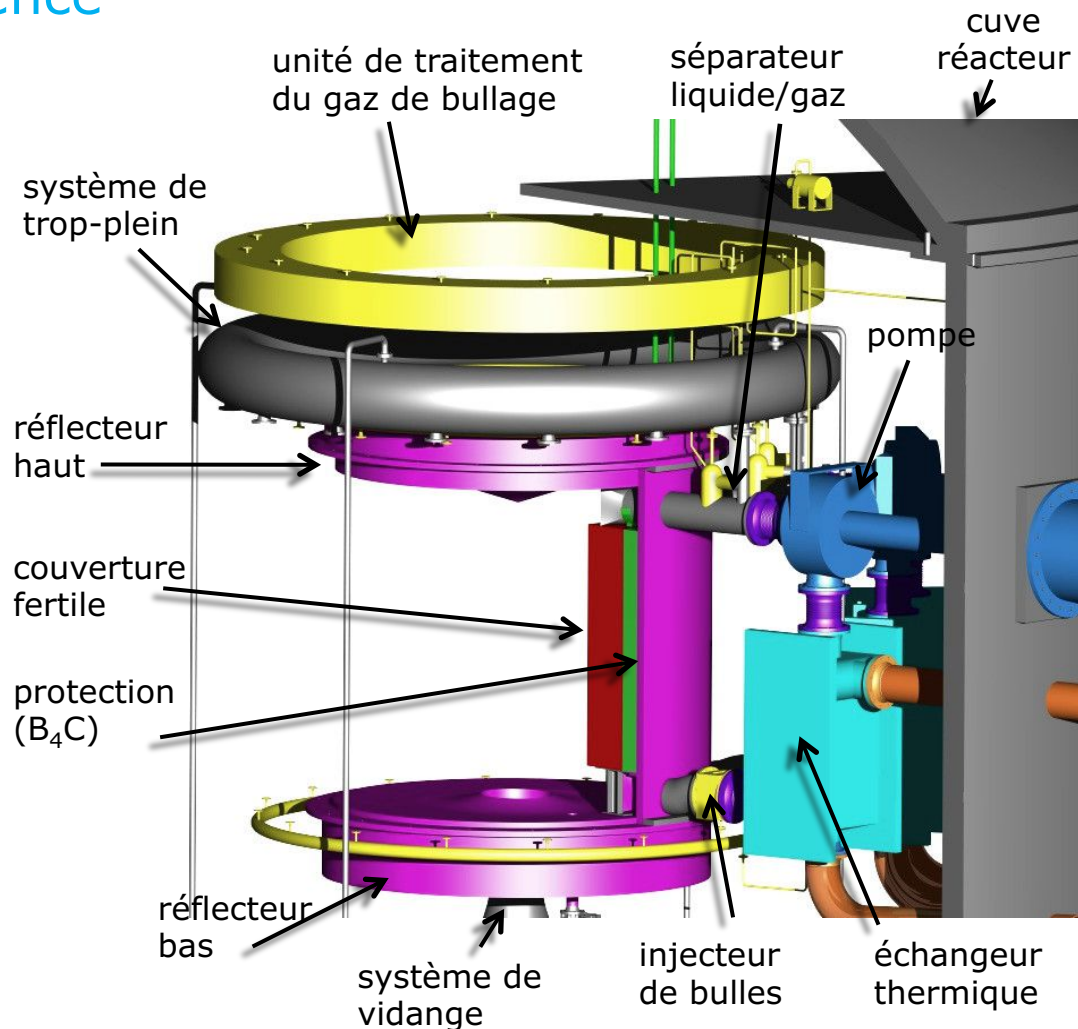
Puissance volumique : 330 W/cm³

Coefficient de contre réaction: de ≈ -5 pcm/K

Retraitement du cœur : 10 à 40 l/j

Production d' ${}^{233}\text{U}$: 52 à 90 kg/an

Temps de doublement : 98 à 56 ans



Et le coût de ces réacteurs ?

Outre les caractéristiques techniques exceptionnelles qui précèdent, il faut observer que le thorium est abondant, et ne nécessite aucun enrichissement préalable.

De plus, le réacteur à sels fondus est de petite taille (18 m^3), et n'a pas besoin de multiples enceintes de confinement. On peut même remplacer les lourdes machines à vapeur par des turbines à gaz fonctionnant à l'air atmosphérique (cycle Brayton)

Tous ces éléments laissent penser que le MSFR pourrait à terme devenir l'une des sources d'énergie les moins chères, sinon la moins chère (le physicien américain Robert Hargraves estime qu'à terme son coût pourrait être de 60 % de celui induit par les combustibles fossiles)

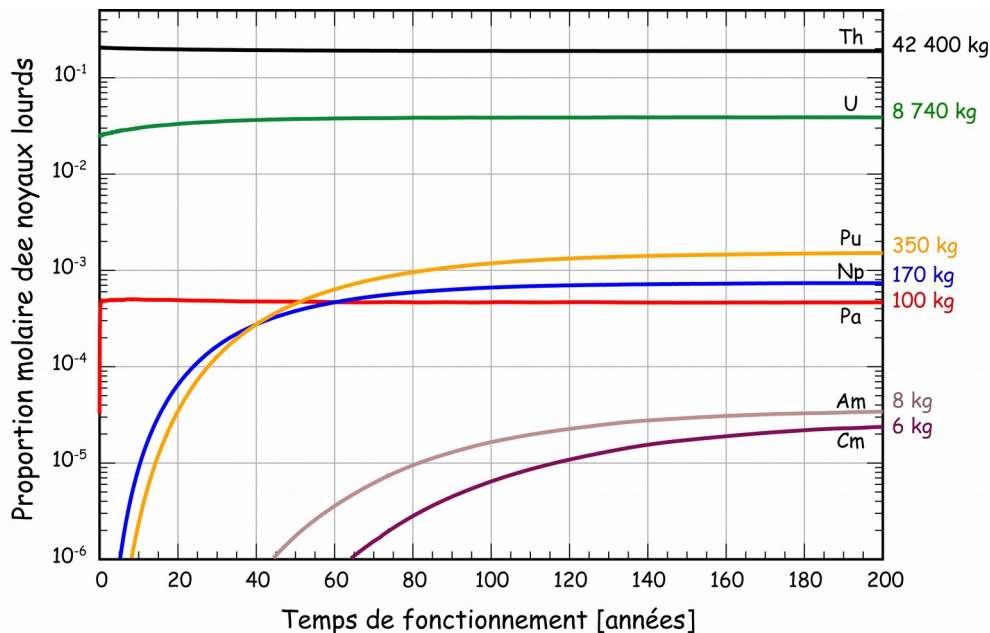
Challenges techniques

Les besoins de R & D couvrent un vaste domaine à l'interface entre la physique, la chimie, l'informatique et les mathématiques

- Il faut extrapoler à des réacteurs de taille industrielle les résultats expérimentaux américains des années 1960 :
- modélisations numériques
- optimisations géométriques
- couplages thermique – neutronique (EDP)
- résistance des matériaux
- chimie des sels fondus et de nombreux composés

Depuis janvier 2011, la Chine a créé à Shanghai un Institut de Physique dédié à la technologie des réacteurs à sels fondus, avec un budget de quelques centaines de millions de Dollars. L'Europe doit faire de même !

Résultats de simulations numériques pour le cycle Th-U : évolution dans le temps des transthoriciens (E. Merle-Lucotte)



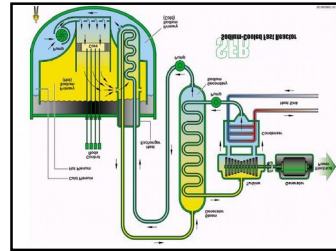
Réacteurs de 4^{ème} Génération : RNR-Na ou MSFR

C'est le concept qui a le plus de retour d'expérience

En France: Rapsodie, Phénix et Superphénix

Mais aussi en Russie, Japon, USA, Allemagne et Royaume Uni

- Un seul est encore en service (BN600 Russe de Beloyraski)
Fonctionne à l'uranium enrichi en moyenne à 20%
- Un est à l'arrêt (Chine) et un en arrêt prolongé (Monju280, Japon)
- 2 sont en construction (PFBR500 Inde, BN800 Russie)



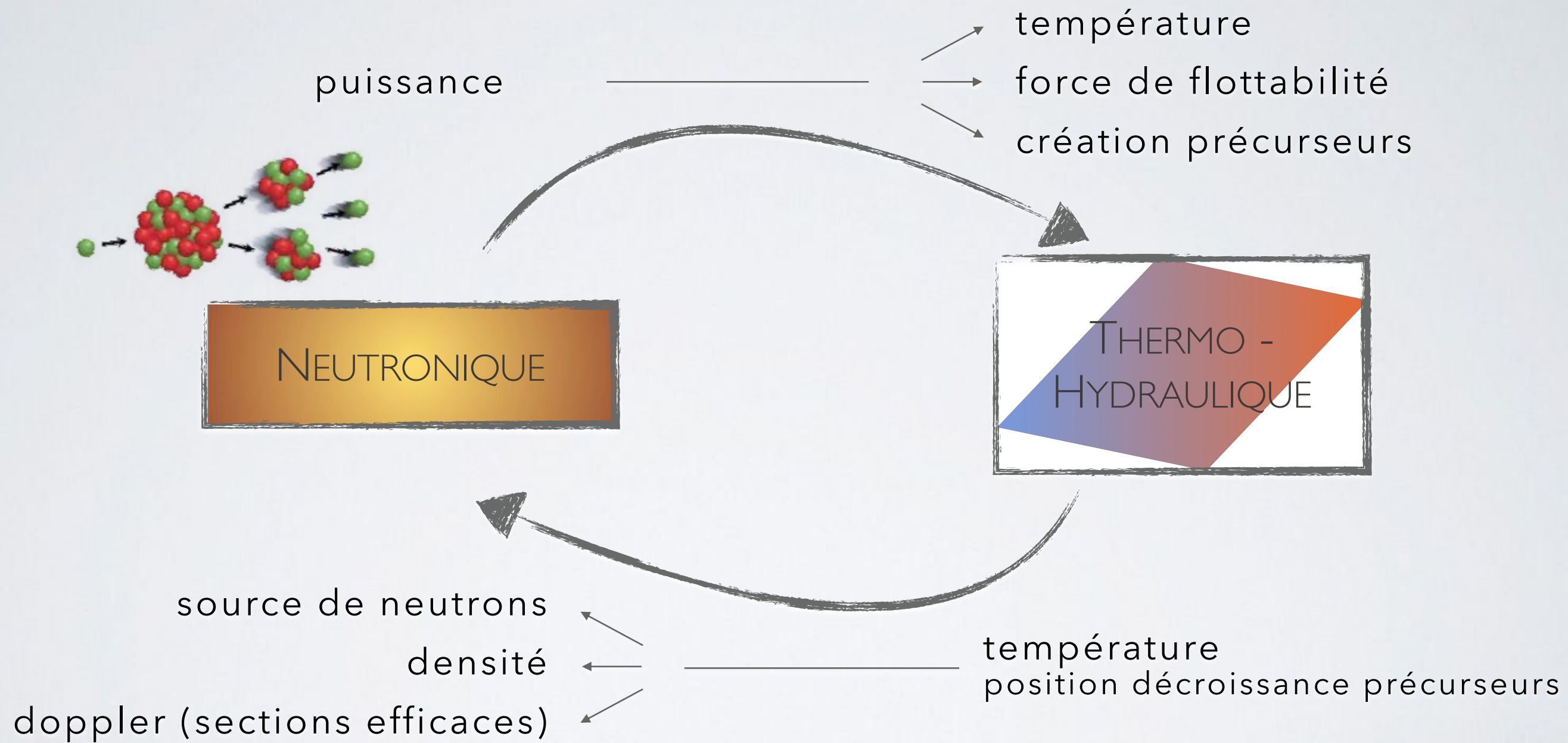
Ce type de réacteur pose quelques gros problèmes technologiques

- Le sodium s'enflamme au contact de l'air ou de l'eau
Incendies sodium maîtrisables (sans eau !) mais très violents
- Le coefficient de vide d'un réacteur de puissance est positif ce qui peut entraîner un accident de réactivité
 - Pour résoudre ce problème, le cœur doit permettre la fuite des neutrons
Géométrie complexe et nécessité d'un inventaire fissile très important
- Régénération obtenue grâce à une couverture fertile très proliférante (^{239}Pu pur) en cycle U-Pu

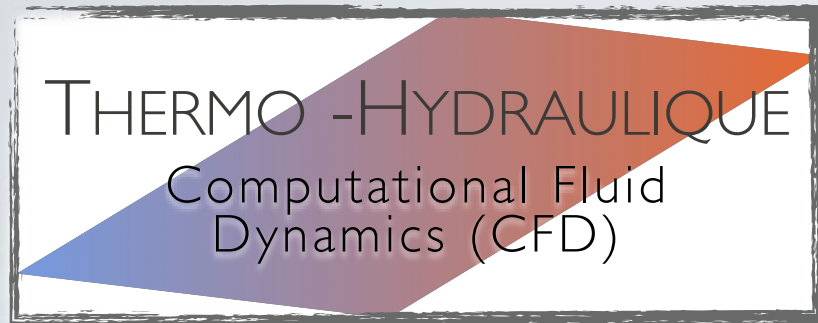
OUTILS DE CALCULS DE TRANSITOIRE DU MSFR : APPROCHE DES MATRICES DE FISSION

AXEL LAUREAU

I. PROBLÉMATIQUE DU COUPLAGE NEUTRONIQUE - THERMOHYDRAULIQUE



I. PROBLÉMATIQUE DU COUPLAGE NEUTRONIQUE - THERMOHYDRAULIQUE



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

densité vitesse

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla (p) + \nabla \cdot (\underline{\underline{\tau}}) + \rho \mathbf{f}$$

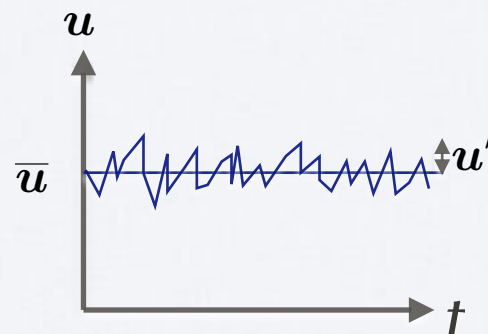
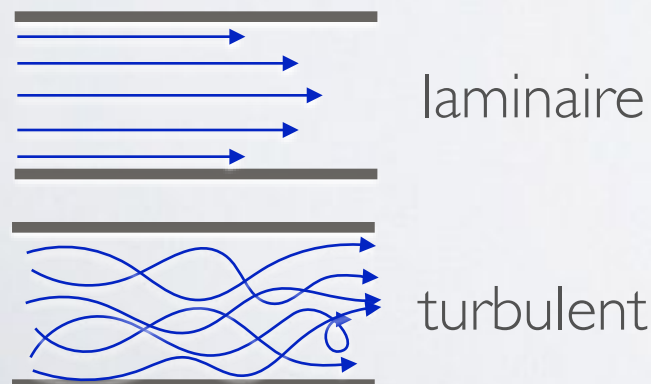
quantité mouvement pression tenseur des contraintes forces extérieures

énergie interne et cinétique

$$\frac{\partial \rho \left(e + \frac{\mathbf{u}^2}{2} \right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \left(e + \frac{\mathbf{u}^2}{2} \right) \mathbf{u} \right) = -\nabla \cdot (p \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\underline{\underline{\tau}} \cdot \mathbf{u}) + \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{u} - \nabla \cdot (\mathbf{q})$$

transfert de chaleur

« Quand je rencontrerai Dieu, je lui demanderai deux choses : pourquoi la relativité, et pourquoi la turbulence ? Je suis sûr qu'il aura une réponse à la première question... »
Werner Heisenberg



$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' && \text{vitesse} \\ p &= \bar{p} + p' && \text{pression} \\ e &= \bar{e} + e' && \text{énergie} \\ T &= \bar{T} + T' && \text{température} \end{aligned}$$

moyenne résolue fluctuation modélisée

II. APPROCHE DE LA RÉACTION EN CHAÎNE PAR SUCCESSION DE GERBES

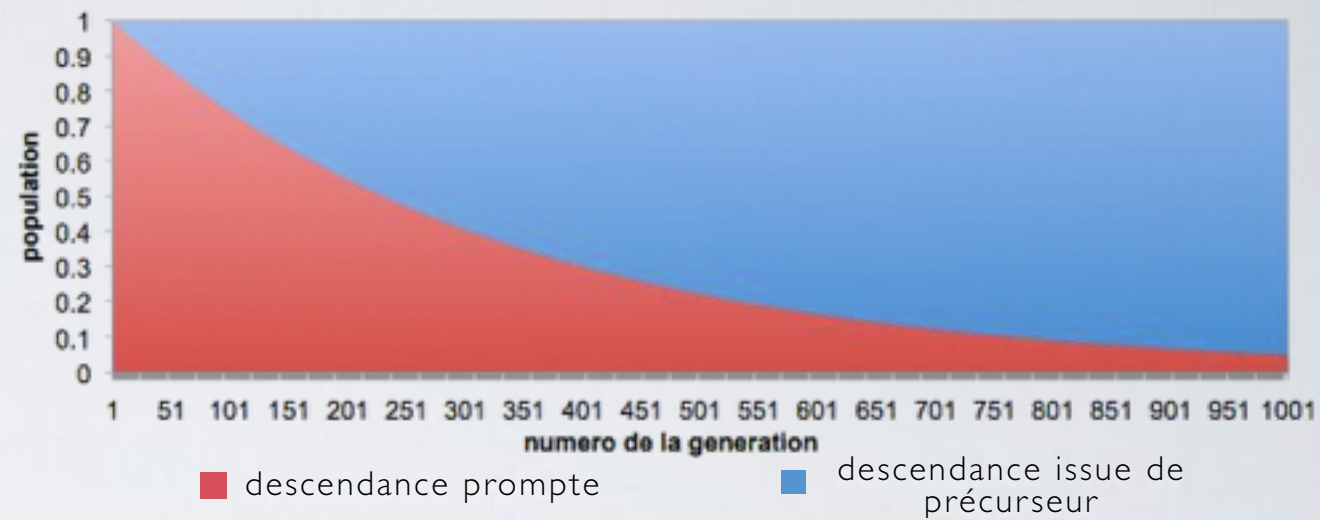
Réacteur
critique

=

Système
sous - critique
prompt

+

Source
extérieure de
neutrons :
les neutrons retardés



$$k_p + \beta_{\text{eff}} = 1$$

$$k_p < 1$$

T&H

GERBE PROMPTE ISSUE D'UN PRÉCURSEUR

décroissance
de précurseur

neutron
retardé

génération 1

génération 2

génération 3

prompt₁

prompt₂

prompt₃

...

précurseur₁

précurseur₂

précurseur₃

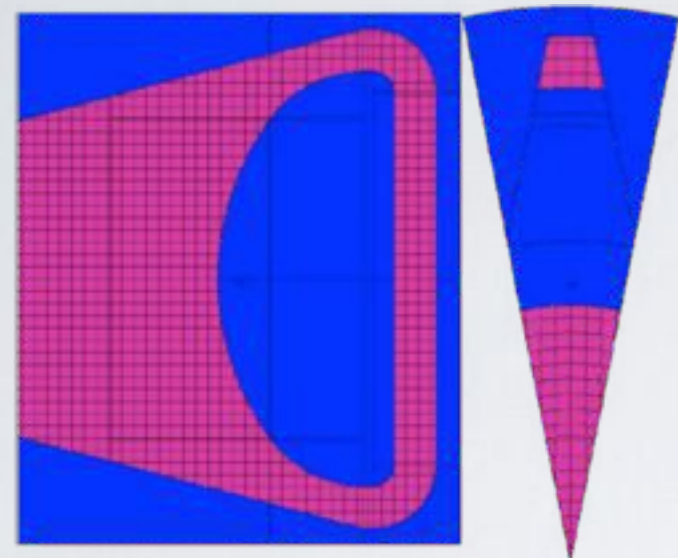
Condition d'équilibre :
la gerbe issue de la décroissance
d'un précurseur crée, en
moyenne, un nouveau précurseur

$$\sum_{g=1}^{\infty} \text{precurseur}_g = 1$$

représentative du flux en réacteur !

II. APPROCHE DE LA RÉACTION EN CHAÎNE PAR SUCCESSION DE GERBES

ÉTUDE STATIONNAIRE :

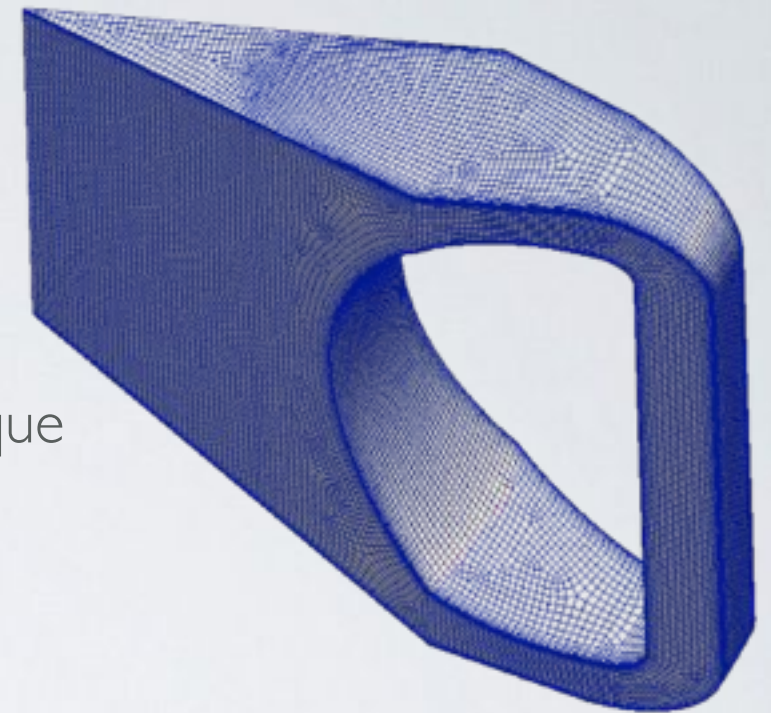


MCNP

neutronique

thermo-hydraulique

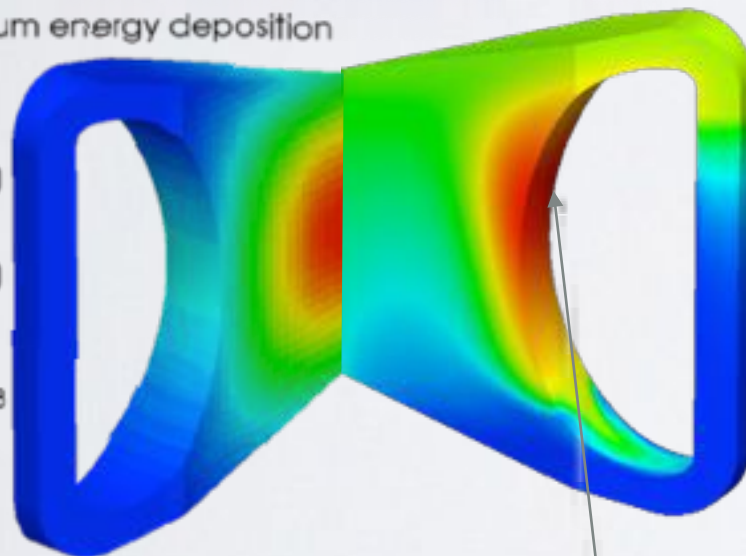
OPENFOAM



$\text{MeV/m}^3/\text{src}$

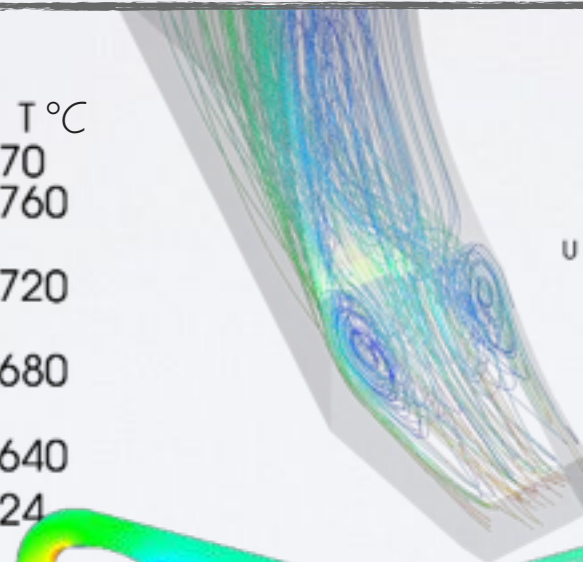
equilibrium energy deposition

59
40
20
0.0008

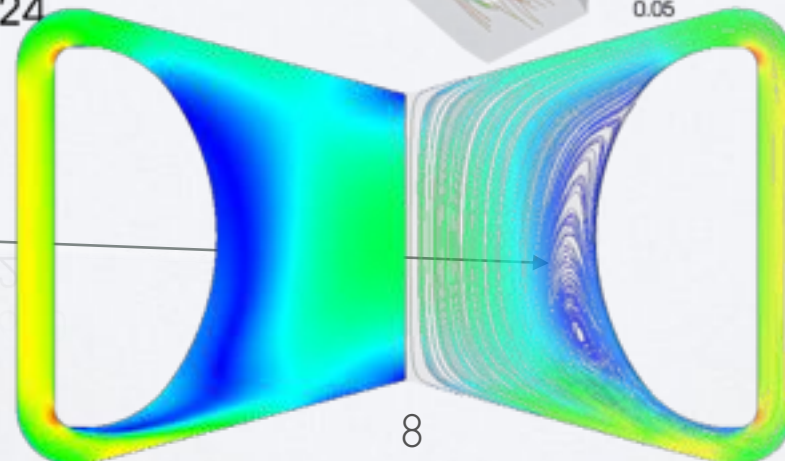


$T^\circ\text{C}$
770
760
720
680
640
624

effet de la recirculation
sur la température



U Magnitude
6.8
6
4
2
0.05
m/s



8

$\Sigma\lambda_i C_i$

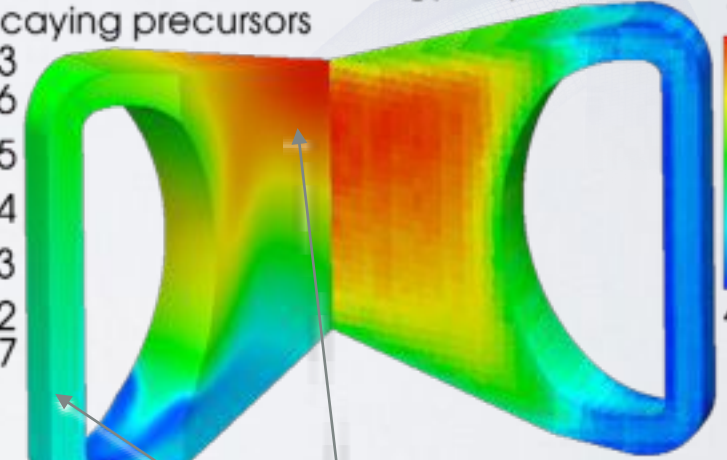
decaying precursors

1.63
1.6
1.5
1.4
1.3
1.2
1.17

U Magnitude
9
8
6
4
2
0.01
m/s

energy deposition - first cycle

17.46
15
12.5
10
7.5
5
4.073

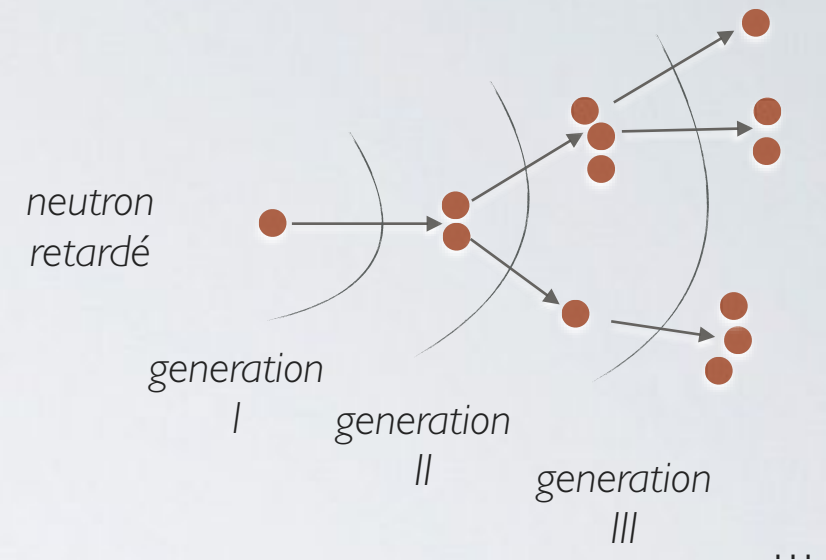


décroissance des
précurseurs
dans une zone de faible
importance

PLAN DE LA PRÉSENTATION

Pour faire des transitoires ... (suivi de charge, perte de pompe, ...)

- *La distribution des précurseurs va varier dans le temps ...*
- *Et si $k_p > 1$... gerbe prompte infinie ?*
- *Calcul Monte Carlo = temps de calcul élevé*



I. PROBLÉMATIQUE DU COUPLAGE NEUTRONIQUE - THERMOHYDRAULIQUE

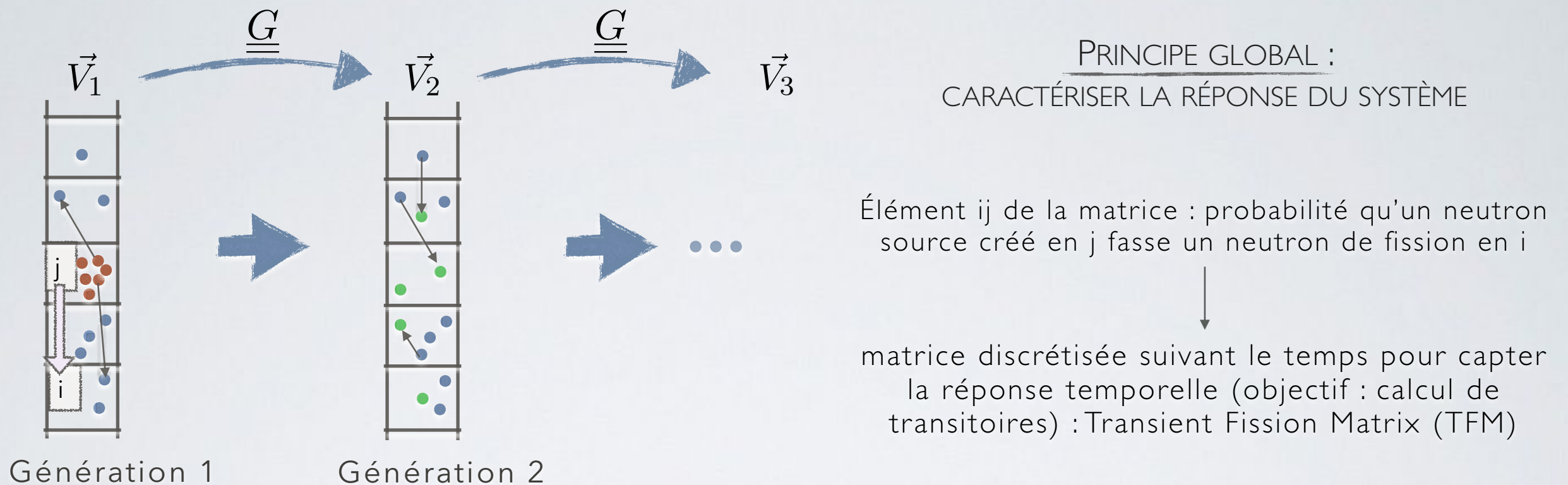
II. APPROCHE DE LA RÉACTION EN CHAÎNE PAR SUCCESSION DE GERBES

- GERBE PROMPTE
- ÉTUDE STATIONNAIRE

III. DÉCOMPOSITION DE LA GERBE PAR GÉNÉRATION

- MATRICE DE FISSION / APPROCHE TFM
- BENCHMARK TFM
- ÉTUDE DE TRANSITOIRES

III. DÉCOMPOSITION DE LA GERBE PAR GÉNÉRATION - MATRICE DE FISSION



avec $S(t, \mathbf{r})$ la distribution de source de neutrons en neutron par seconde en \mathbf{r} à l'instant t

avec $G(t' - t, \mathbf{r}', \mathbf{r})$ l'opérateur continu associé à la matrice de fission :

la probabilité qu'un neutron créé en t', \mathbf{r}' crée un nouveau neutron en t, \mathbf{r}

l'équation donnant l'évolution de la population prompte est donnée par le produit de convolution :

$$S(\mathbf{r}, t) = \int_{\mathbf{r}'} \int_{t' < t} G_{\chi_p \nu_p}(t' - t, \mathbf{r}', \mathbf{r}) \cdot S(\mathbf{r}', t') d\mathbf{r}' dt' = \langle G_{\chi_p \nu_p}(t' - t, \mathbf{r}', \mathbf{r}) | S(\mathbf{r}', t') \rangle$$

spectre énergétique
des neutrons prompts

quantité de neutron
prompt par fission

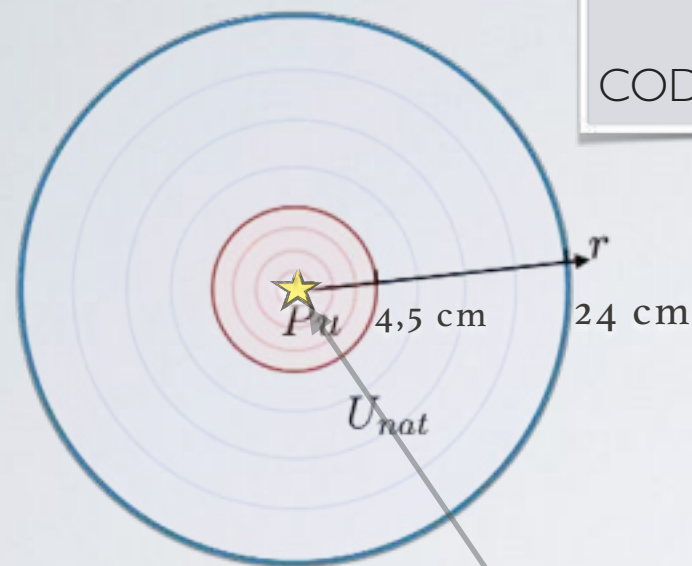
TESTONS L'ASPECT TEMPOREL AJOUTÉ À L'APPROCHE

III.

DÉCOMPOSITION DE LA GERBE PAR GÉNÉRATION

BENCH CASE

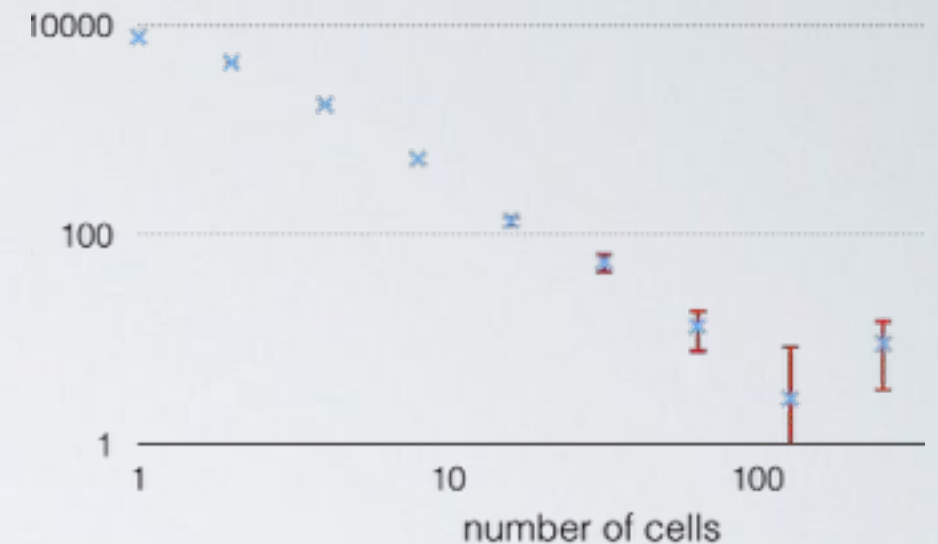
EXPERIENCE FLATTOP
CODE DE RÉFÉRENCE : SERPENT



libération d'un burst
de neutrons au centre

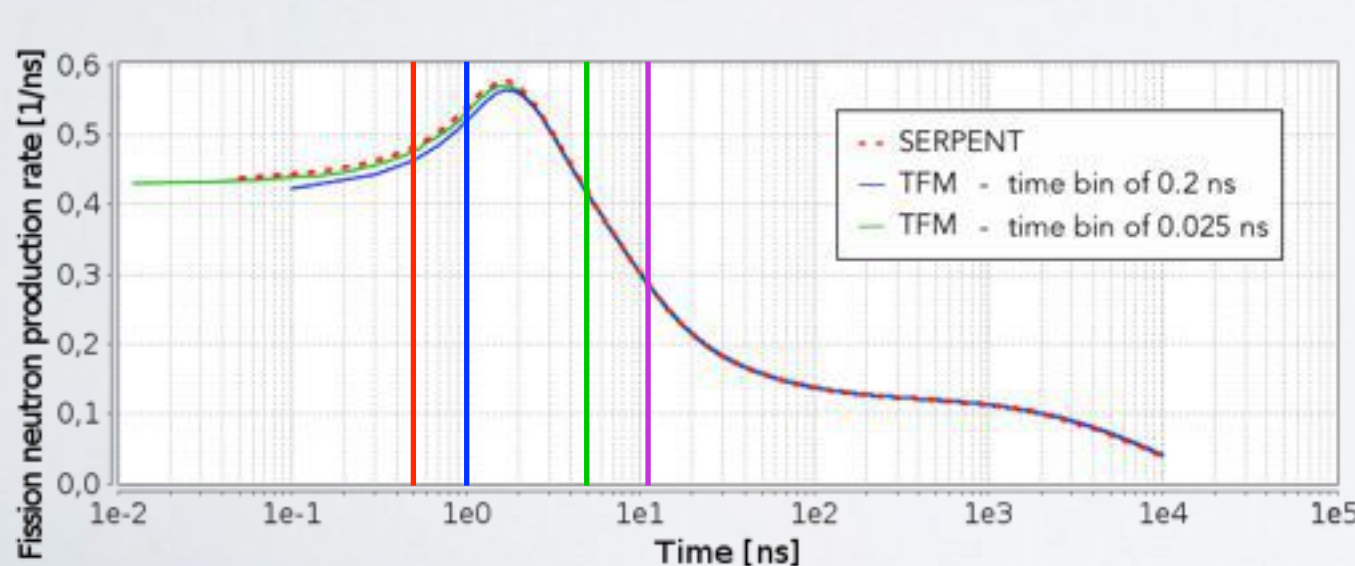
ACCORD STATIQUE (MODE FONDAMENTAL)

Δk_p - pcm
ref vs TFM

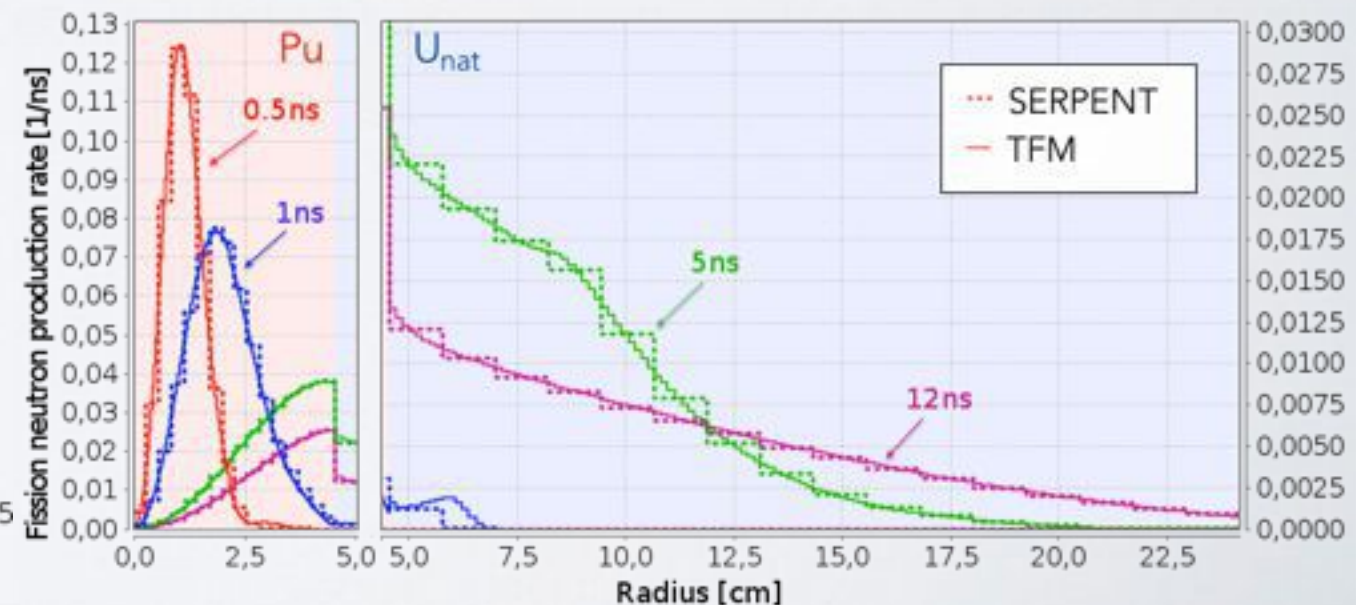


ACCORD ÉVOLUTION

$$S(t, \mathbf{r}) = \langle G_{\chi_p \nu_p}(t - t', \mathbf{r}', \mathbf{r}) | S(t', \mathbf{r}') \rangle$$



Évolution temporelle (intégrée en espace)



Évolution spatiale (à quelques instants)

AJOUTONS DES PRÉCURSEURS ...

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_i}{dt}(t, \mathbf{r}) &= \beta_i \left\langle G_{\chi_p \nu_d}(t - t', \mathbf{r}', \mathbf{r}) \middle| S(t', \mathbf{r}') \right\rangle + \beta_i \left\langle G_{\chi_d \nu_d}(t - t', \mathbf{r}', \mathbf{r}) \middle| \sum_i \lambda_i P_i(t', \mathbf{r}') \right\rangle - \lambda_i P_i \\
 S(t, \mathbf{r}) &= \left\langle G_{\chi_p \nu_p}(t - t', \mathbf{r}', \mathbf{r}) \middle| S(t', \mathbf{r}') \right\rangle + \left\langle G_{\chi_d \nu_p}(t - t', \mathbf{r}', \mathbf{r}) \middle| \sum_i \lambda_i P_i(t', \mathbf{r}') \right\rangle
 \end{aligned}$$

Annotations:
 - $\sum_i \beta_i = 1$: $\sum_i \beta_i = 1$
 - λ_i : constante de décroissance
 - $\beta_i \langle G_{\chi_p \nu_d} \rangle$: Famille i de précurseur
 - $\beta_i \langle G_{\chi_d \nu_d} \rangle$: précurseur
 - $\langle G_{\chi_p \nu_p} \rangle$: prompt
 - $\langle G_{\chi_d \nu_p} \rangle$: prompt
 - $\sum_i \lambda_i P_i$: précurseur

... ET VÉRIFIONS

method	β_{eff}	Λ_{eff}	α_{Rossi}
TFM	$182.5 \pm 0.8 \text{ pcm}$	$2.9147 \pm 0.0002 \text{ ns}$	$0.626 \pm 0.003 \mu\text{s}^{-1}$
SERPENT adjoint	$182 \pm 3 \text{ pcm}$	$2.876 \pm 0.003 \text{ ns}$	$0.63 \pm 0.0110 \mu\text{s}^{-1}$
experimental	-	-	$0.64 \pm 0.1 \mu\text{s}^{-1}$

EXPERIENCE FLATTOP

III.

DÉCOMPOSITION DE LA GERBE PAR GÉNÉRATION

ET POUR DES ÉTUDES DE TRANSITOIRES ?

problème I : équation lourde à résoudre, on simplifie : $\tilde{G}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) = \int_{t-t'} G(t-t', \mathbf{r}', \mathbf{r}) d(t-t')$

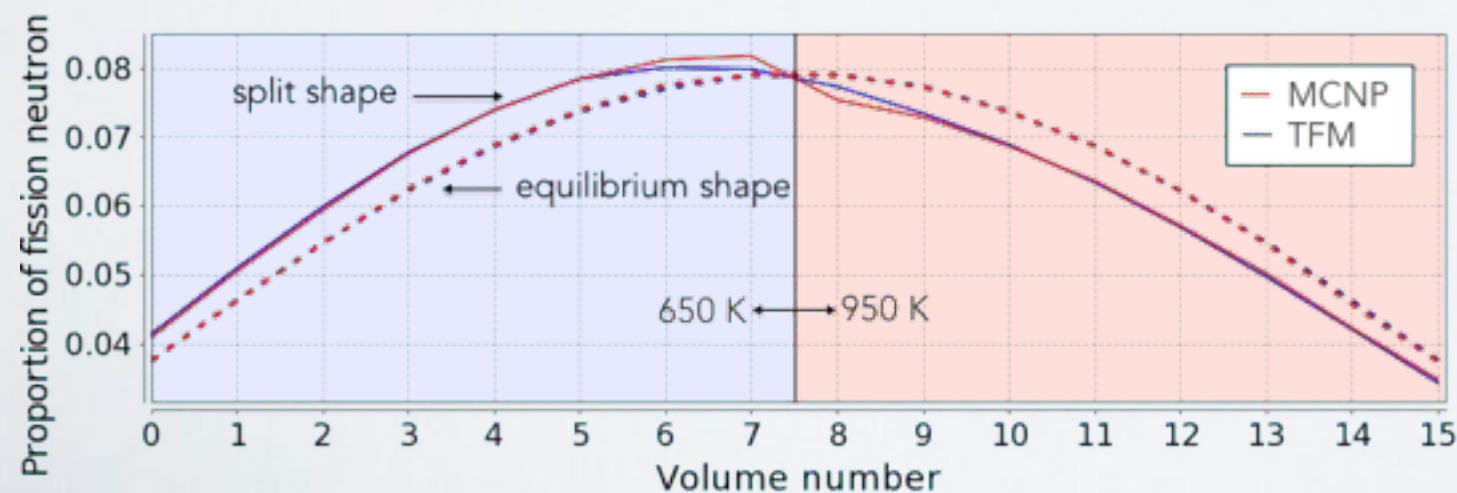
Équations simplifiées : on utilise $N(t, \mathbf{r})$ la population de neutrons et l_{eff} le temps de fission à fission

$$\begin{aligned} \frac{dP_i}{dt}(t, \mathbf{r}) &= \beta_i \left[\overset{\text{précurseur} \leftarrow}{\frac{1}{l_{eff}} \langle \tilde{G}_{\chi_p \nu_d}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) | N(t, \mathbf{r}') \rangle} + \overset{\text{précurseur} \leftarrow}{\langle \tilde{G}_{\chi_d \nu_d}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) | \sum_i \lambda_i P_i(t, \mathbf{r}') \rangle} \right] - \lambda_i P_i(t, \mathbf{r}) \\ \frac{dN}{dt}(t, \mathbf{r}) &= \underset{\text{prompt} \leftarrow}{\frac{1}{l_{eff}} \langle \tilde{G}_{\chi_p \nu_p}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) | N(t, \mathbf{r}') \rangle} + \underset{\text{prompt} \leftarrow}{\langle \tilde{G}_{\chi_d \nu_p}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) | \sum_i \lambda_i P_i(t, \mathbf{r}') \rangle} - \frac{1}{l_{eff}} N(t, \mathbf{r}) \end{aligned}$$

problème II : la température varie dans le temps ... on utilise une interpolation

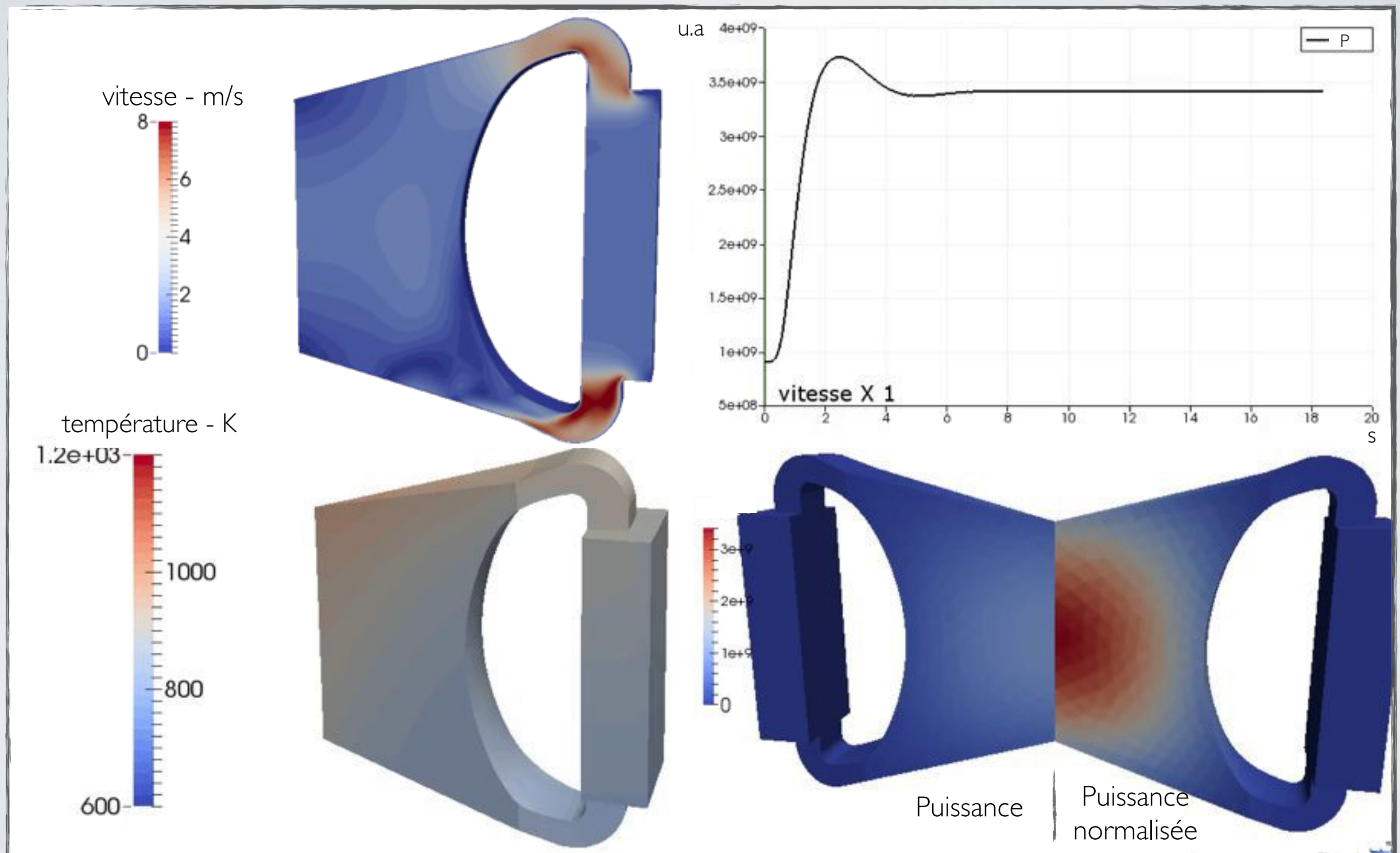
$$\tilde{G}_{interpolee}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) = \tilde{G}_{ref}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) + (T(\mathbf{r}') - T_{ref}(\mathbf{r}')) \cdot \Delta_\rho \tilde{G}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) + \log \frac{T(\mathbf{r}')}{T_{ref}(\mathbf{r}')} \cdot \Delta_{Doppler} \tilde{G}(\mathbf{r}', \mathbf{r})$$

Vérification sur un réacteur ID avec la composition du MSFR :



k_p variation : $-1121 \pm 4 \text{ pcm}$
 erreur de la prédiction: $-8 \pm 7 \text{ pcm}$

PREMIERS RÉSULTATS (PRÉLIMINAIRES) : SUR-REFROIDISSEMENT (1/16 DU MSFR)



Références

Global Footprint Network,

http://www.footprintnetwork.org/fr/index.php/GFN/page/earth_overshoot_day/

David McKay, *Sustainable Energy – without the hot air*,

<http://www.withouthotair.com/>

Daniel Heuer, *Le thorium et le nucléaire du futur*,

<https://www.youtube.com/watch?v=M4MgLixMrz8>

LPSC/CNRS/IN2P3, *Étude paramétrique des RSF et cycle thorium*, <http://lpsc.in2p3.fr/gpr/msfr.htm>

Robert Hargraves - *Thorium Energy Cheaper than Coal* @

ThEC12, <https://www.youtube.com/watch?v=ayIyiVua8cY>

John Laurie, <http://www.energiesduthorium.fr>, La fission liquide et le thorium pour un climat stable et une prospérité énergétique

John Laurie, « *La voiture nucléaire* »,

https://www.youtube.com/watch?v=bkj-vf1_pzQ