

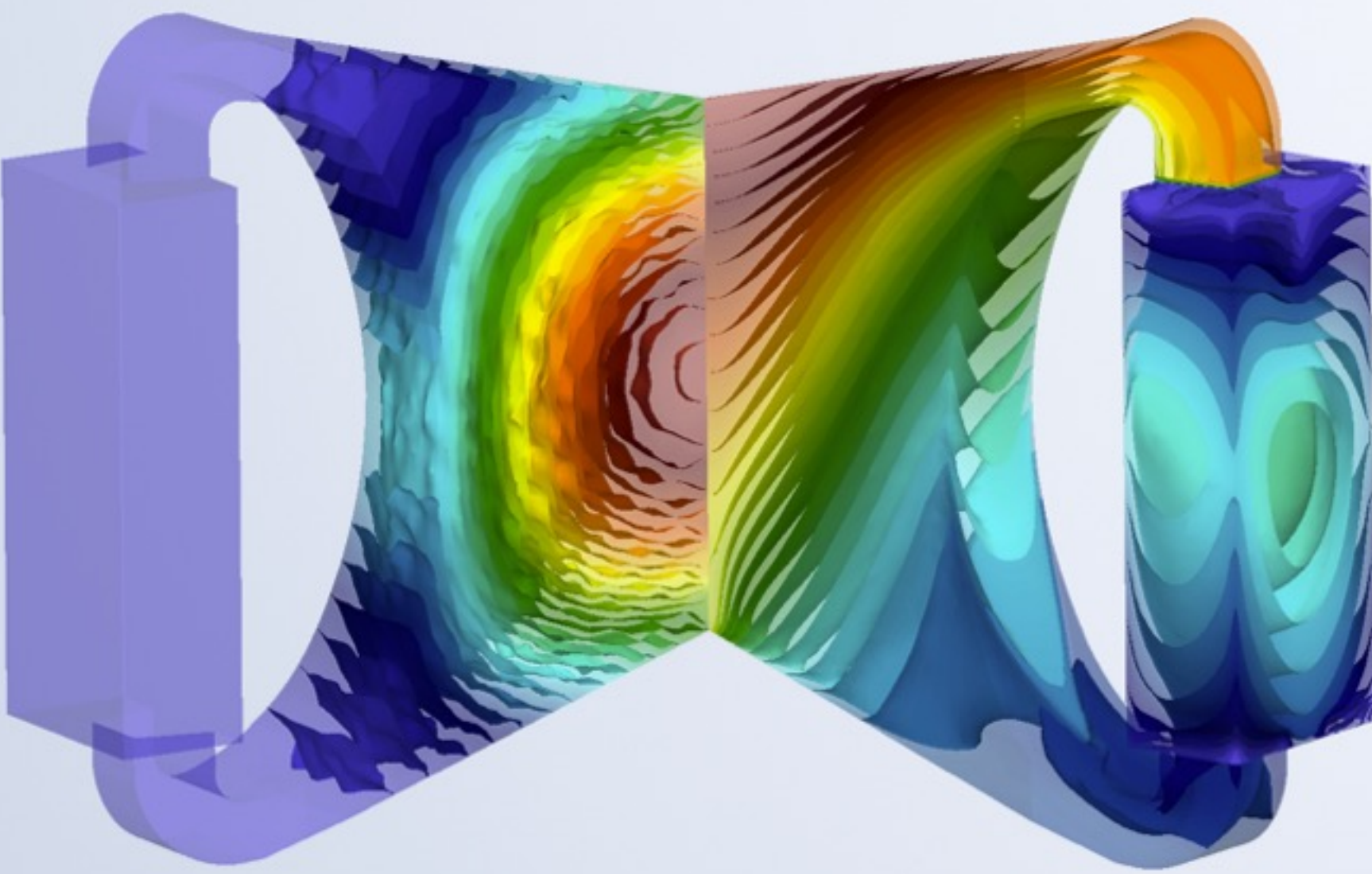
MOLTEN SALT REACTOR JOURNÉES SCIENTIFIQUES DE MASSY

PILOTAGE D'UN MSR / CONTRÔLE DE LA RÉACTIVITÉ

Axel Laureau, *on behalf of the
Grenoble MSFR-team*

Scientist collaborator at EPFL,
Laboratory for Reactor Physics and
Systems Behaviour, Switzerland

Previously PhD thesis at
LPSC-IN2P3-CNRS,
Grenoble-INP, France



Circuit combustible :

- $T_{comb} = T_{calo}$ (pas de délai)
le combustible liquide est le caloporteur
- Neutrons retardés en partie hors coeur
circulation combustible
- Pas d'empoisonnement neutronique
spectre rapide
- Bons coefficients de contre réaction
effet de densité intrinsèque
effet Doppler
50/50 $\left(\frac{dk}{dT}\right)_{total} \sim -8 \text{ pcm/K}$
- Basse pression
- Pas de barre de contrôle

Circuit intermédiaire :

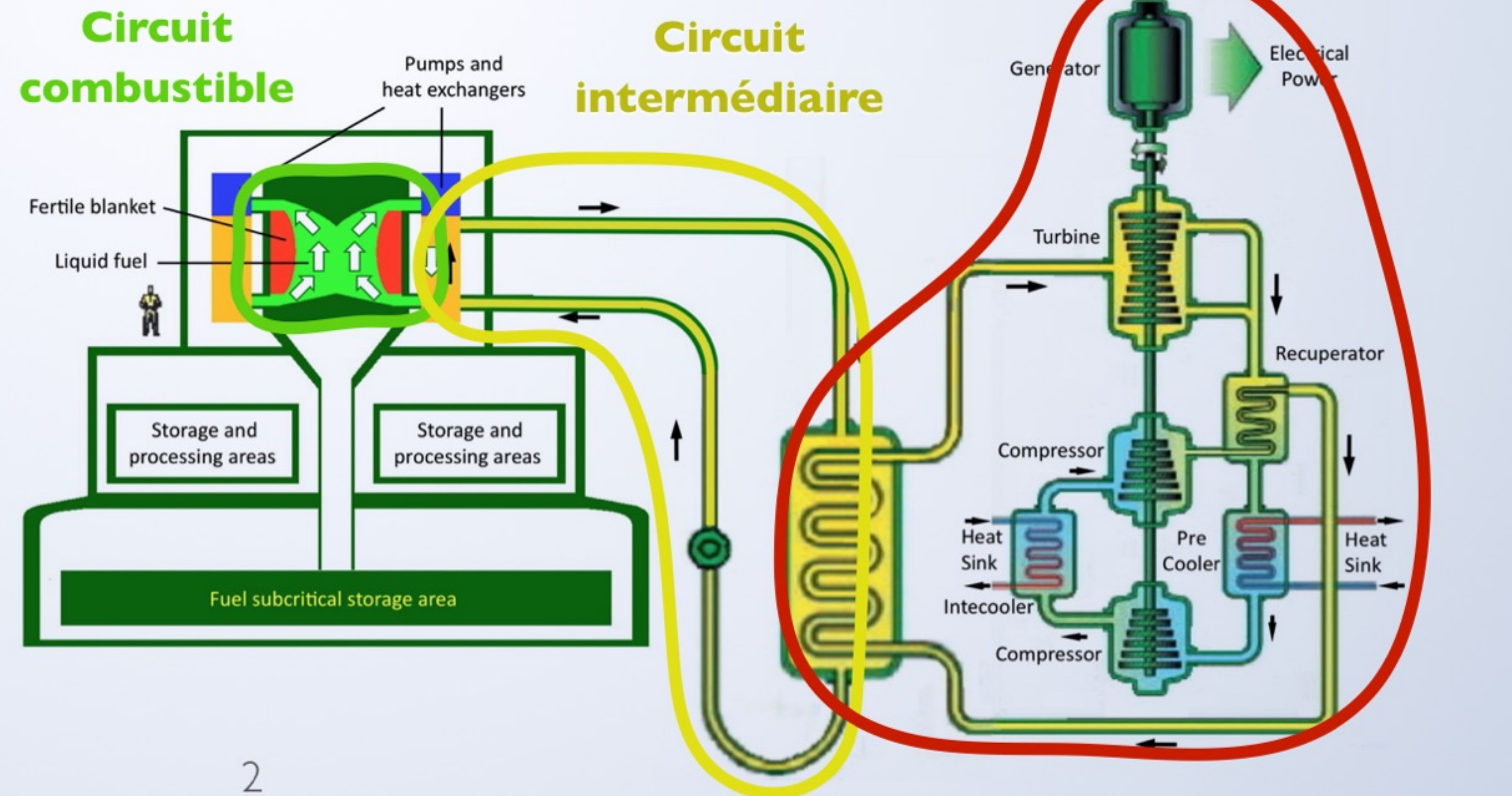
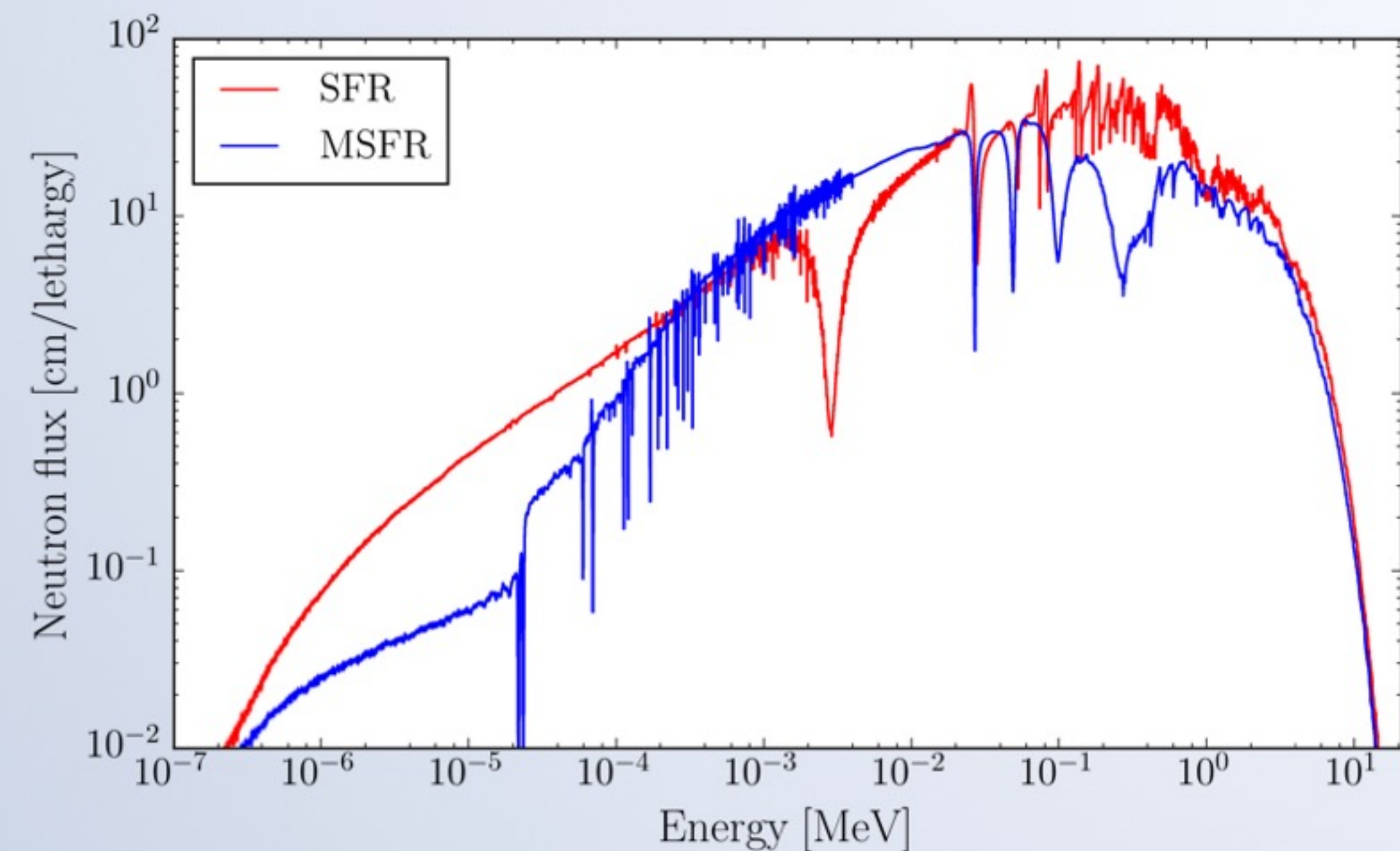
- Basse pression & haute T
Sel fondu

Circuit de conversion de l'énergie :

- Haut rendement thermique
haute température
- **Rampe de puissance** non spécifique à l'électronucléaire
à investiguer !

Max power ramp?

Circuit de conversion de l'énergie



Quels besoins en contrôle de réactivité ?

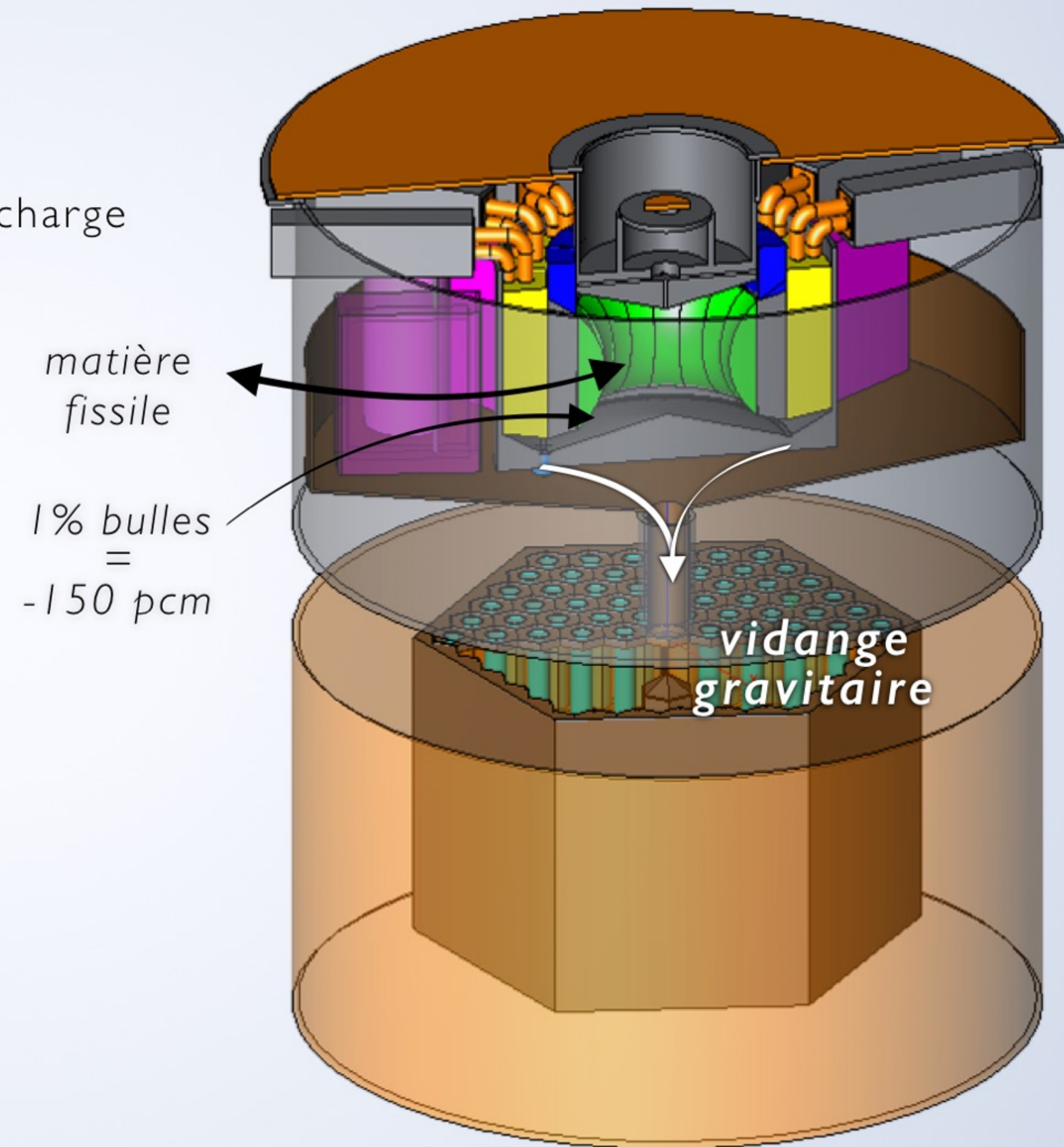
- évolution de la composition du combustible
- démarrage et arrêt du réacteur
- modification de la puissance du réacteur - suivi de charge
- contrôle du réacteur durant un accident

Quels vecteurs potentiels ?

- ajustement de la composition (lent)
- ~~barre de contrôle~~ **retrait intempestif / blocage**
- modification de la géométrie du réflecteur
- pilotage par la puissance extraite (contre réactions)
- ~~ajout de bulles en cœur~~ **panne du bullage**
- modification de la géométrie du combustible (vidange du cœur)

Problématique associée ?

- ajout d'une complexité supplémentaire
- réserve de réactivité = initiateur potentiel d'accident
plus de contrôle que nécessaire \neq augmenter la sûreté



Quels besoins en contrôle de réactivité ?

- évolution de la composition du combustible
- démarrage et arrêt du réacteur
- modification de la puissance du réacteur - suivi de charge
- contrôle du réacteur durant un accident

Problématique :

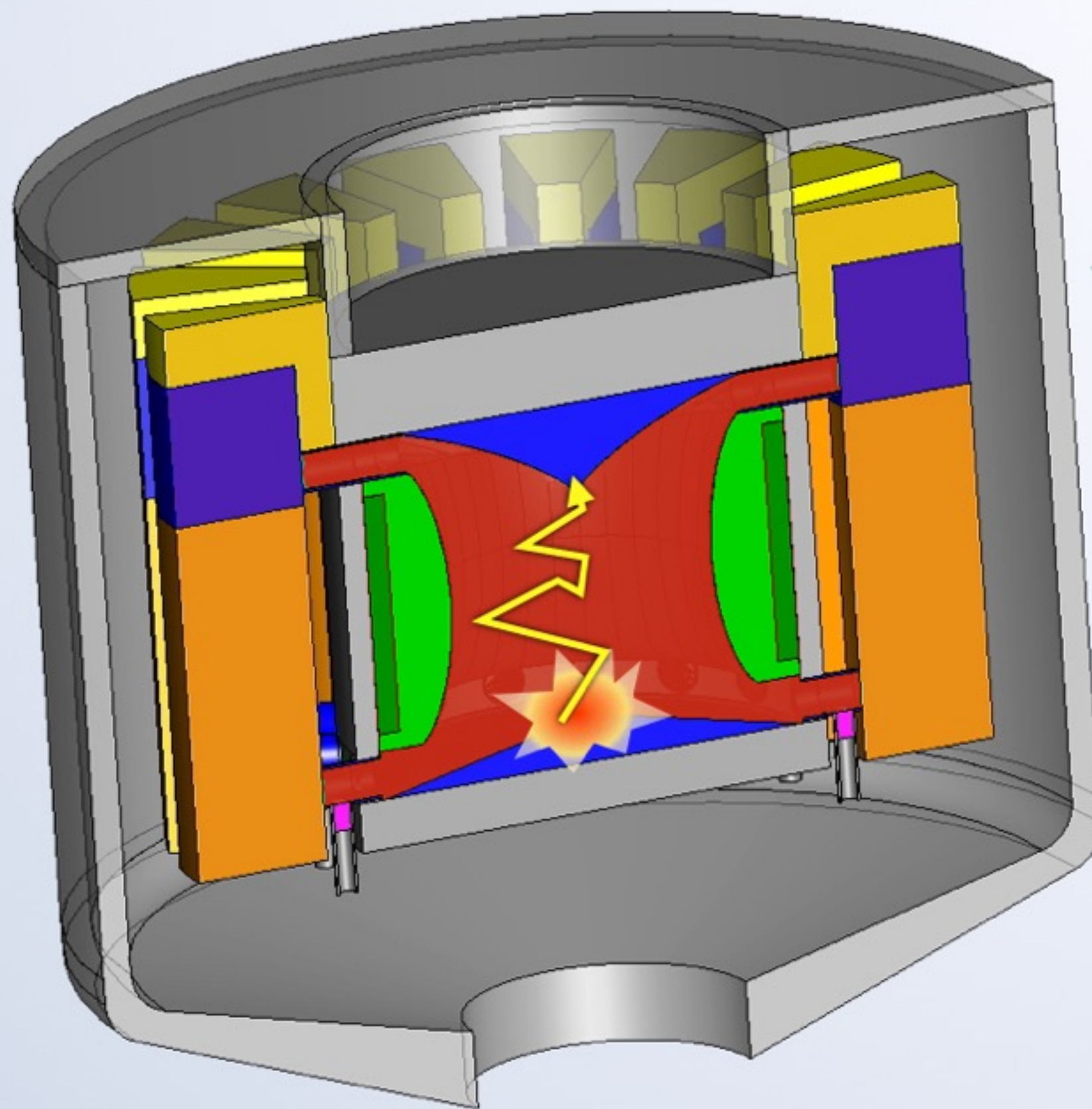
*incertitude sur les
données nucléaires*

*incertitude sur la
réactivité au démarrage*

*~2200 pcm
~275 K*

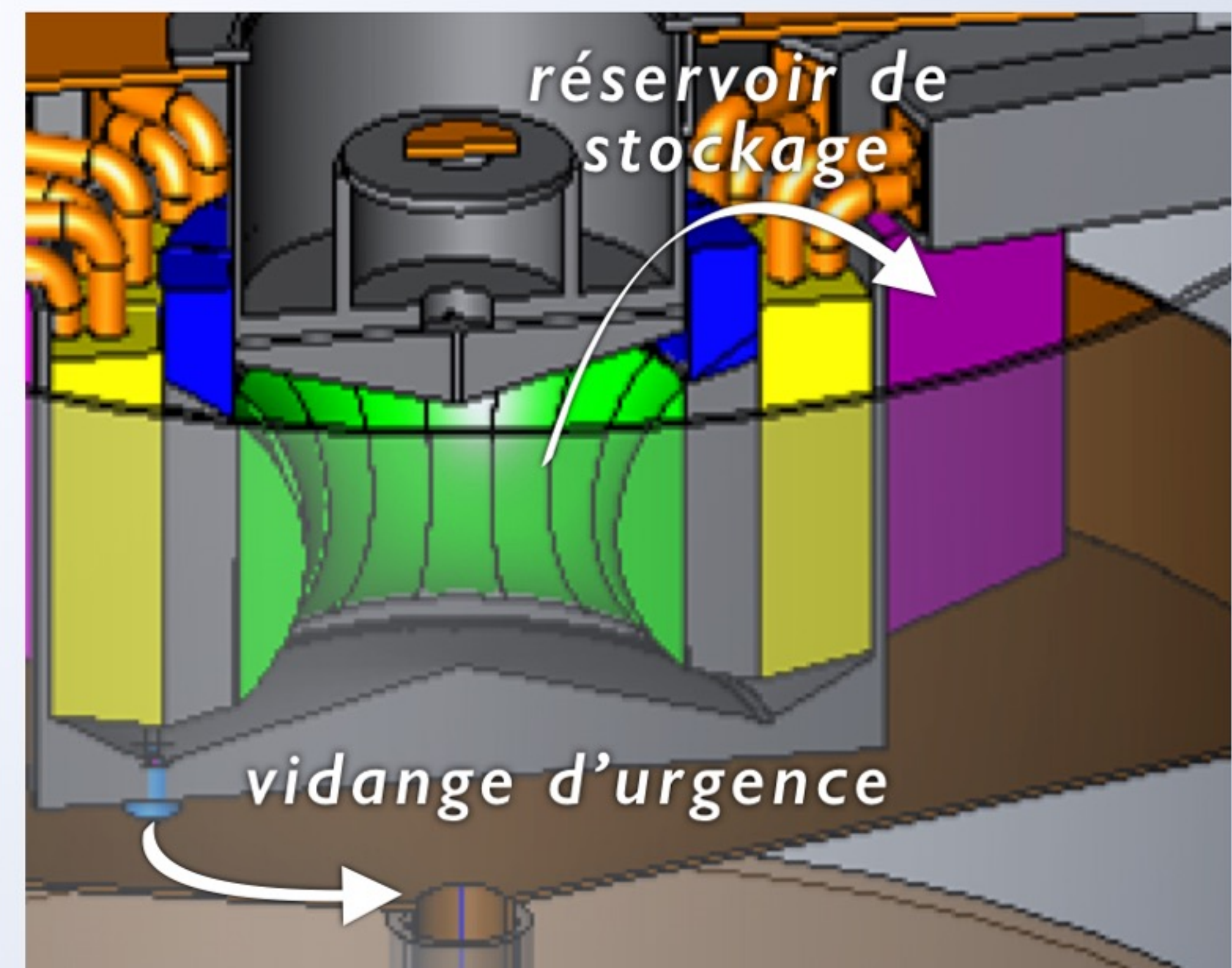
Démarrage du réacteur :

- approche sous critique : remplissage du coeur
- mesure de l'amplification de la source de neutrons : estimation dès la mi-hauteur de la réactivité finale à 250 pcm
- poursuite du remplissage et/ou ajustement de la composition injectée
- mise en circulation et refroidissement du combustible pour la divergence



Arrêt du réacteur :

- arrêt à chaud du réacteur et diminution de la puissance résiduelle (critique puissance nulle en coeur)
- si besoin : vidange du sel dans des réservoirs assurant le refroidissement et la sous criticité



SOMMAIRE

Quels besoins en contrôle de réactivité ?

- évolution de la composition du combustible
- démarrage et arrêt du réacteur
- modification de la puissance du réacteur - suivi de charge
- contrôle du réacteur durant un accident

Idée :

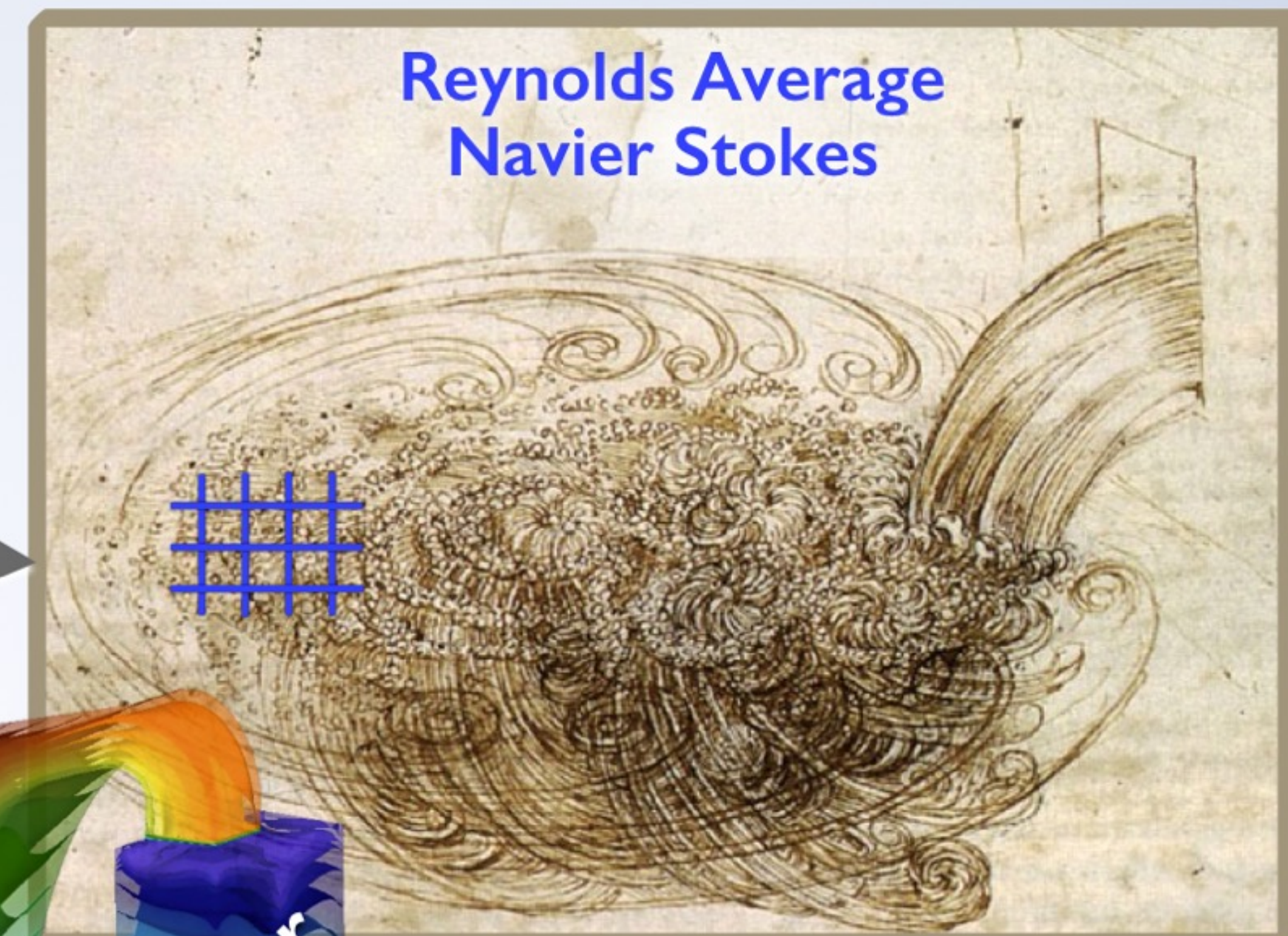
- Suivi de charge sans barre de contrôle
- Variation de puissance avec un champ de température en coeur aussi constant que possible

Pour cela plusieurs leviers disponibles parmi lesquels :

- Ajuster le débit combustible en coeur (puissance des pompes de chaque secteur)
- Ajuster le débit du fluide intermédiaire (puissance des pompes du circuit intermédiaire)
- Double bypass dans le circuit intermédiaire
 - T_{intermed} peut augmenter dans les HX_{intermed} tout en restant inchangé dans HX_{conv} circuit
- Si nécessaire : ajuster la température moyenne en coeur par une injection de bulles :
 - 3% bulles $\sim -100^{\circ}\text{C}$ grâce aux coefficients de contre réaction

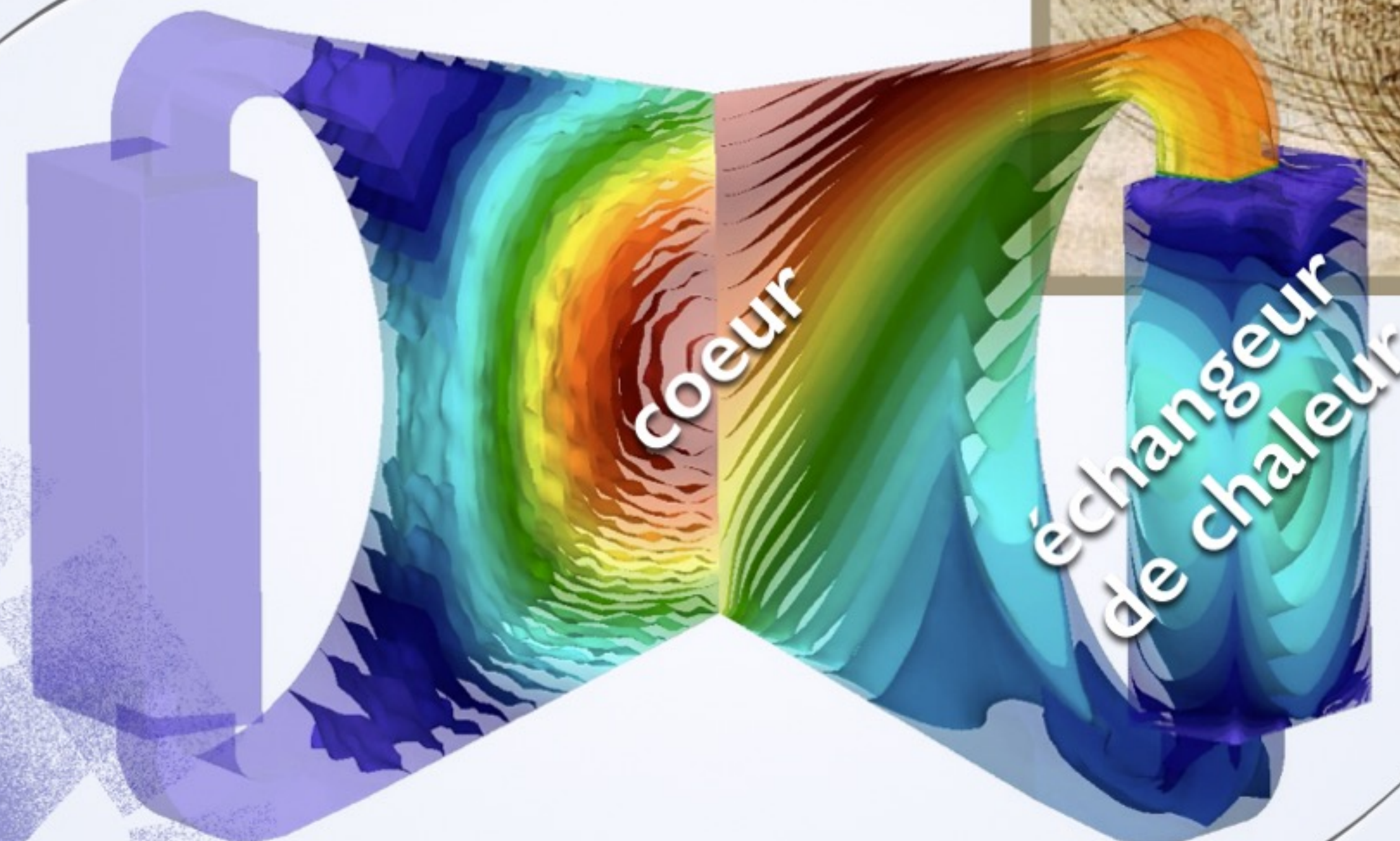
Neutronique : Transient Fission Matrix (cf. atelier)

- Calcul à la volée de l'évolution de la puissance du réacteur
- Prise en compte de la déformation de la nappe de flux due à une variation de densité/température
- Modélisation fine de l'effet du **transport des précurseurs**



[Léonard de Vinci]

distribution de puissance



distribution de température
position des précurseurs

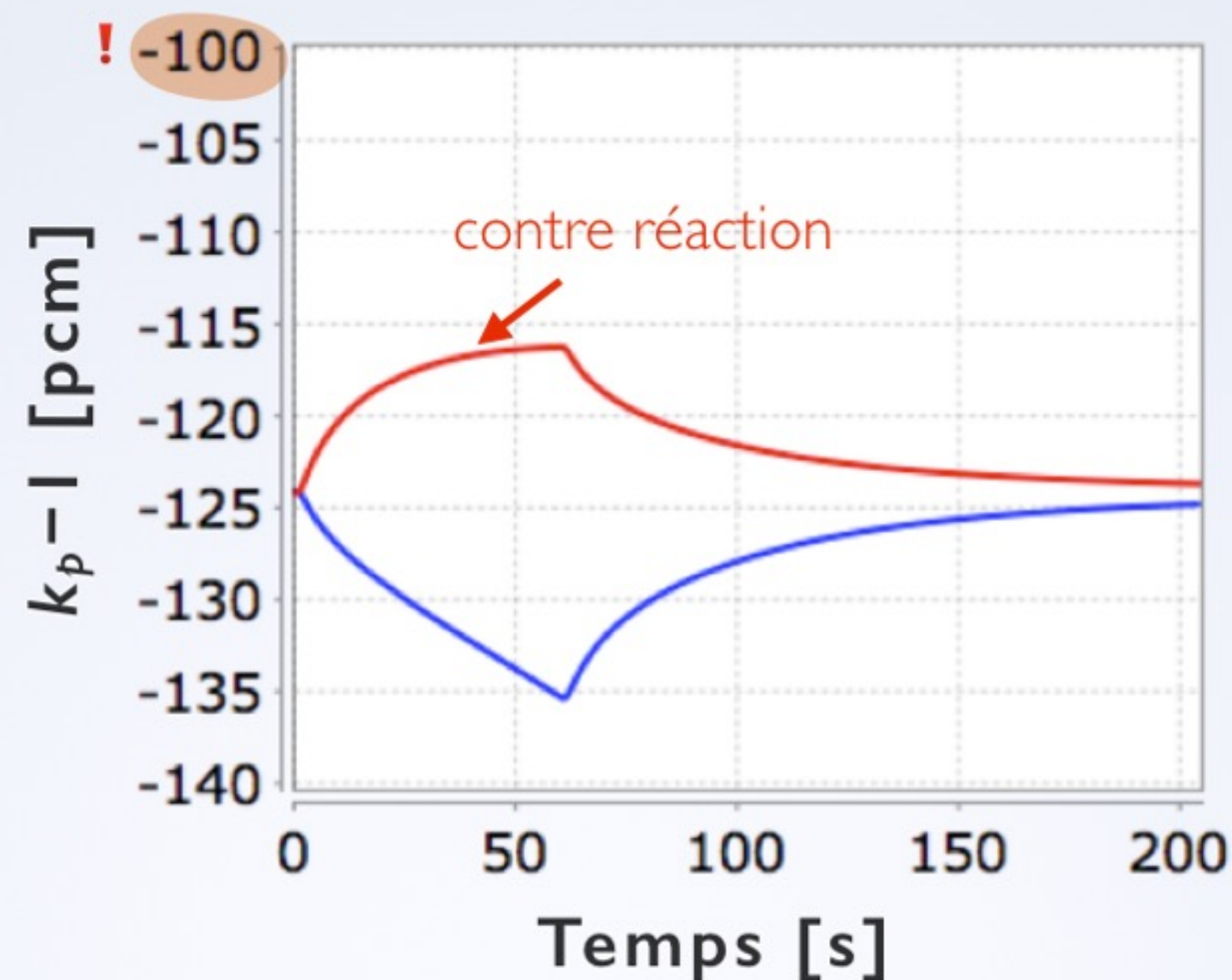
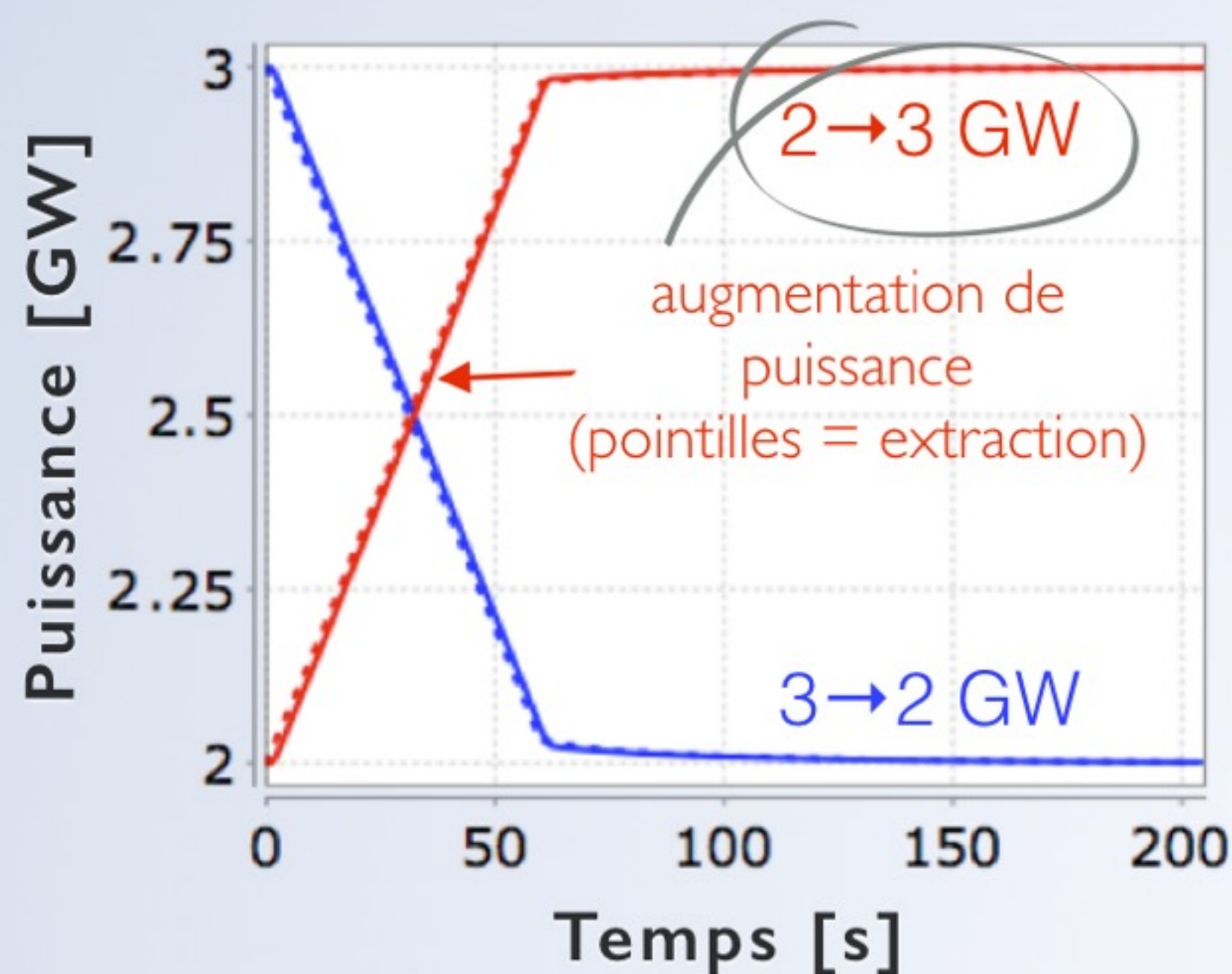
Thermohydraulique : Approche CFD

- Modélisation des petites échelles de la turbulence
- Suivi 3D du transport du sel
 - distribution de température
 - position de décroissance des précurseurs

probabilité & temps
de transport calculé
par Monte Carlo

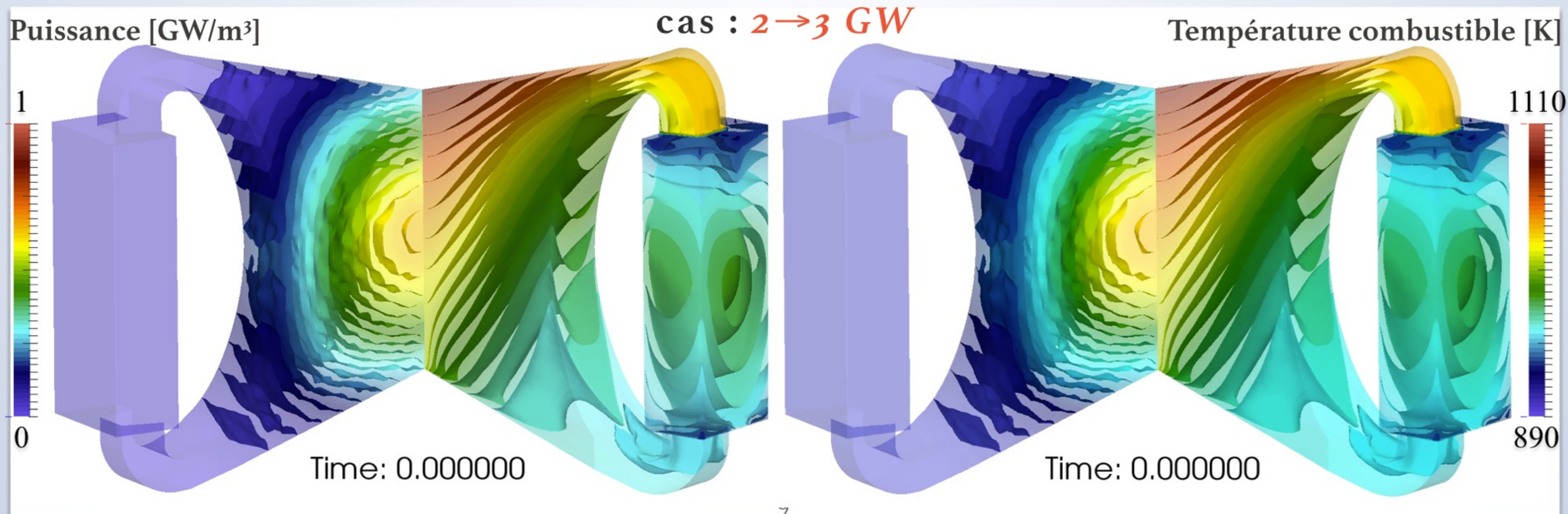
réacteur
vu de dessus

Suivi de charge piloté par les contre réactions

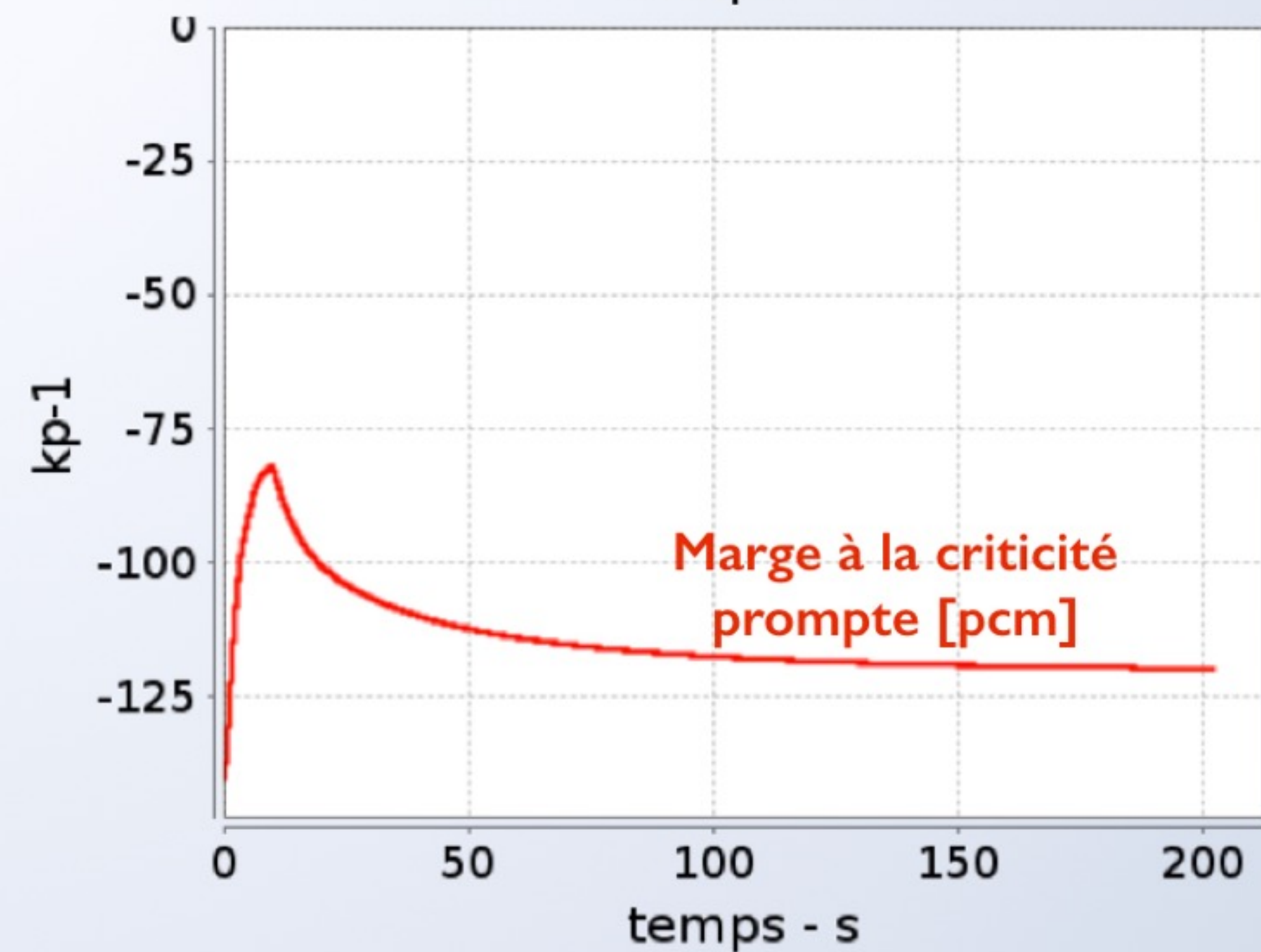
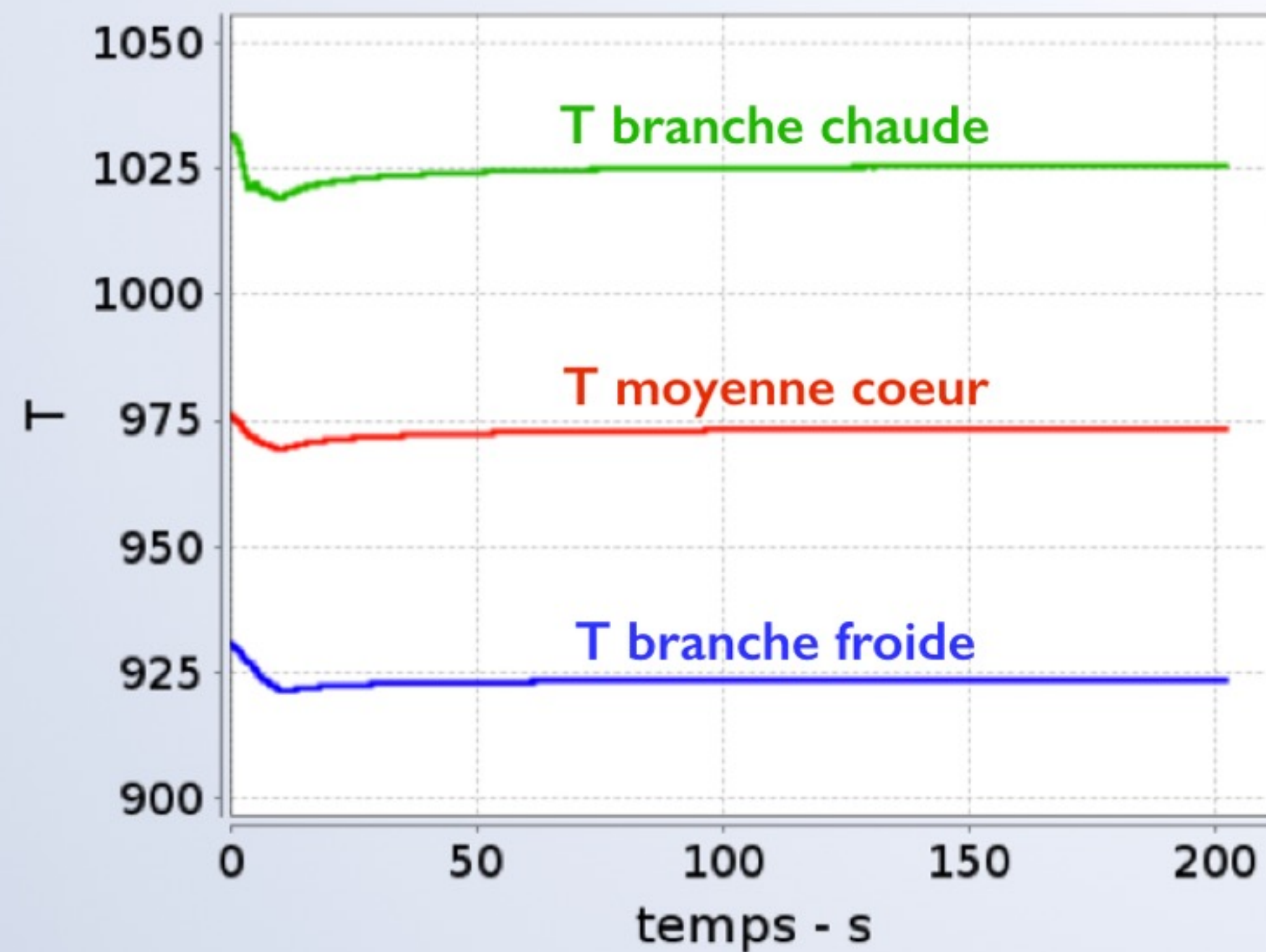
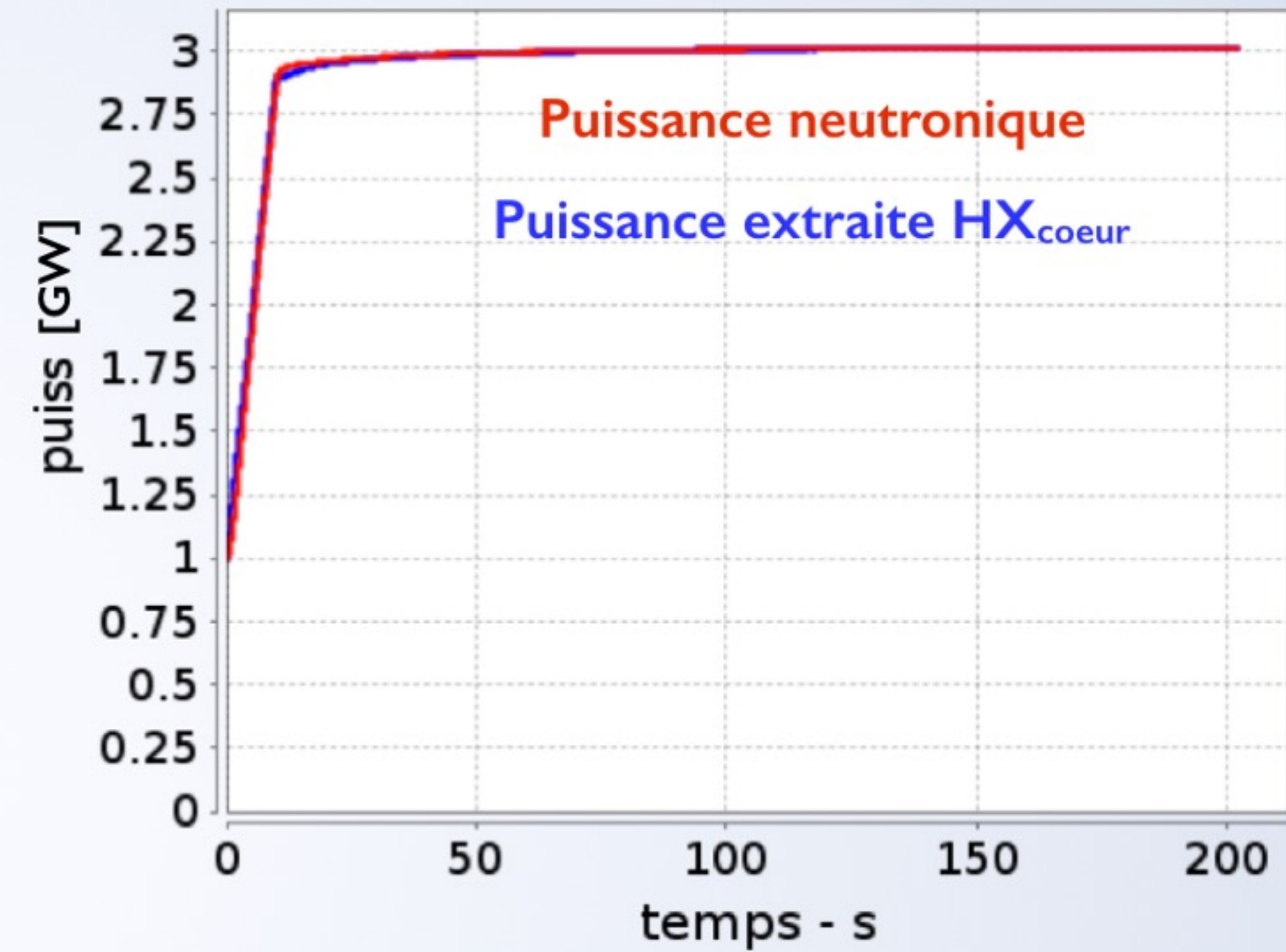
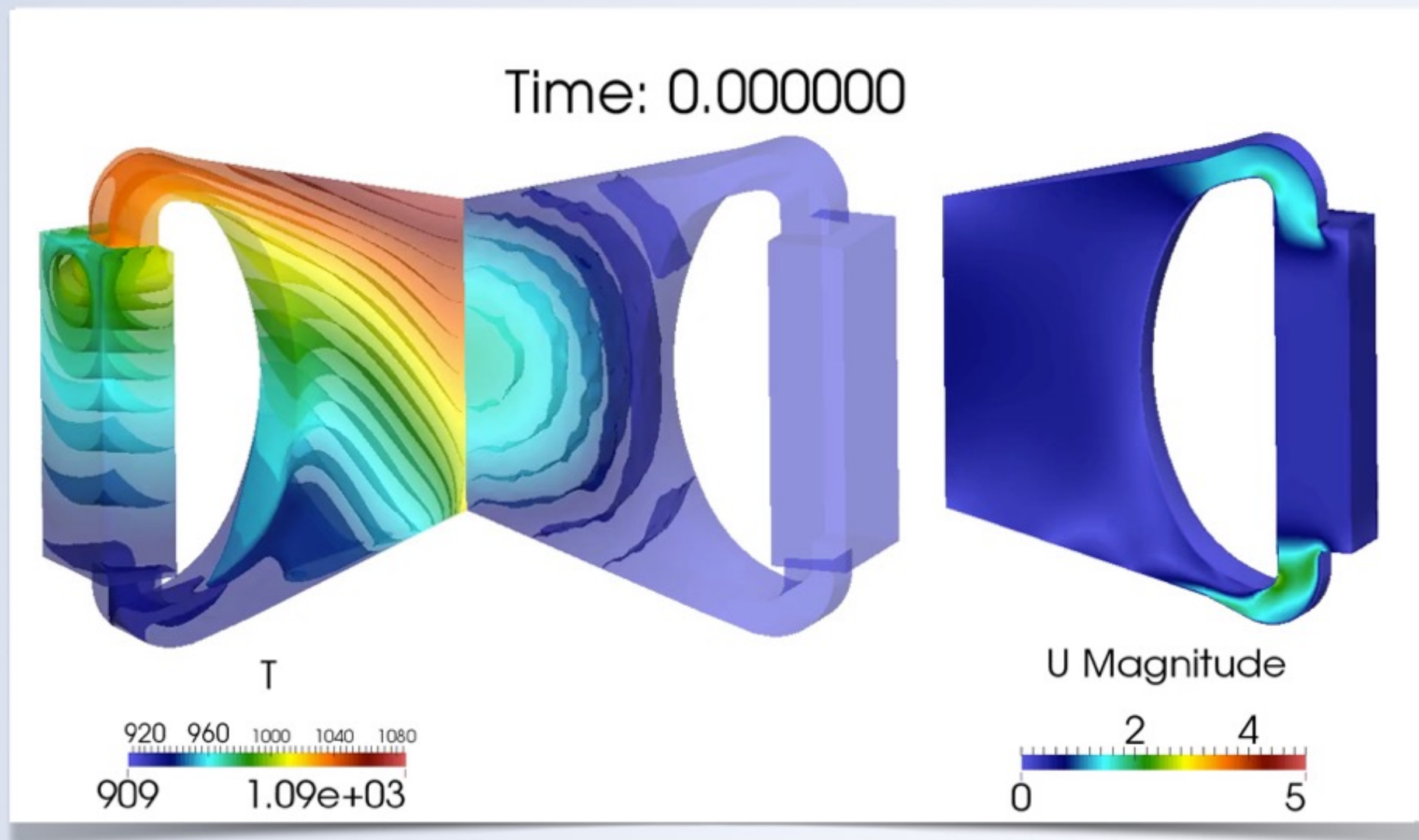


Scénario :

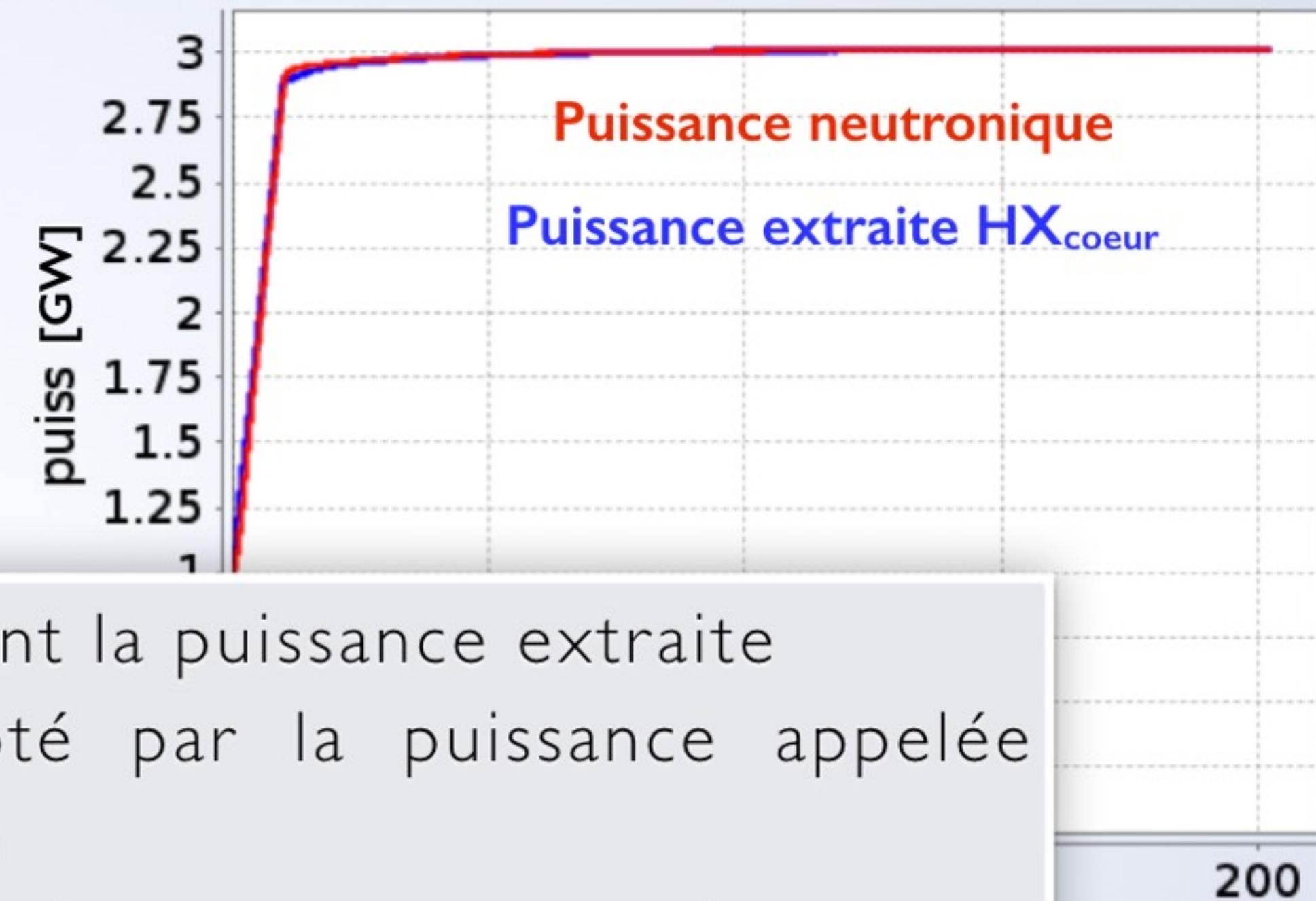
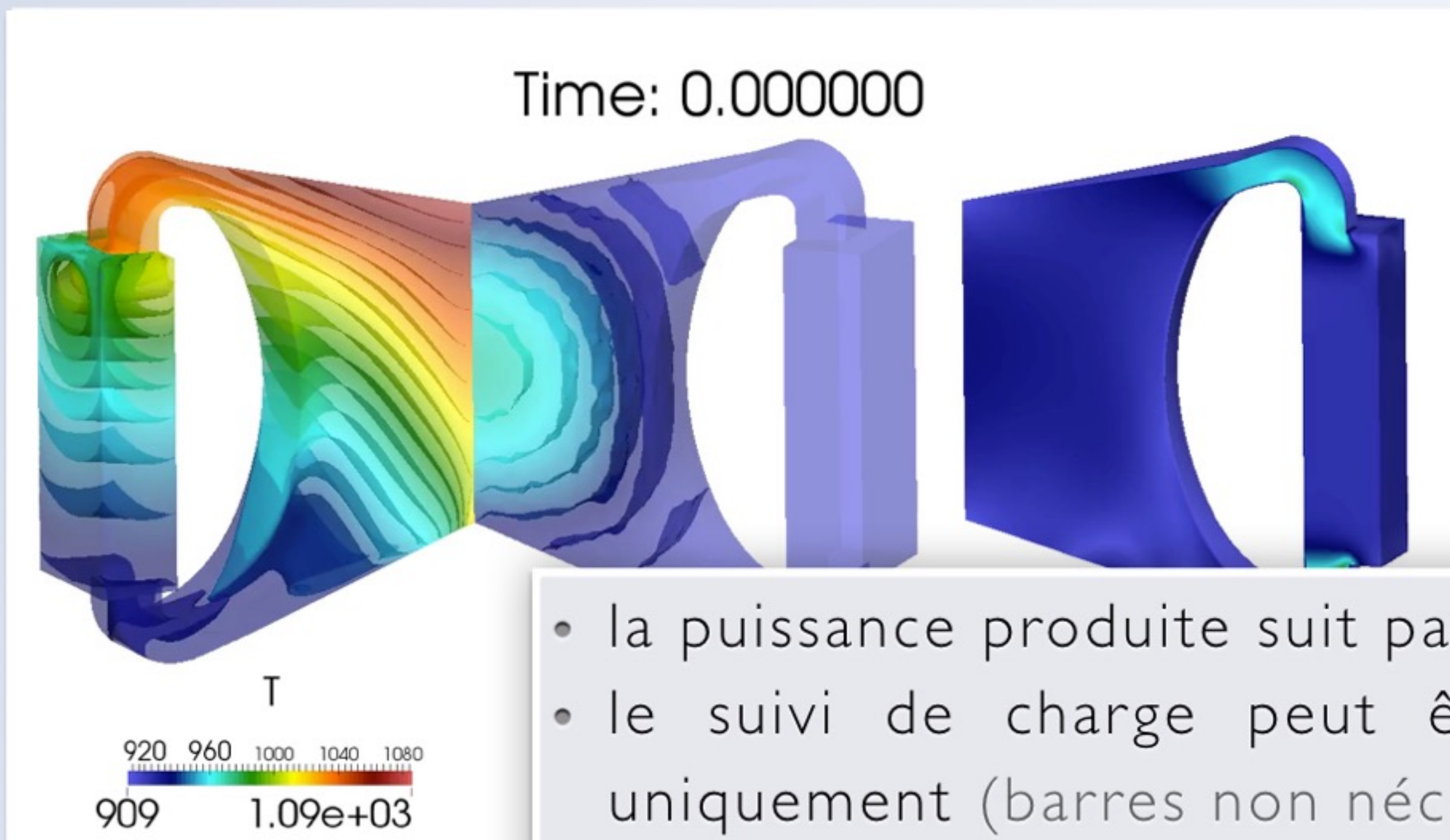
- état initial stationnaire
- variation rapide de la puissance du coeur de 33% de la puissance nominale en une minute



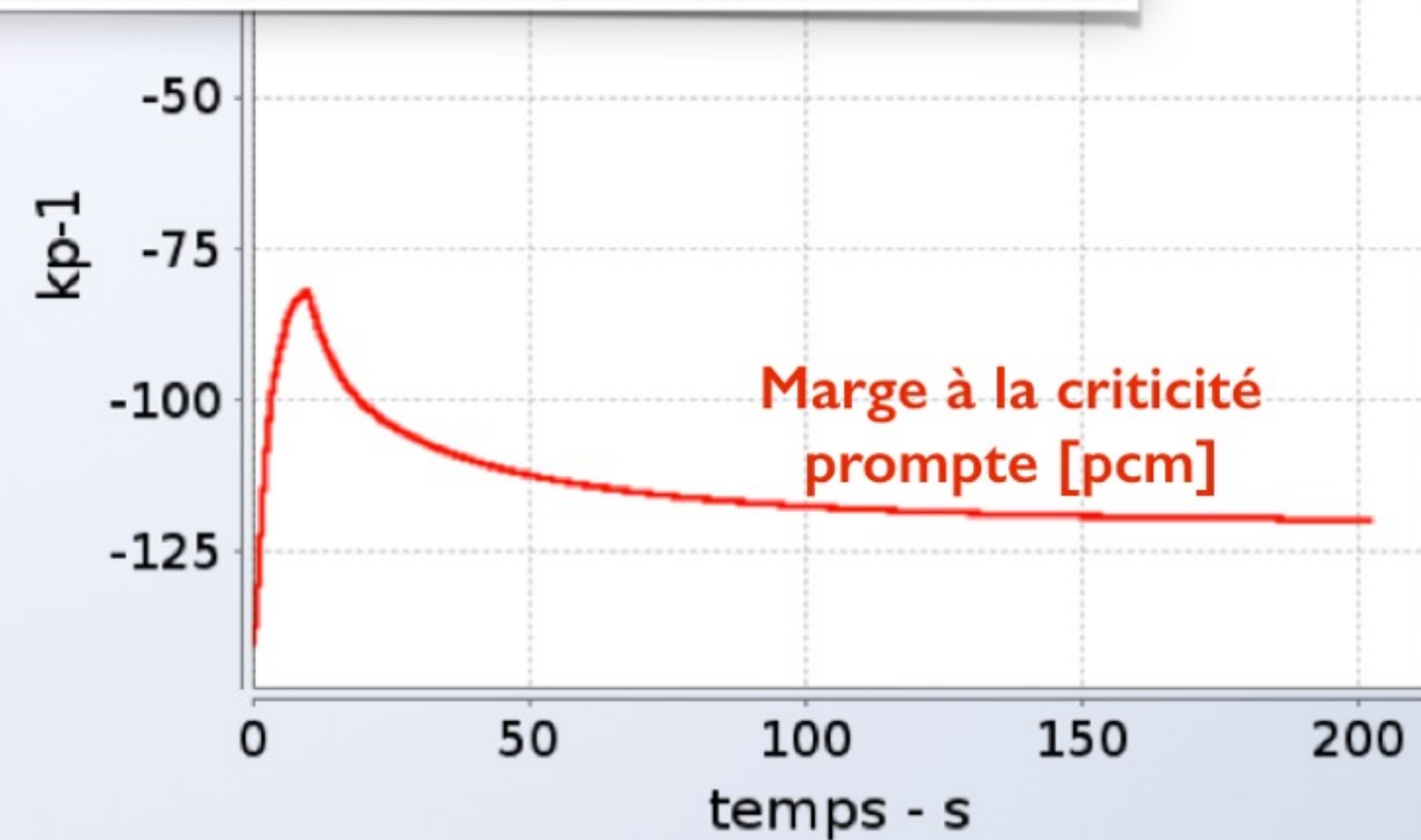
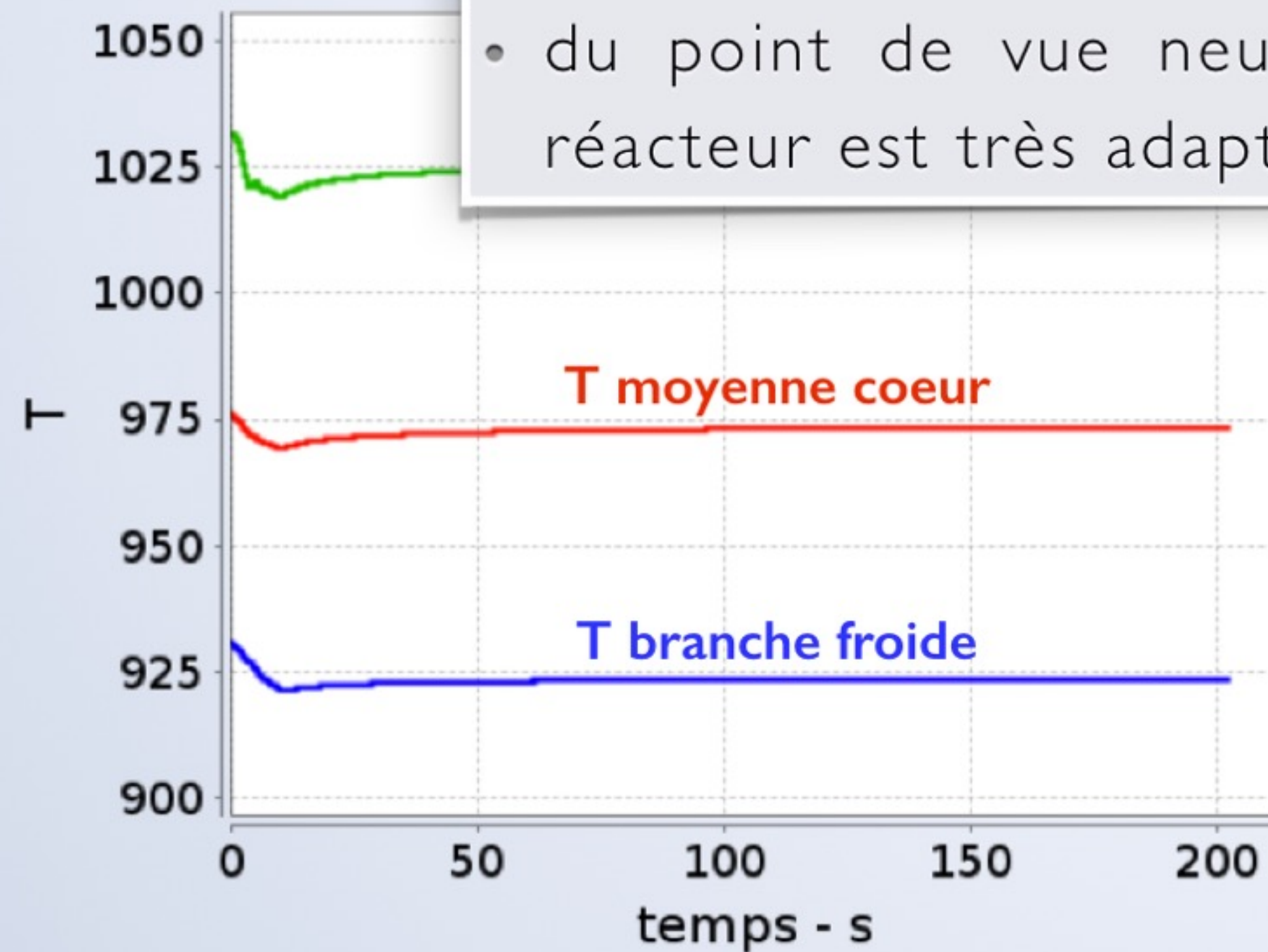
Suivi de charge piloté par les contre réactions + modification de la puissance des pompes



Suivi de charge piloté par les contre réactions + modification de la puissance des pompes



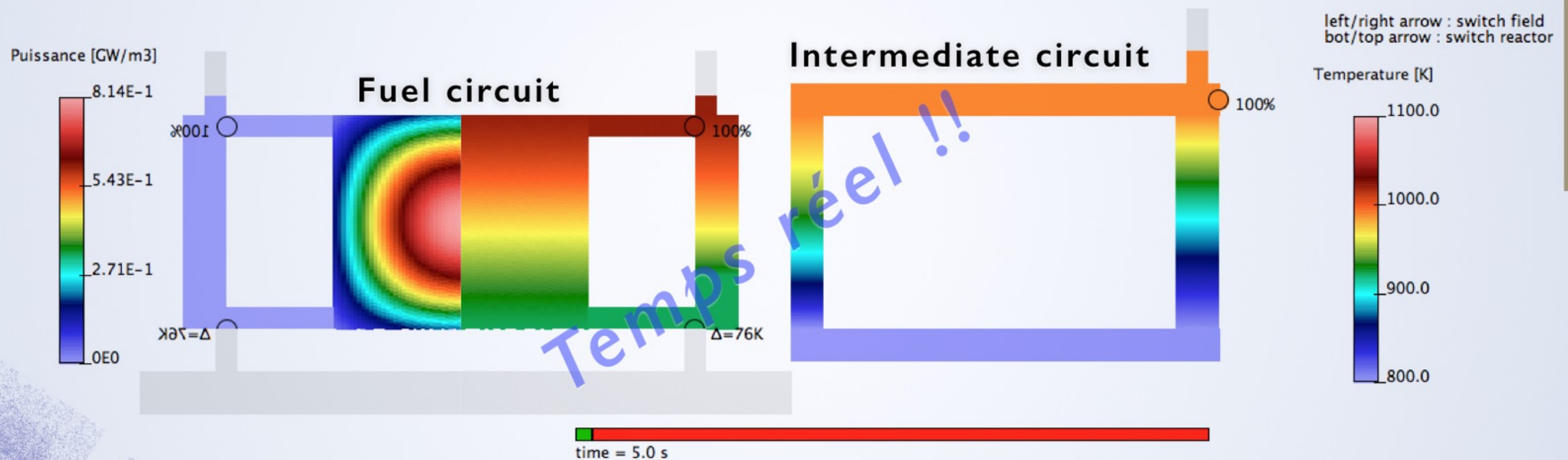
- la puissance produite suit parfaitement la puissance extraite
- le suivi de charge peut être piloté par la puissance appelée uniquement (barres non nécessaires)
- avec débit variable : température quasi constante en paroi
- du point de vue neutronique - thermohydraulique du coeur, le réacteur est très adapté pour la réalisation de suivi de charge





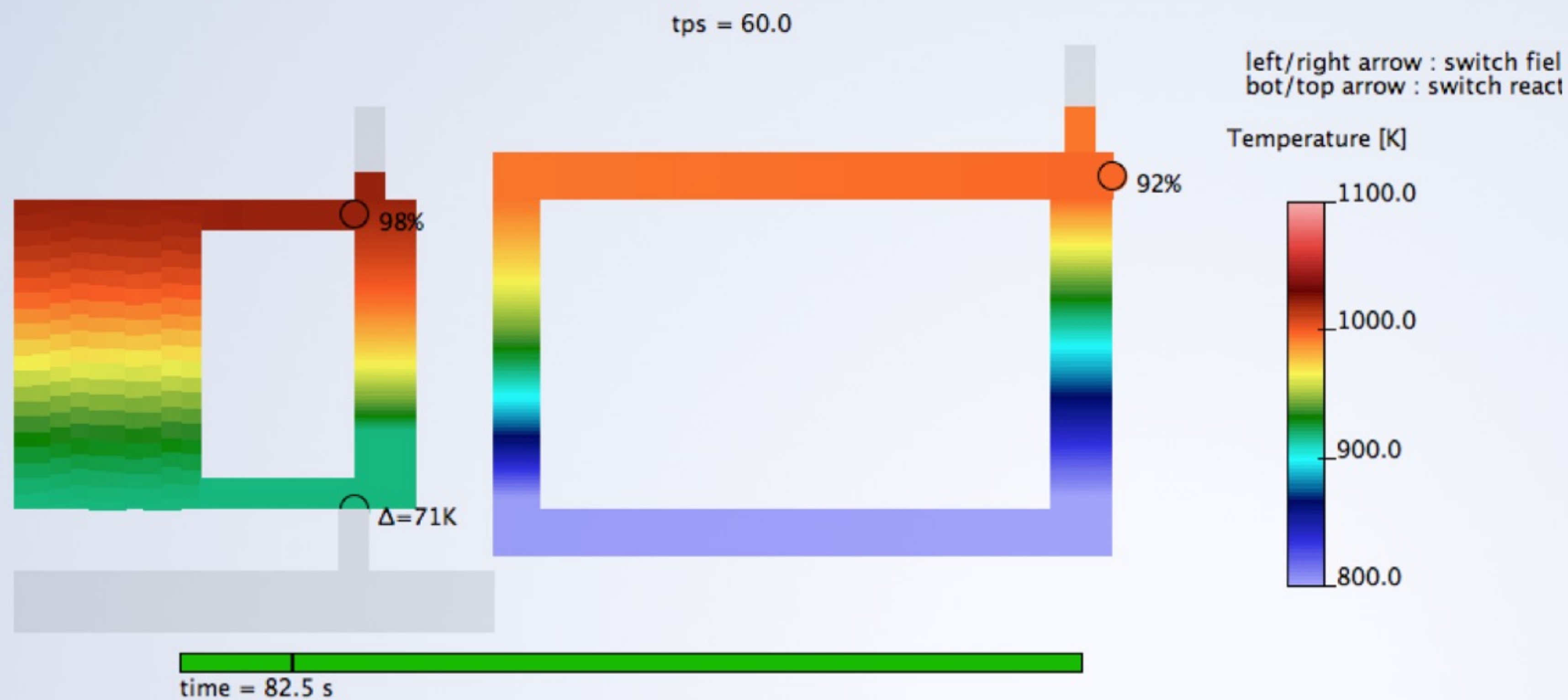
Neutronique : Modèle cinétique point par zone (cf. atelier)

- Forme du flux $\cos \cdot \text{Bessel}$
- Impact du transport des précurseurs



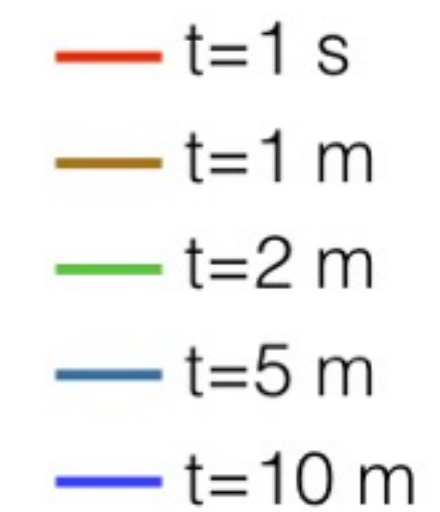
Thermohydraulique : Approche 1D

- Mouvement piston
- Distribution de vitesse à fournir en coeur
- Suivi spatial précurseurs & température

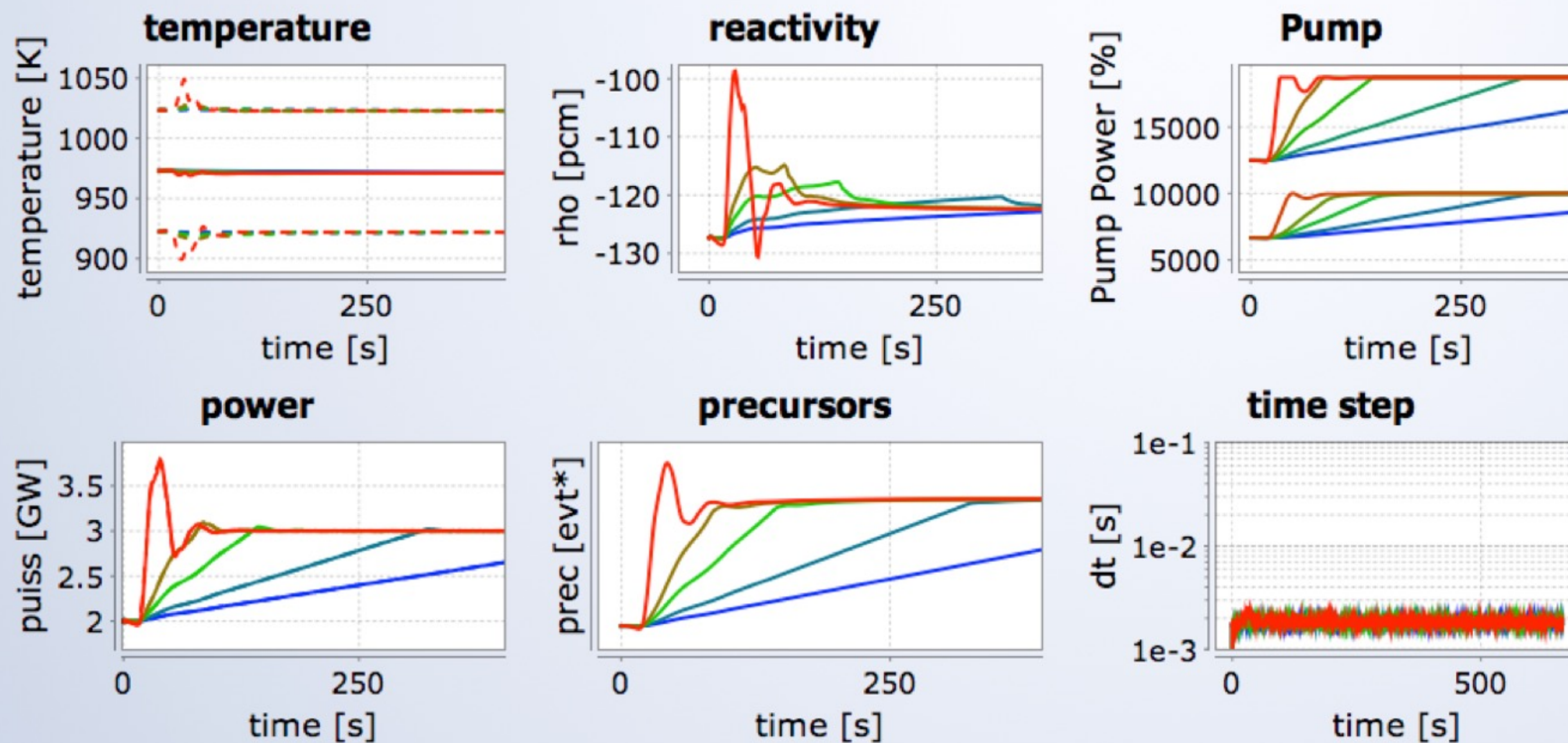


Scénario :

- Variation de puissance
2 → 3 GW en :



- Puissance des pompes indexée sur la puissance / ΔT / ?

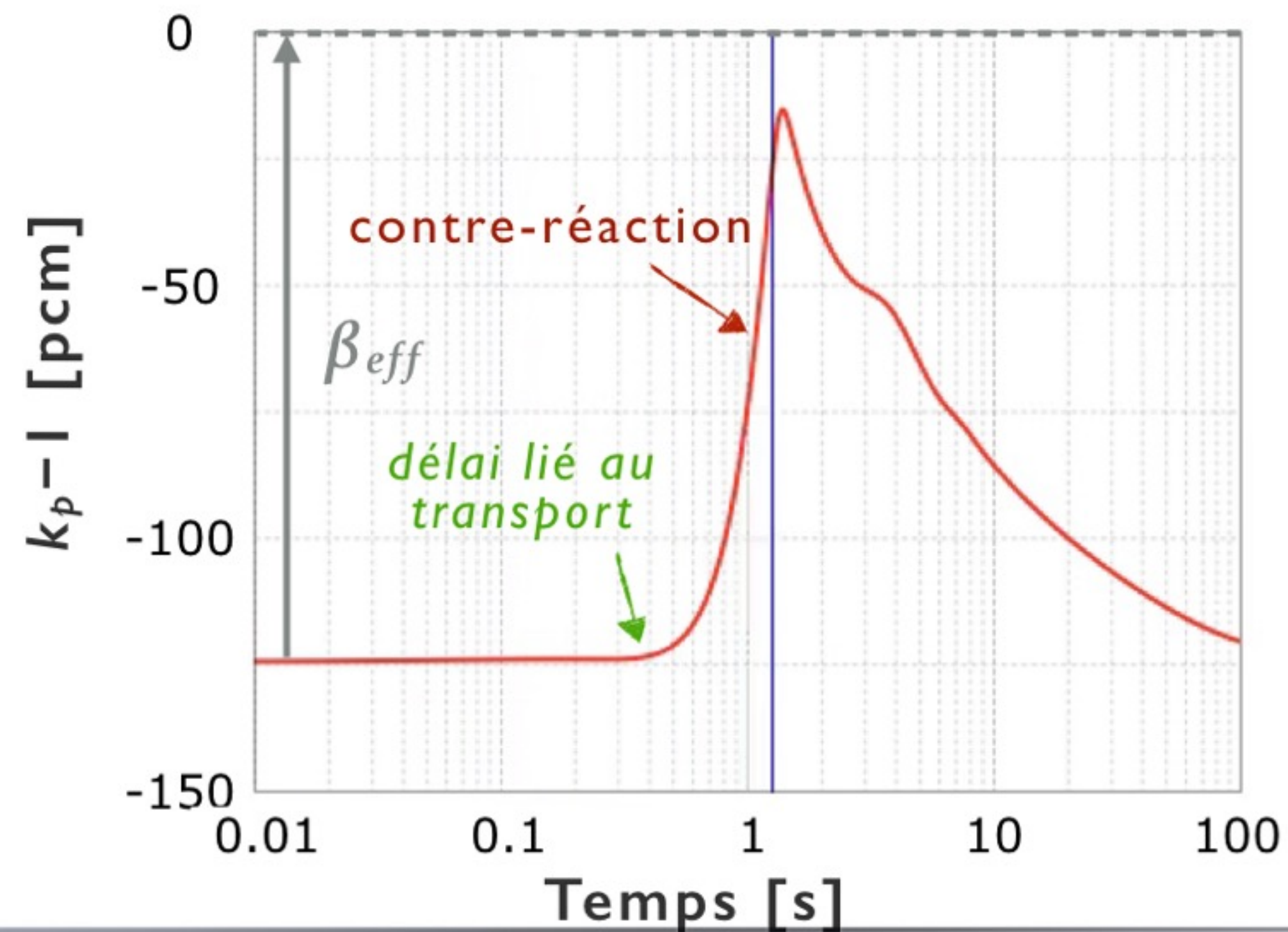
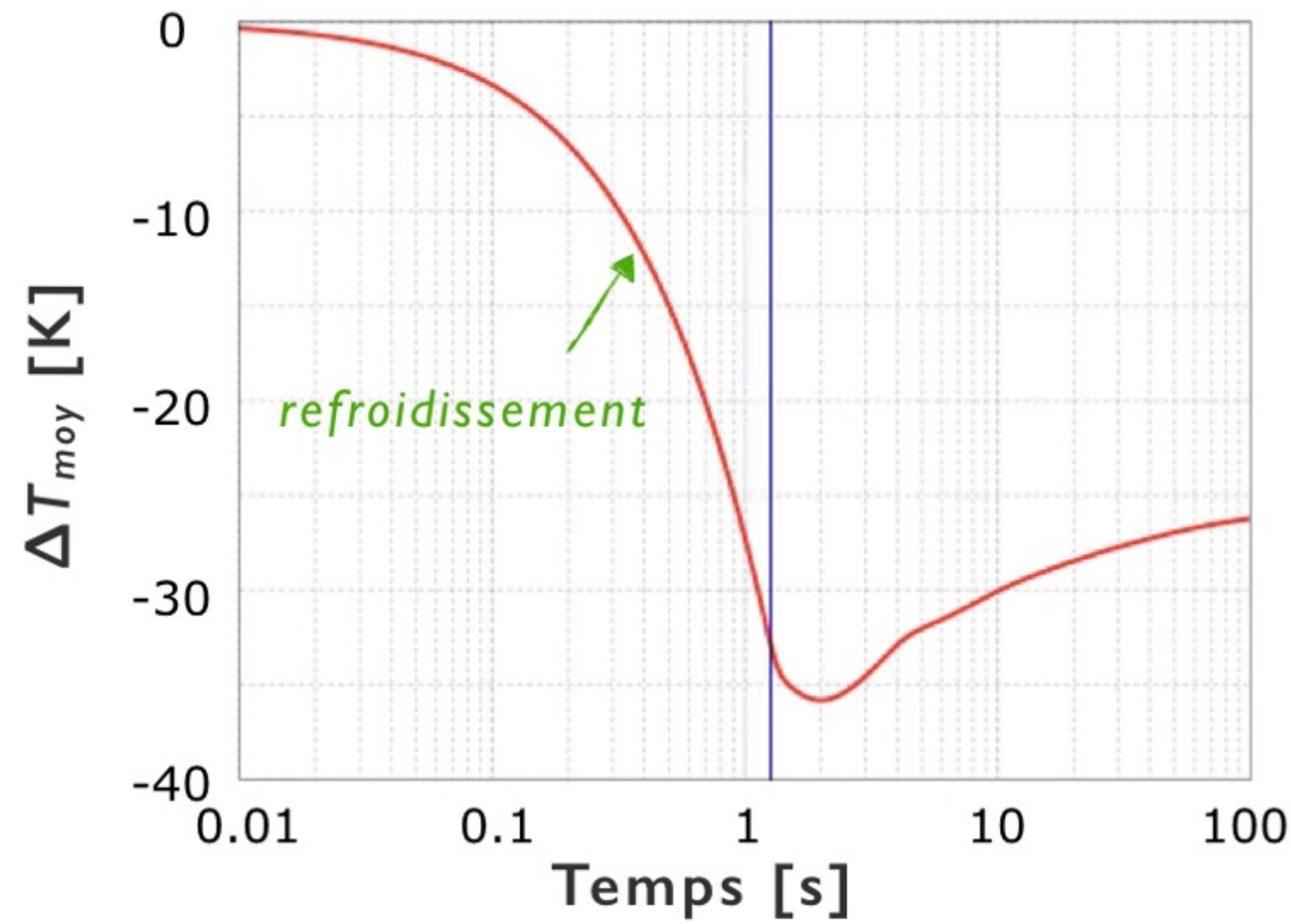


Conclusions :

- ΔT coeur quasi constant
- Variation de réactivité réduite, surtout avec des temps réalistes

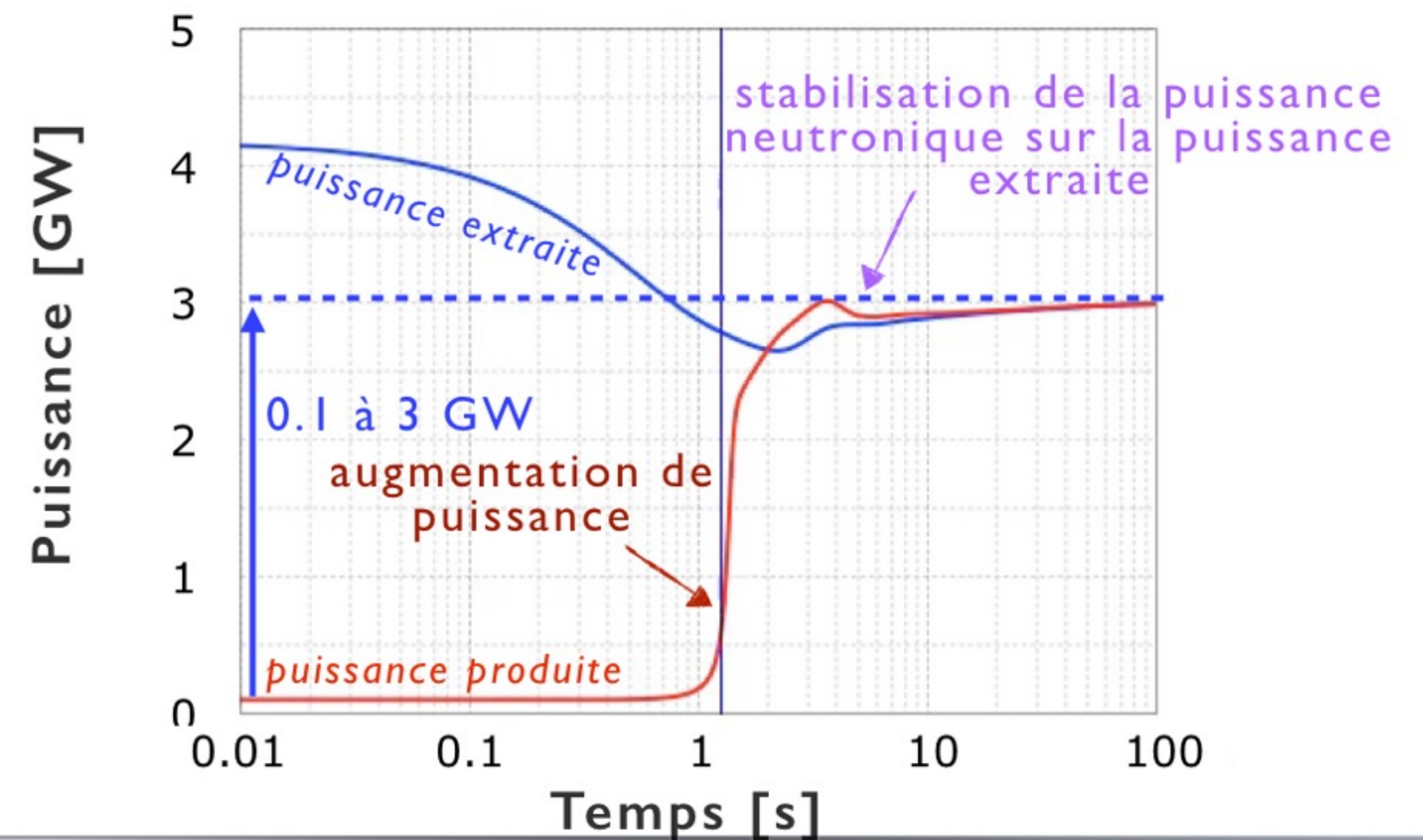
Quels besoins en contrôle de réactivité ?

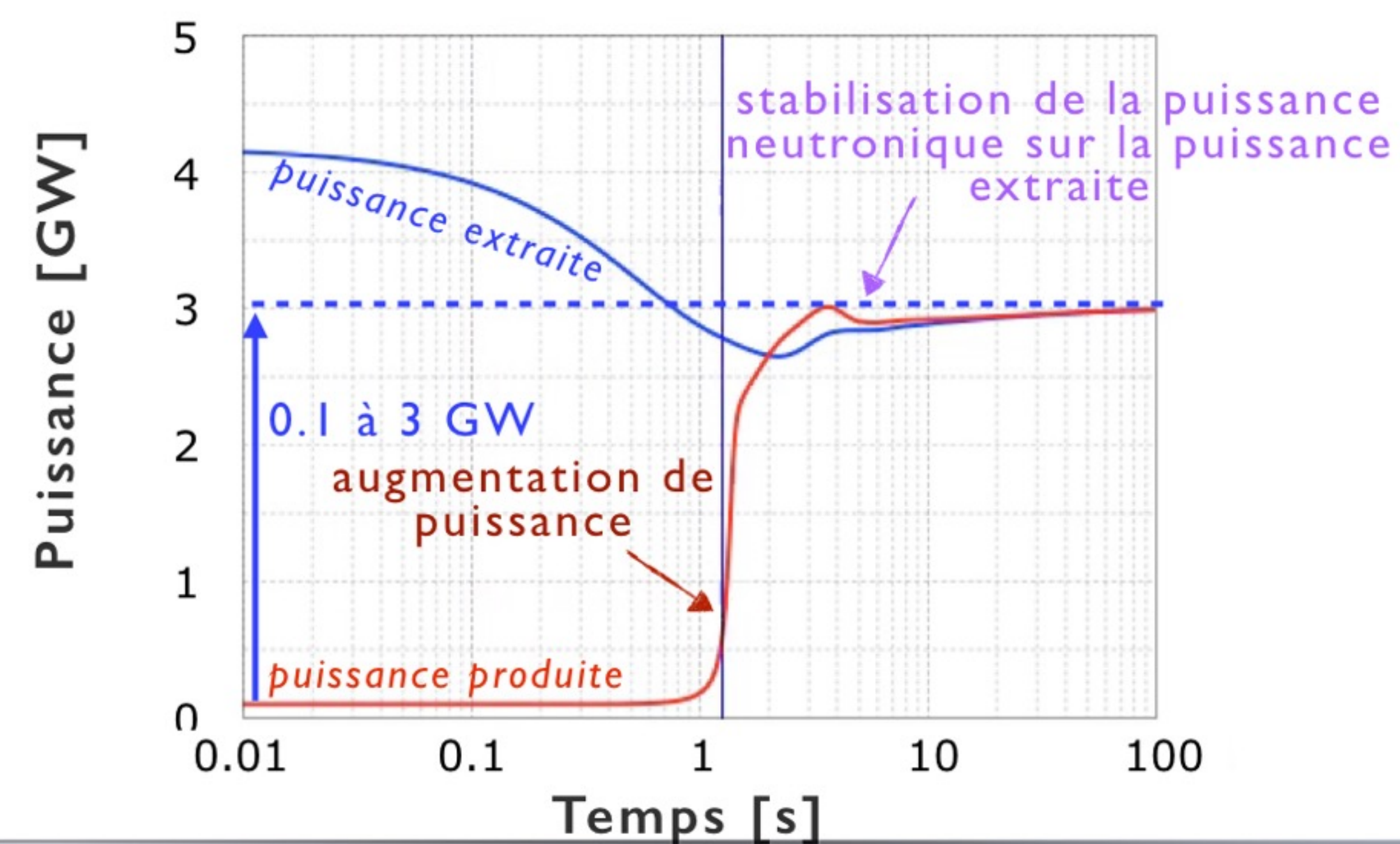
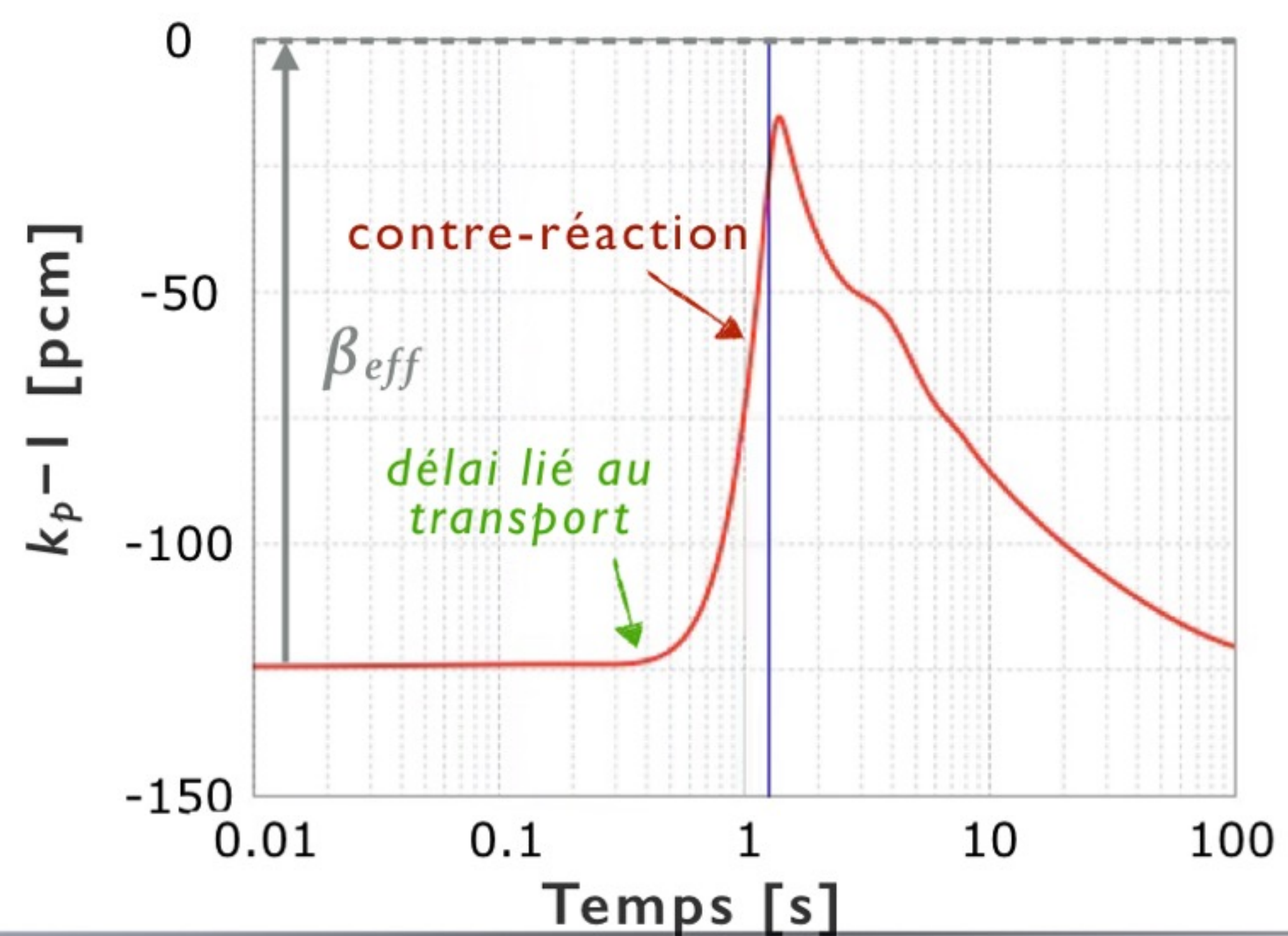
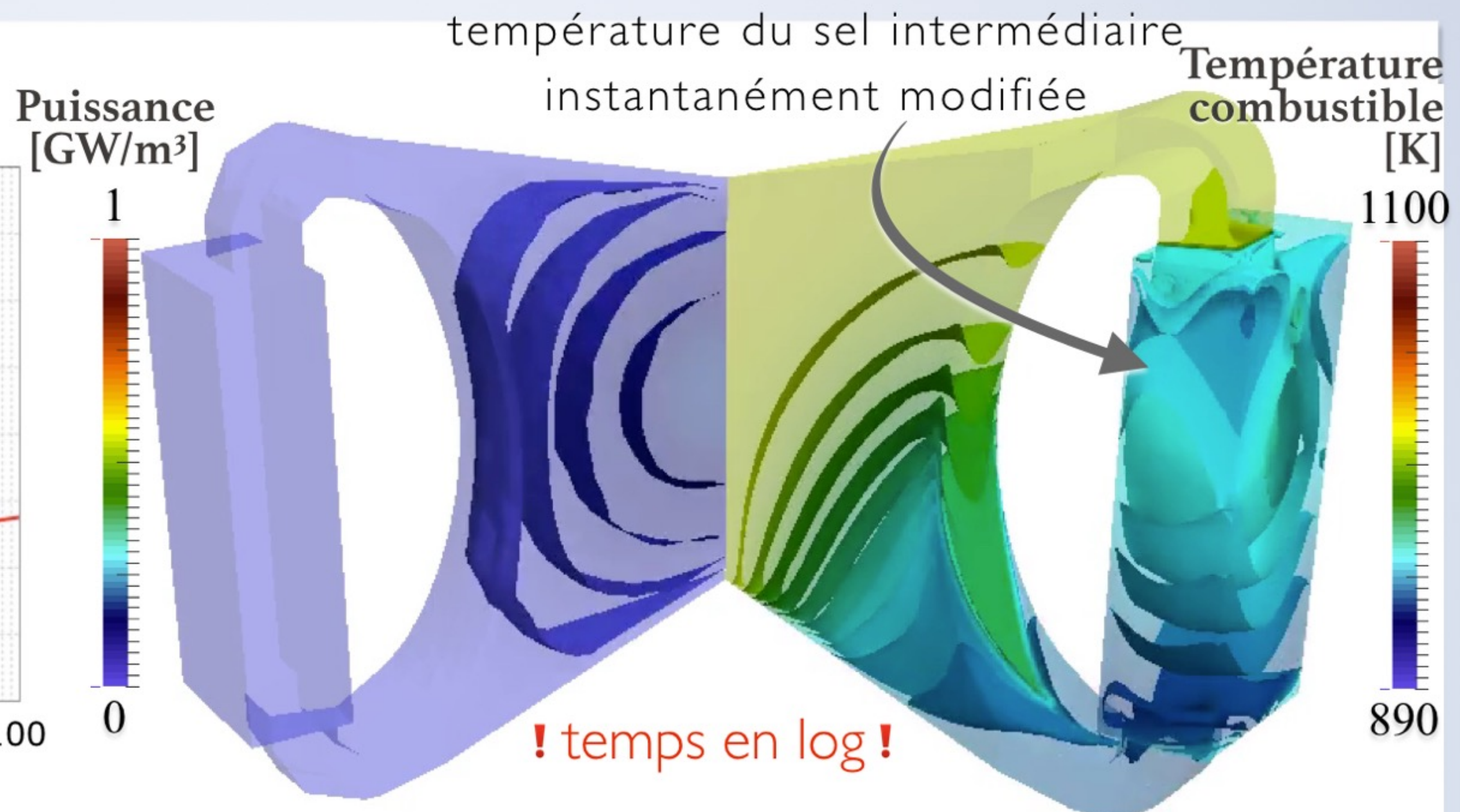
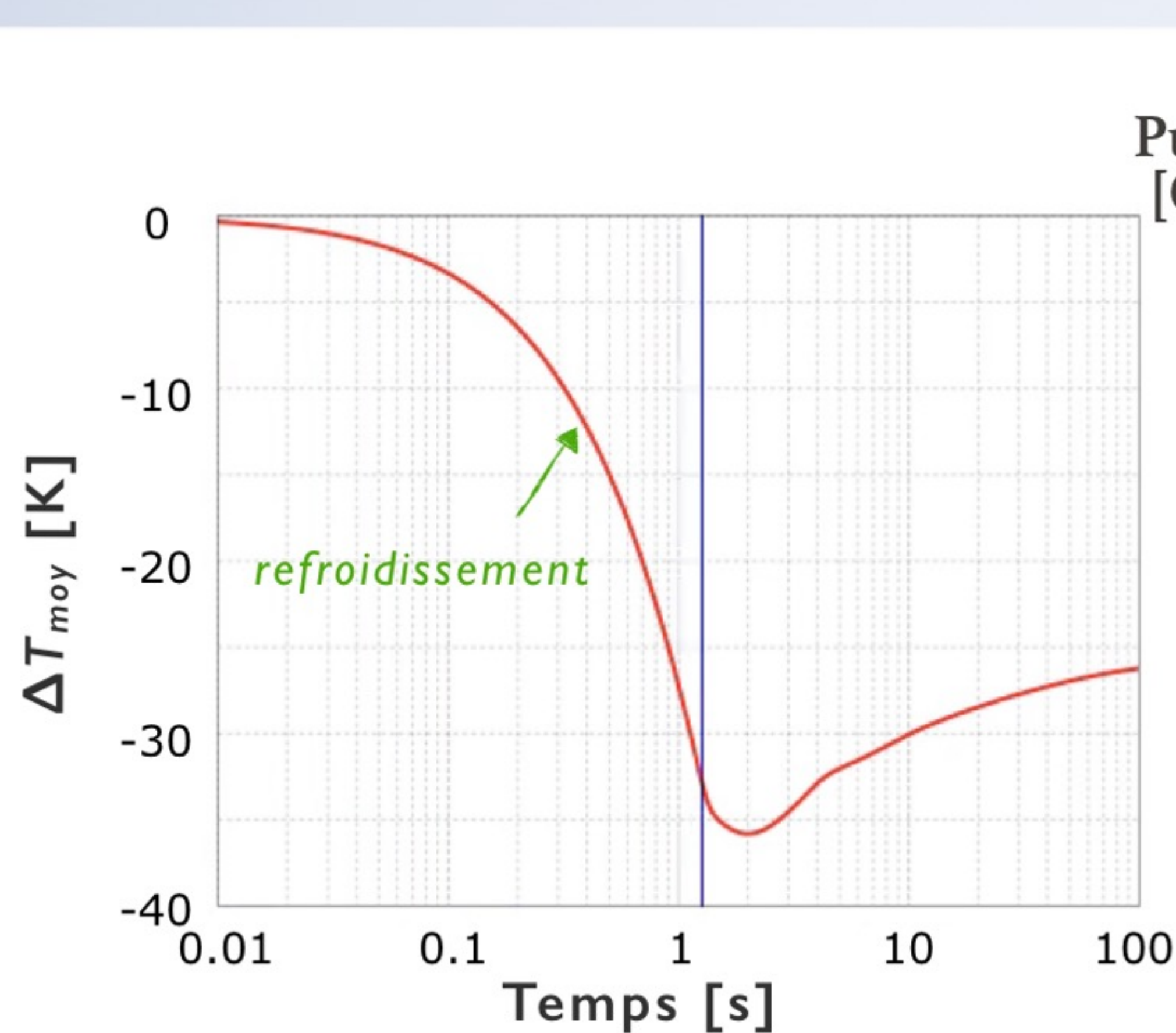
- évolution de la composition du combustible
- démarrage et arrêt du réacteur
- modification de la puissance du réacteur - suivi de charge
- contrôle du réacteur durant un accident

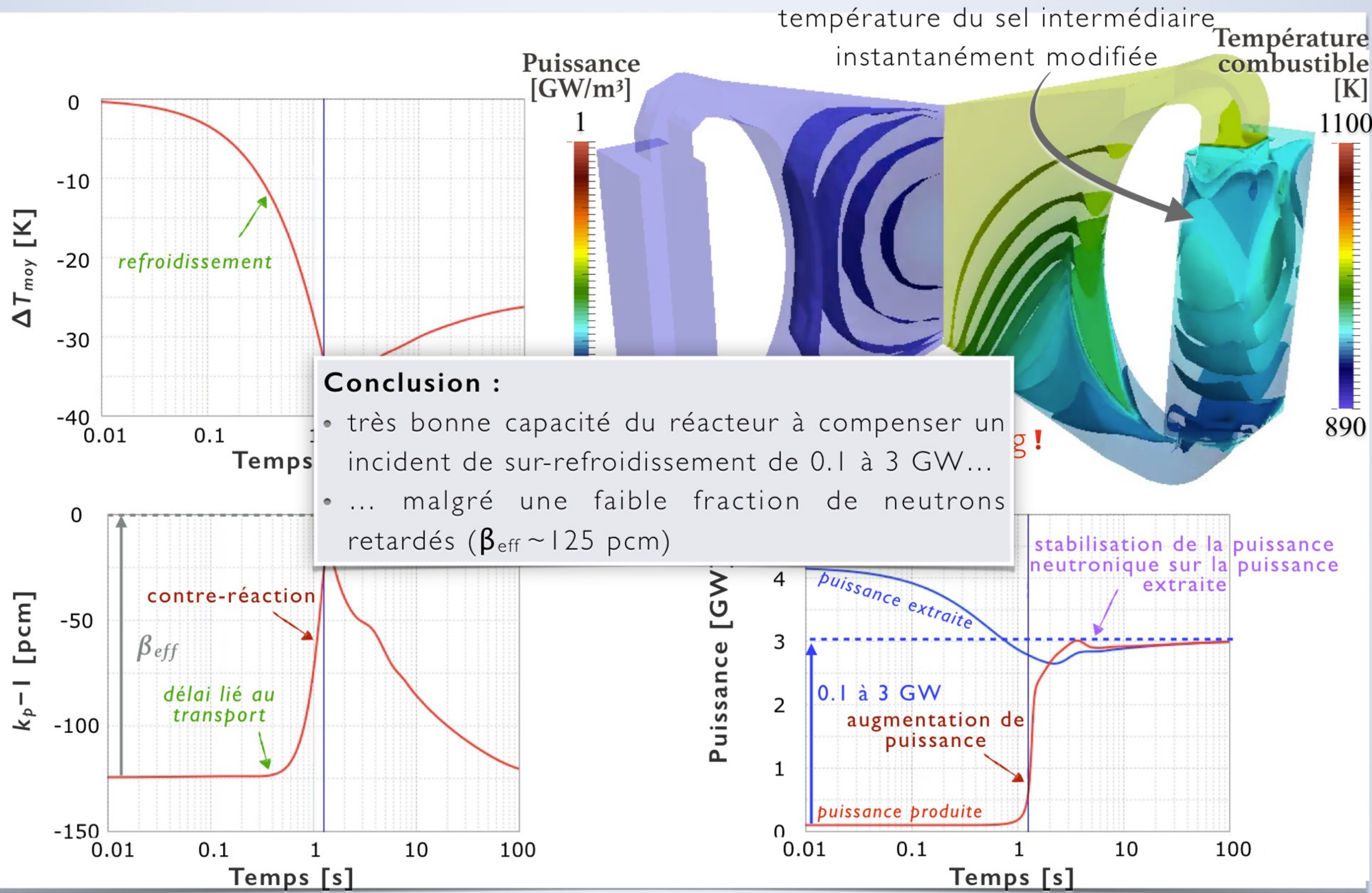


Scénario :

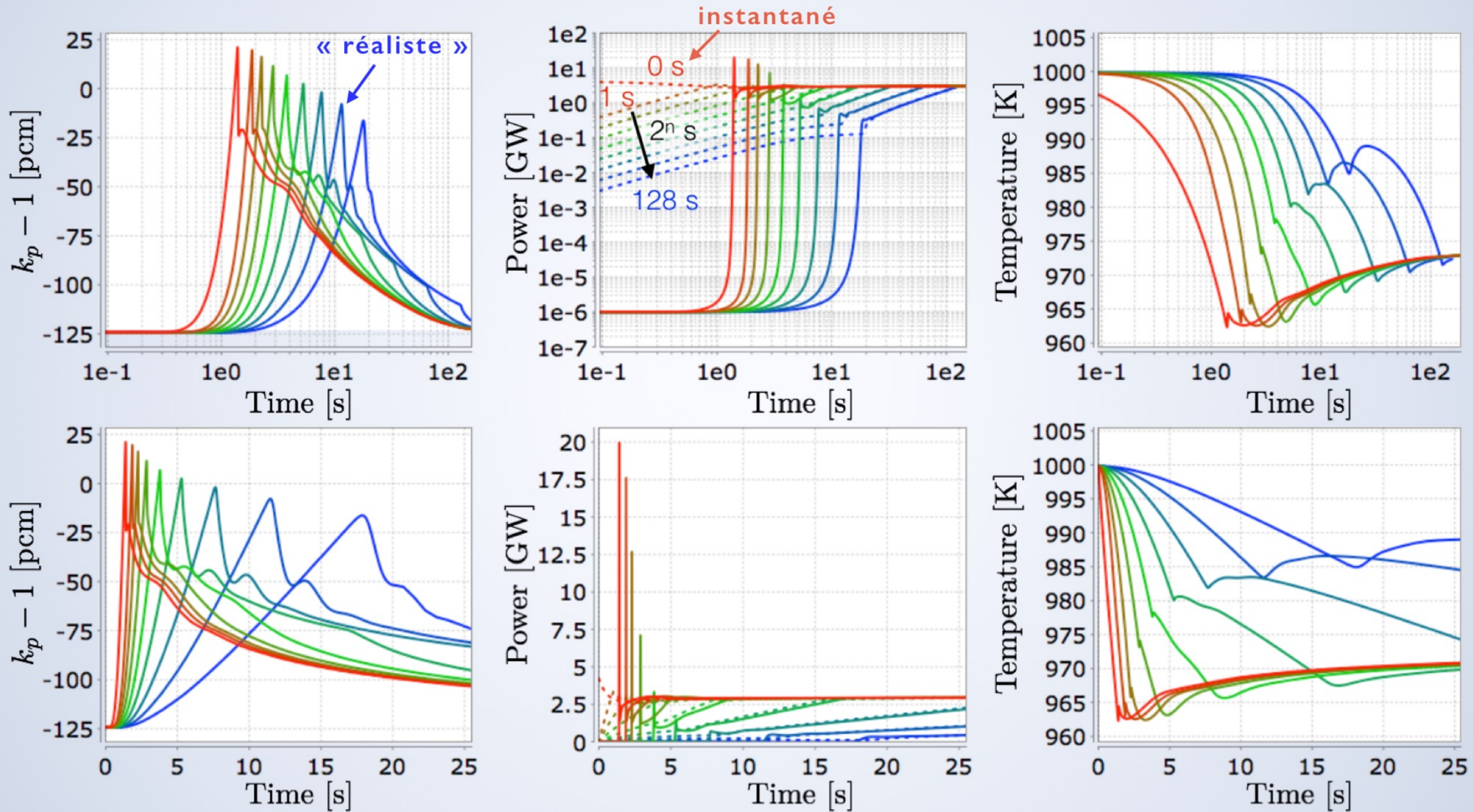
- état initial à basse puissance : 0.1 GW
- modification instantanée de la température du fluide intermédiaire pour atteindre 3GW



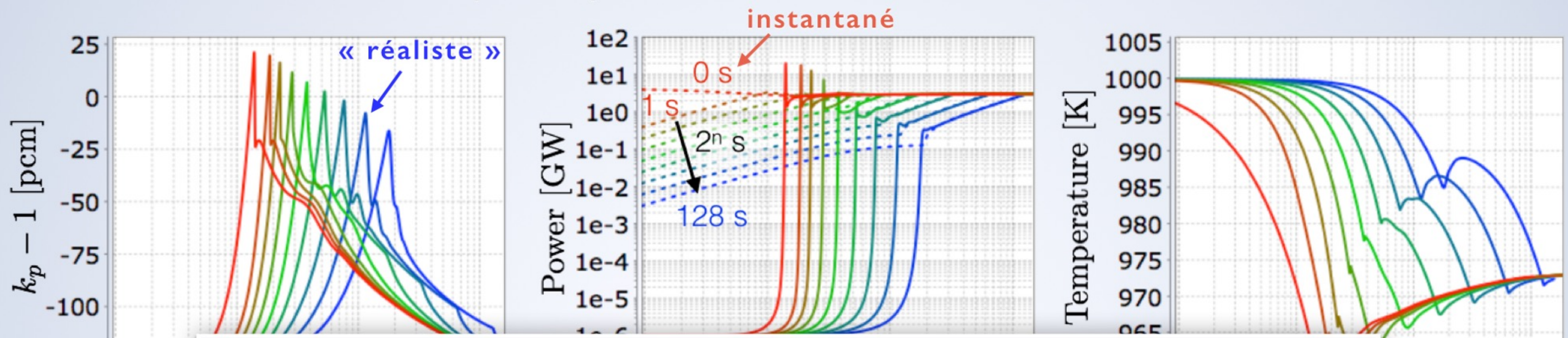




Etude sensibilité au temps de réponse du circuit intermédiaire

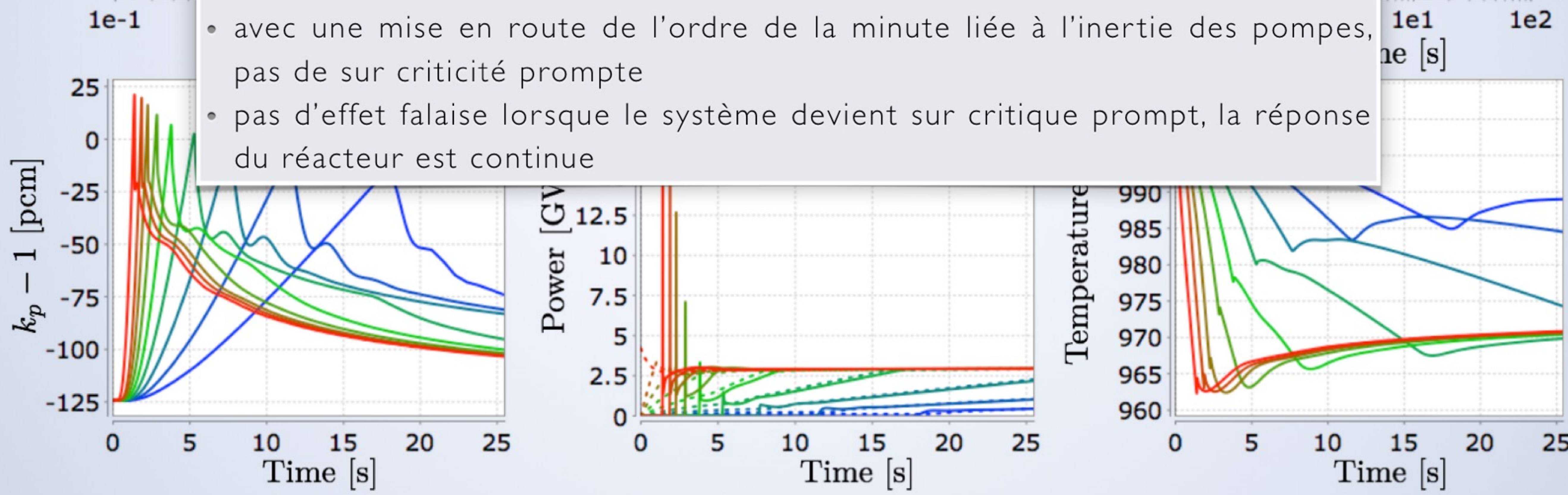


Etude sensibilité au temps de réponse du circuit intermédiaire



Conclusions :

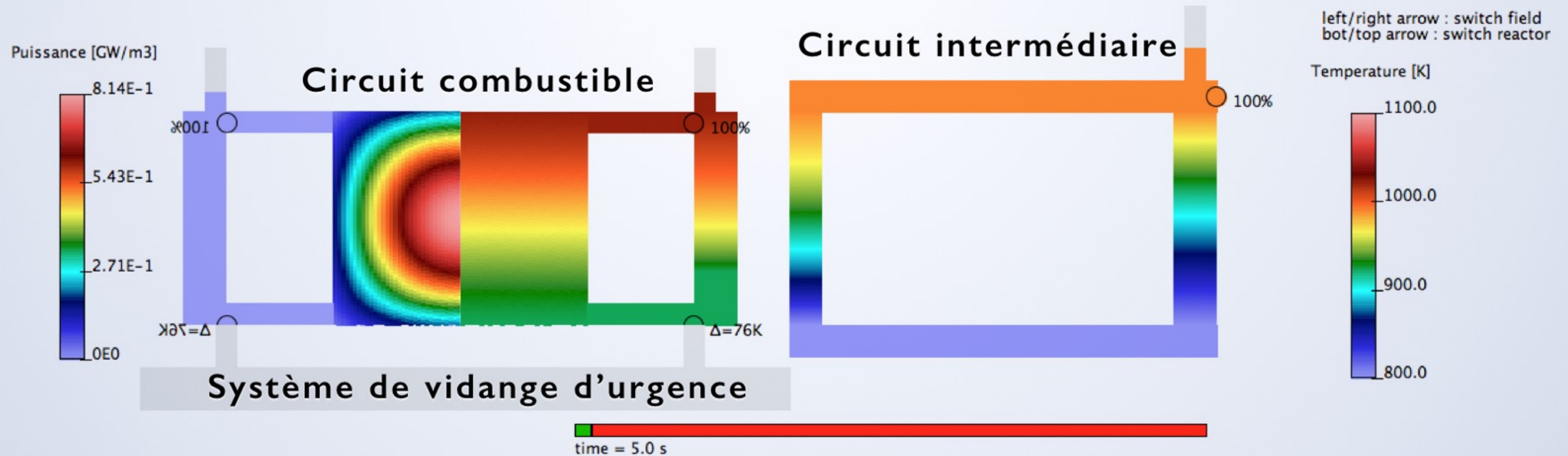
- avec une mise en route de l'ordre de la minute liée à l'inertie des pompes, pas de sur criticité prompte
- pas d'effet falaise lorsque le système devient sur critique prompt, la réponse du réacteur est continue



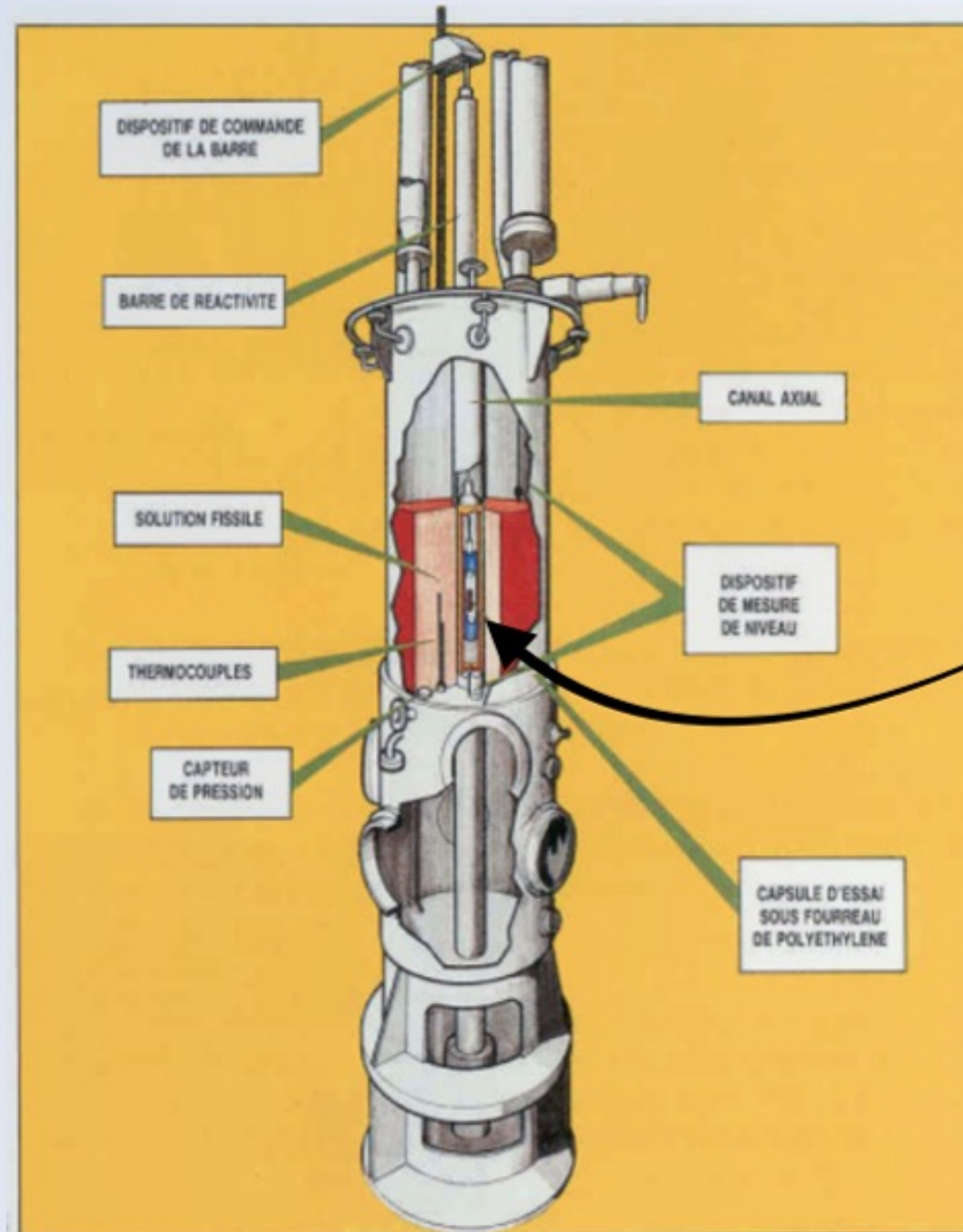

```
##### # ##### # #####
###      ###      ###
###      #####      #####
###      #####      #####
###      #####      #####
###      #####      #####
###      #####      #####
###      #####      #####
###      #####      #####
##### # ##### # ##### v1.1 ###
Volumes circuit combustible : pipe bas = 1,00  pipe haut = 1,00  hx      = 7,00  coeur = 9,00  total = 18,00  + trop plein      = 1,05
Volumes circuit intermediaire : hx_2_bas = 21,00  hx_2_haut = 21,00  hx_2_hx = 7,00  hx_2    = 5,25  total = 54,25  + hx_2_tp_plein = 12,25
LeGrandGestionnaire.do_your_job: initialization - 3.73 s
LeGrandGestionnaire.do_your_job: calculation - 10.343 s
```

(...)

cf. LiCore DEMO
→ vidange



CEA DAM - Note Technique SRNC 02 - 06

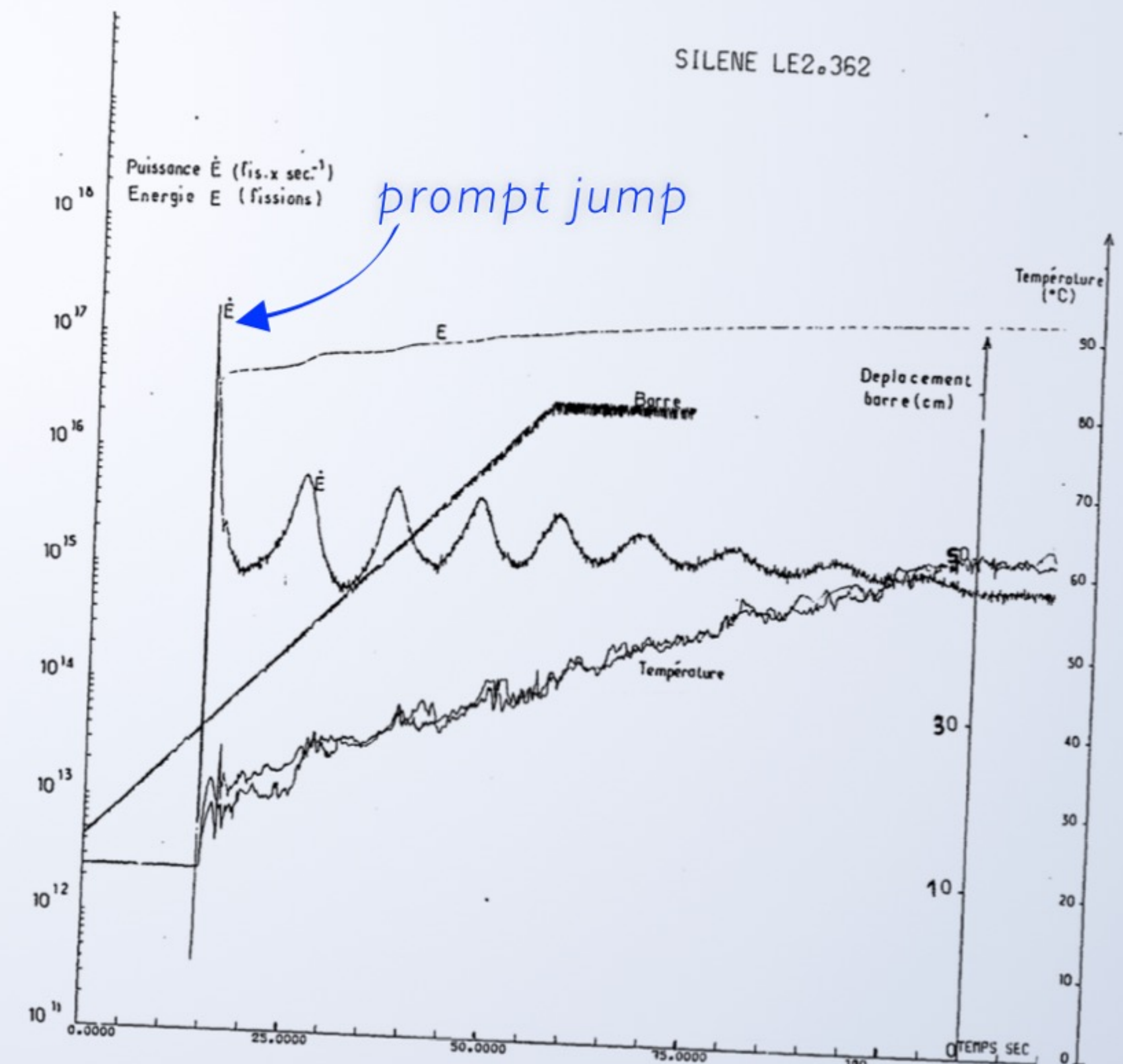


Silène :

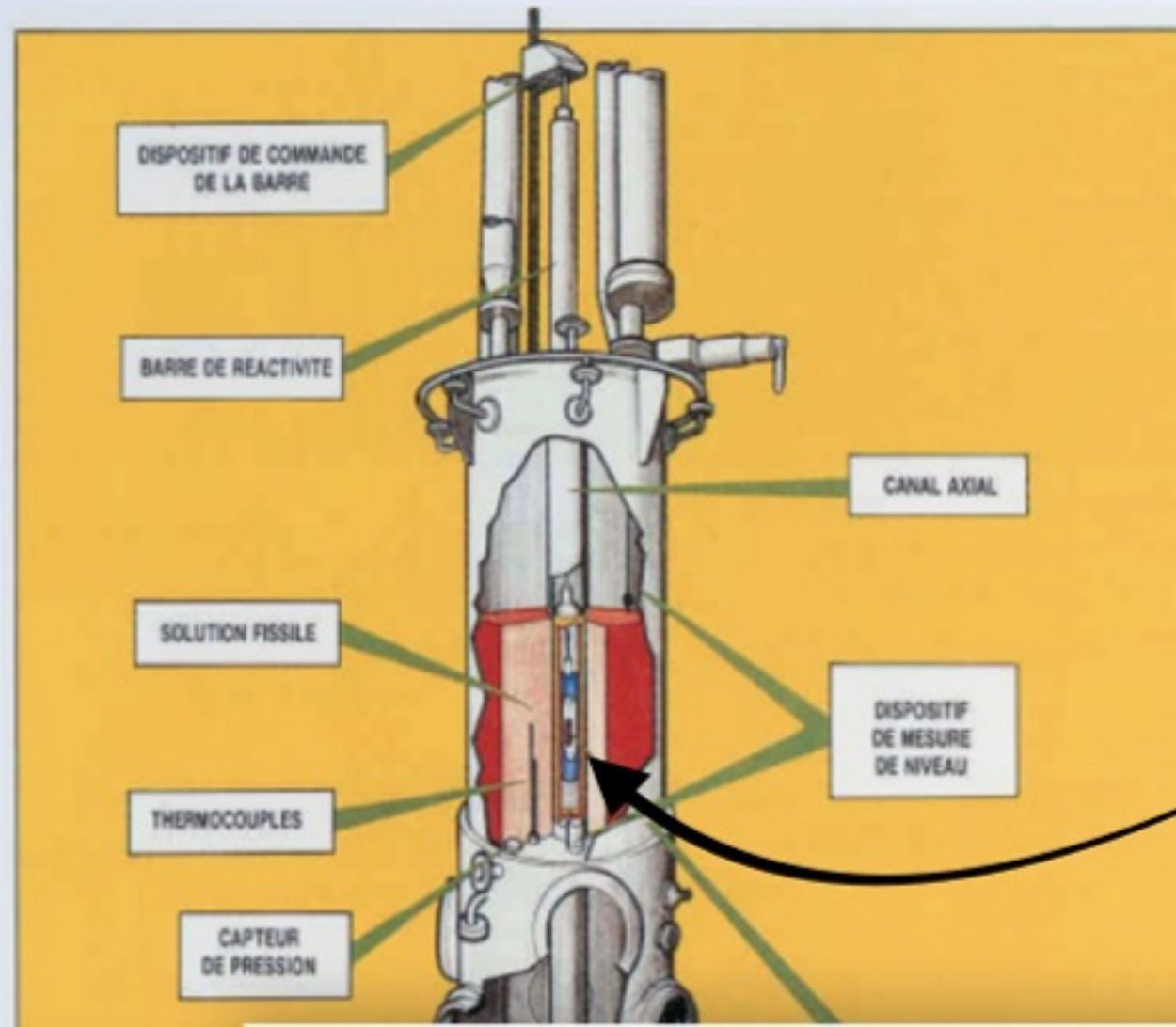
- Nitrate d'uranyle
- ^{235}U à 92.7%
- barre
- ... liquide !

N° expérience	LE1-362	LE2-362
ω en (seconde) ⁻¹	5.1	28.3
puissance maximum au sommet du premier pic en fissions/seconde	2×10^{16}	1.8×10^{17}
nombre de fissions intégré jusqu'au premier minimum	4.4×10^{16}	4.7×10^{16}
instant du sommet du premier pic en seconde	63.5	14.58
température finale en °C	72	70
nombre total de fissions	3.1×10^{17}	2.8×10^{17}

N° expérience	LE1-362	LE2-362
béta effectif en pcm	794	794
réactivité insérée en pcm	2350	2350
rampe de réactivité en pcm/seconde	28	133
durée de l'insertion de réactivité en seconde	83.93	17.67
hauteur critique en cm	37.57	37.57
hauteur initiale en cm	42.17	42.17
température initiale en °C	20	20
source de puissance en fissions.s ⁻² .g ⁻¹	1.45×10^4	1.45×10^4
durée de l'expérience en seconde	560	210



CEA DAM - Note Technique SRNC 02 - 06



Silène :

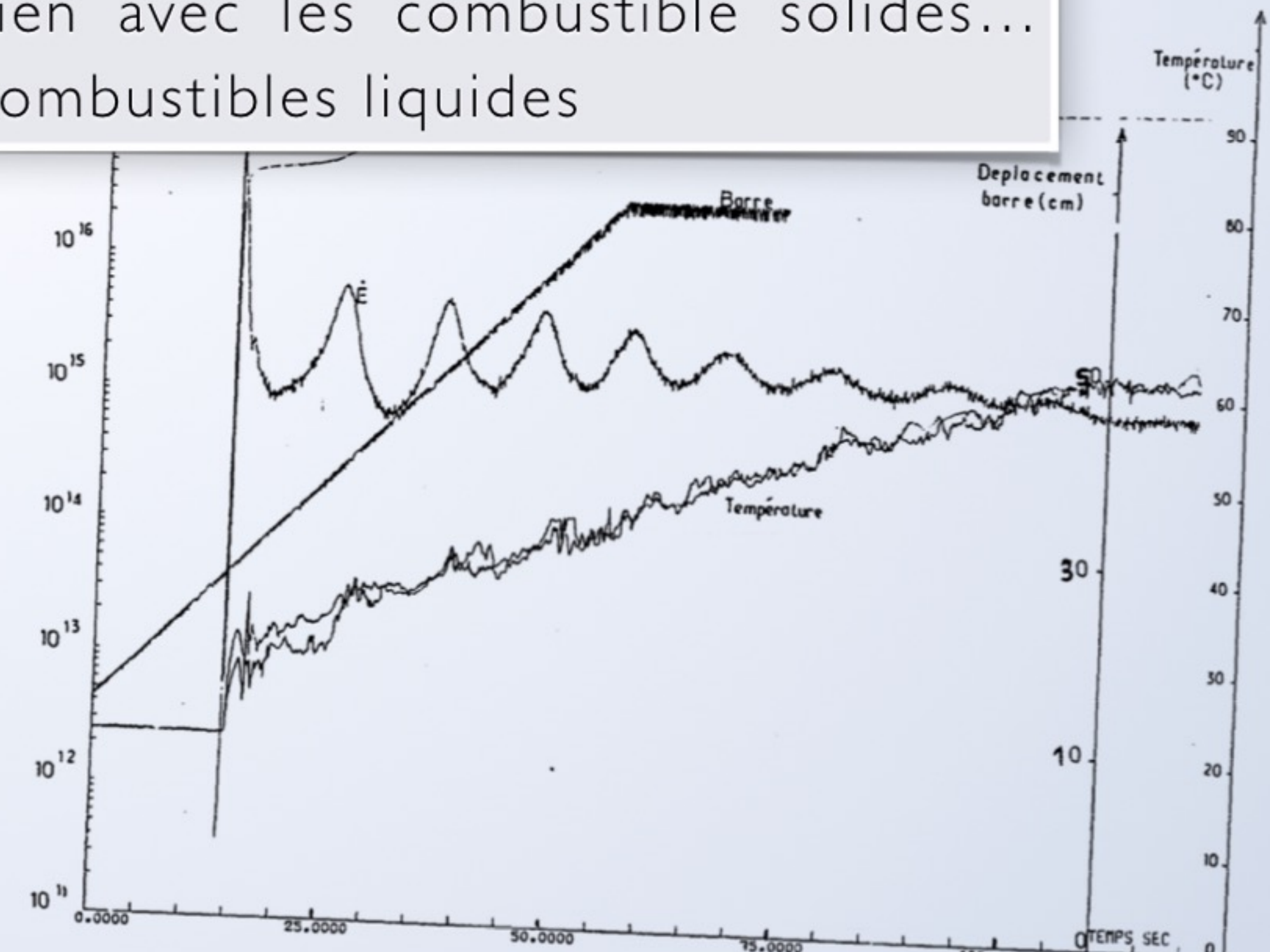
- Nitrate d'uranyle
- ^{235}U à 92.7%
- barre
- ... liquide !

N° expérience	LE1-362	LE2-362
ω en (seconde) ⁻¹	5.1	28.3
puissance maximum au sommet du premier pic en fissions/seconde	2×10^{16}	1.8×10^{17}
nombre de fissions intégré jusqu'au premier minimum	4.4×10^{16}	4.7×10^{16}
instant du sommet du premier pic en seconde	63.5	14.58
température finale en °C	72	70
nombre total de fissions	3.1×10^{17}	2.8×10^{17}

Conclusions :

- La criticité prompt n'est pas un élément caractérisant un accident pour un combustible liquide
- Approche critique pertinente pour le lien avec les combustible solides... mais pas forcément pertinente pour les combustibles liquides

N° exp	LE1-362	LE2-362
béta critique en pcm		
réactivité insérée en pcm	2350	2350
rampe de réactivité en pcm/seconde	28	133
durée de l'insertion de réactivité en seconde	83.93	17.67
hauteur critique en cm	37.57	37.57
hauteur initiale en cm	42.17	42.17
température initiale en °C	20	20
source de puissance en fissions.s ⁻² .g ⁻¹	1.45×10^4	1.45×10^4
durée de l'expérience en seconde	560	210



CONCLUSION

Quels besoins de contrôle de réactivité ?

- Evolution de la composition du combustible
- Modification de la puissance du réacteur - suivi de charge
- Contrôle du réacteur durant un accident
- Démarrage et arrêt du réacteur

Contrôle de la réactivité :

- Ajustement de la composition sans arrêt du réacteur
- Pilotage du réacteur par la puissance extraite
- Peu sensible à des pics de puissance
- Reconfiguration aisée du combustible sous-criticité et refroidissement

Moyens d'étude :

- Calcul d'évolution basée sur un code Monte Carlo
- Modèle neutronique adapté à la migration des précurseurs de neutrons retardés et couplage à la thermohydraulique (~jour / calcul)
- Simulateur type "code système" (en cours de développement)

Aspect limitant ?

- Variation de température en parois
- Circuits intermédiaire / conversion centrale gaz cycle ouvert 20% min⁻¹
REP 1-5% min⁻¹
- Lien avec la sûreté ?



De même que pour le reste de l'approche de sûreté (définition de l'accident grave, définition des barrières, ...), il est nécessaire de revenir aux fondamentaux pour faire le lien entre les fonctions du contrôle de réactivité et leurs déclinaisons pratiques dans les procédures de fonctionnement du MSFR

CONCLUSION

Quels besoins de contrôle de réactivité ?

- Evolution de la composition du combustible
- Modification de la puissance du réacteur - suivi de charge
- Contrôle du réacteur durant un accident
- Démarrage et arrêt du réacteur

Contrôle de la réactivité :

- Ajustement de la composition sans arrêt du réacteur
- Pilotage du réacteur par la puissance extraite
- Peu sensible à des pics de puissance
- Reconfiguration pièce du combustible sous-criticité et refroidissement

Moyens d'étude :

- Calcul d'évolution basée sur un code Monte Carlo
- Modèle neutronique adapté à la migration des précurseurs de neutrons retardés et couplage à la thermohydraulique (~jour / calcul)
- Simulation de type "code système" (en cours de développement)

Aspect limitant ?

- Variation de température en parois
- Circuits intermédiaire / conversion centrale gaz cycle ouvert 20% min⁻¹
REP 1-5% min⁻¹
- Lien avec la sûreté ?



De même que pour le reste de l'approche de sûreté (définition de l'accident grave, définition des barrières, ...), il est nécessaire de revenir aux fondamentaux pour faire le lien entre les fonctions du contrôle de réactivité et leurs déclinaisons pratiques dans les procédures de fonctionnement du MSFR