



**Modèle physique/neutronique
en Modelica d'un outil d'aide
au pilotage du transitoire
sensible de montée en
puissance à 3%Pn/h après
rechargement**

**Maquettage d'un outil d'aide
au pilotage sous Excel/VB**

Défi INTEP

Projet EPO/Lot A2

« Aide au pilotage de transitoires rares »

Baligh EL HEFNI

EDF R&D Département STEP

baligh.el-hefni@edf.fr



CHANGER L'ÉNERGIE ENSEMBLE



Sommaire

1. Objectifs et Enjeux
2. Bibliothèque 'ThermoSysPro'
3. Modèle physique/neutronique de l'outil d'aide au pilotage du transitoire sensible
4. Maquettage d'un outil d'aide au pilotage sous Excel/VB
5. Conclusion

Objectifs et Enjeux

des aides au pilotage de transitoires sensibles

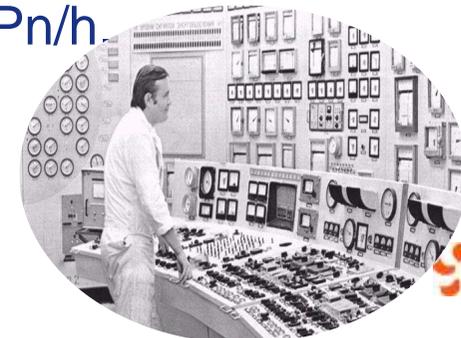
Le présent travail s'inscrit dans le projet EPO (Exploitation du Process à l'Optimum) du défi INTEP (Intégration des Nouvelles Technologies pour une Exploitation plus Performante), dédié à l'amélioration de la performance des tranches nucléaires.

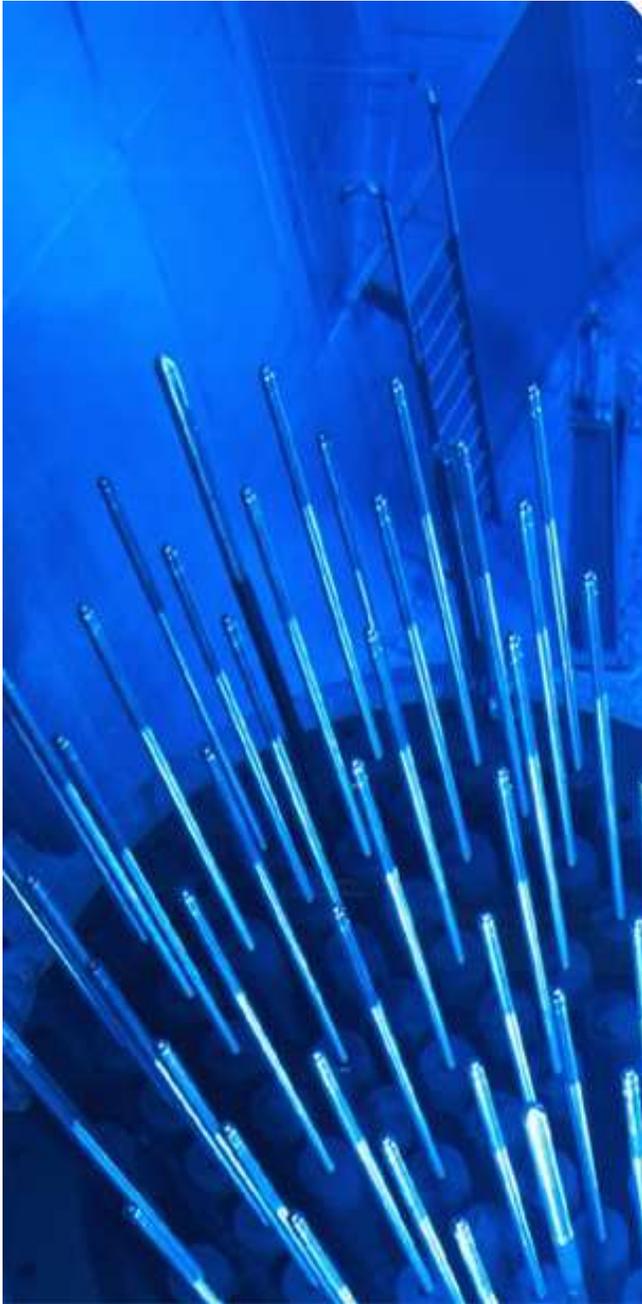
- ▶ Objectifs du lot A2 « Aide au pilotage de transitoires rares » du projet :
 - Fournir aux opérateurs de conduite des outils d'aide au pilotage de certains transitoires particulièrement délicats à conduire,
 - Démontrer la faisabilité et l'intérêt de tels outils.

- ▶ Enjeux des aides au pilotage
 - Gain de sûreté (éviter des ESS «événement significatif pour la sûreté»),
 - Gain de disponibilité (gain de temps sur les transitoires...).

Choix du transitoire sensible pour une aide au pilotage

- Transitoire de montée à 3%Pn/h après rechargement
 - Transitoire particulièrement délicat :
 - Contraintes de sûreté à respecter
 - Rareté d'occurrence (les opérateurs y sont rarement confrontés)
 - L'enjeu est d'arriver le plus rapidement possible à 100%Pn tout en respectant les contraintes liées à la sûreté.
- Montée en puissance après rechargement du cœur
 - Étape de la mise en production du réacteur de 1% à 100% Pn, après l'arrêt de la tranche,
 - Le transitoire de montée en puissance entre 48% et 100% Pn est concerné par la montée en charge limitée à 3% Pn/h.





**Bibliothèque EDF R&D de
modules physiques/neutronique
en Modelica
'ThermoSysPro'**

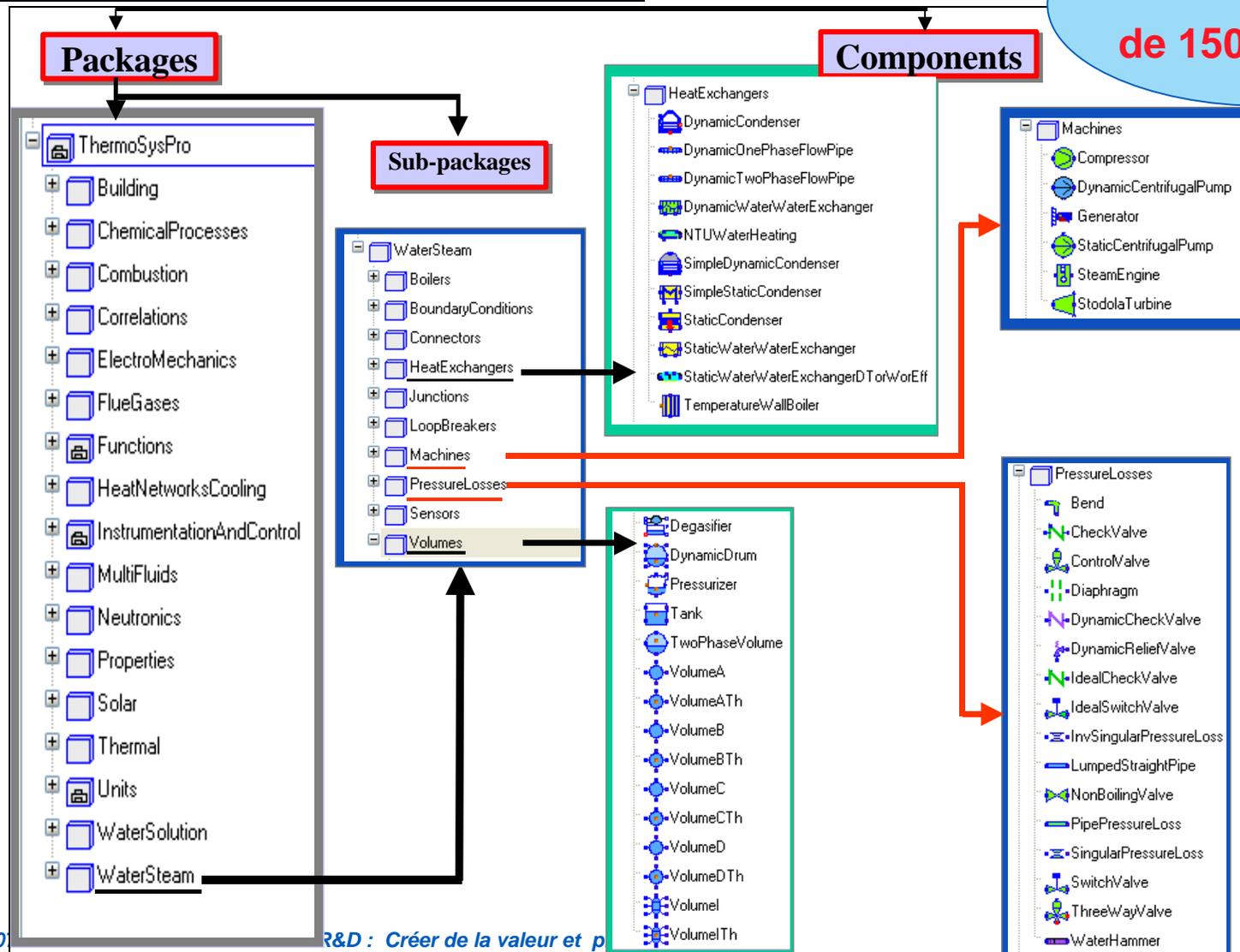
Bibliothèque 'ThermoSysPro'

La bibliothèque Modelica 'ThermoSysPro' a été développée dans le cadre du projet EUROSYSLIB, pour la modélisation physique des centrales de productions à l'échelle système :

- ▶ Open source,
- ▶ Multi-domaine,
- ▶ Différents niveaux de modélisation,
- ▶ Modélisation 0D/1D statique et dynamique (fondée sur les lois de conservation d'énergie de la masse et de la quantité de mouvement) ,
- ▶ Écoulement monophasique et diphasique,
- ▶ Inversion de débit .
- ▶ ...

Bibliothèque 'ThermoSysPro'

Structure de la bibliothèque

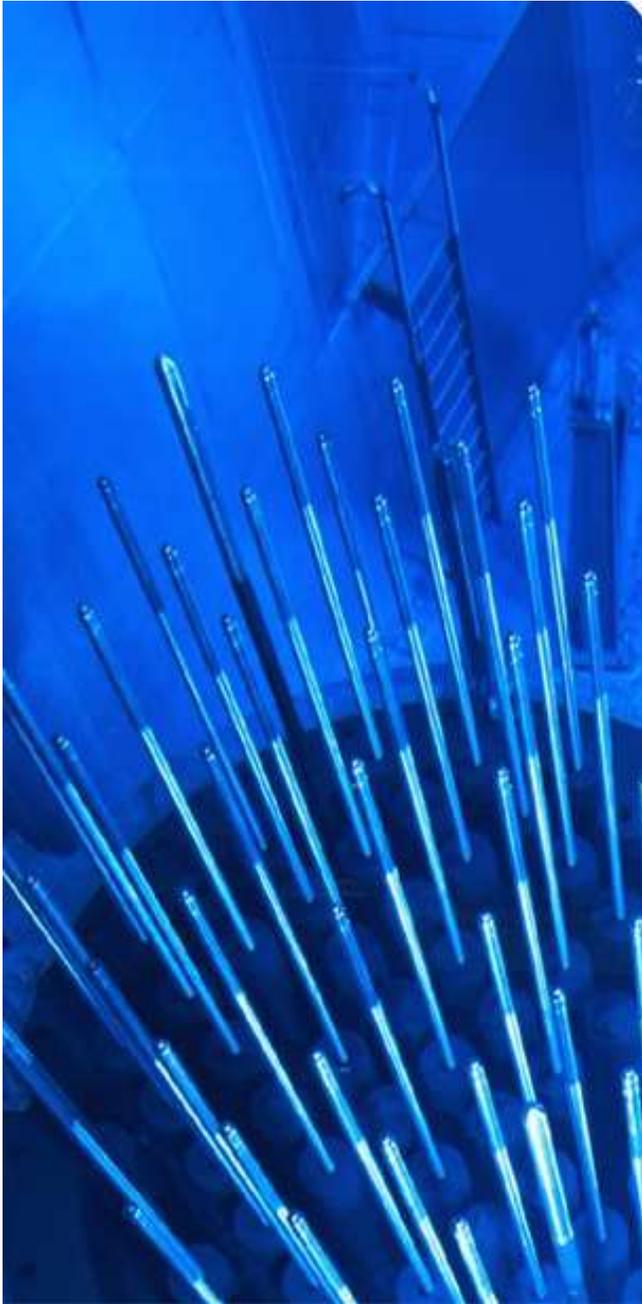


Bibliothèque 'ThermoSysPro'

La bibliothèque contient :

- ▶ Plus de 150 modules génériques,
- ▶ Plus de 20 modèles de centrales d'énergies (MiraFiori, Biomasse, Valorisation de chaleur, TAC, ...),
- ▶ Un modèle dynamique complet d'une tranche nucléaire P4,
- ▶ Un modèle dynamique partiel d'une tranche nucléaire P'4,
- ▶ Un modèle dynamique complet d'une centrale à cycles combinés (PhuMy),
- ▶ Un modèle statique d'une centrale à cycles combinés (Rio Bravo),
- ▶ Un modèle dynamique d'une centrale solaire,
- ▶ Un modèle statique complet d'une tranche ThF (Q600),

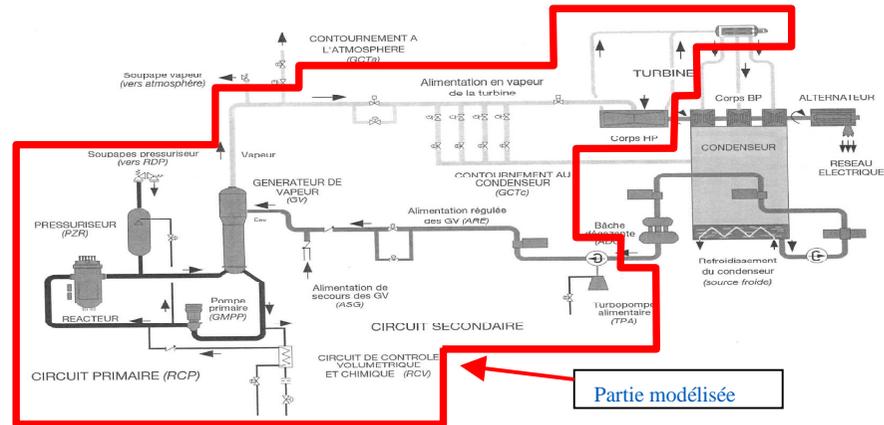
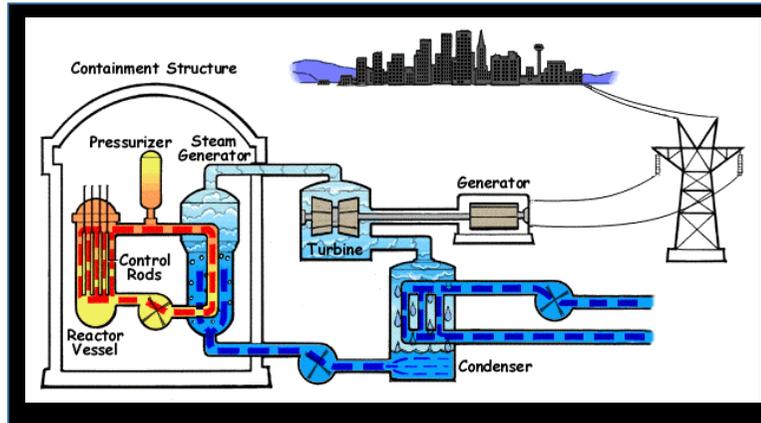




Modèle physique/neutronique de l'outil d'aide au pilotage du transitoire sensible

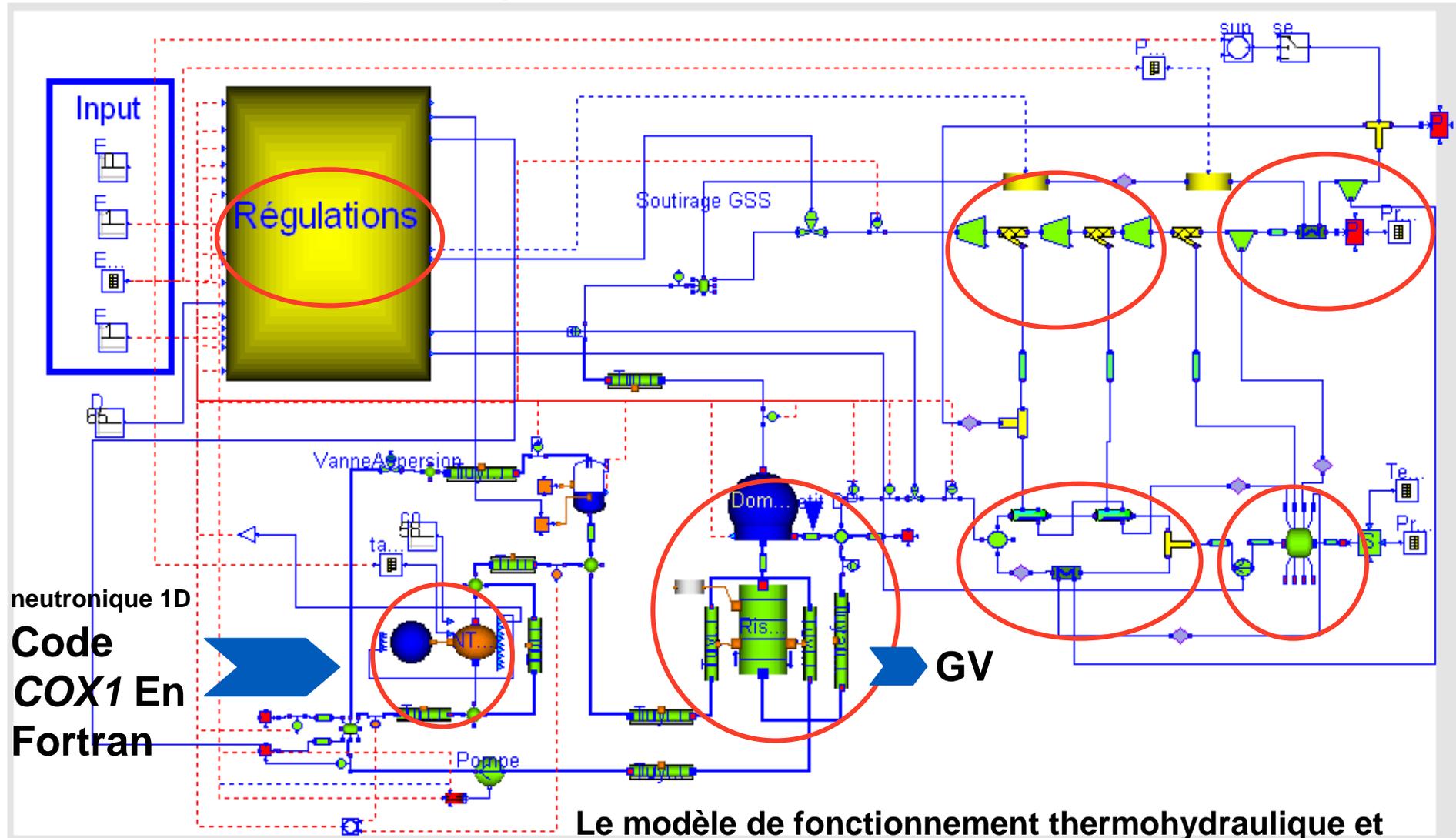
Modèle physique/neutronique de l'outil d'aide au pilotage du transitoire sensible

Contour du modèle



- **Modèle thermohydraulique (0D/1D)** : incluant les équipements principaux des circuits primaire et secondaire sollicités lors du transitoire, afin d'anticiper l'effet de manœuvre de matériels sur la montée (basculement GSS),
- **Modèle neutronique 1D** : pour calculer le flux et des paramètres tel que le D_{pax} (utilisation du code Fortran NTTX, basé sur COX1),
- **Modèle de CC** : incluant les régulations sollicitées lors du transitoire (niveaux GV et PZR, pression PZR, régulations TPA et ventilations GSS,

Modèle physique/neutronique de l'outil d'aide au pilotage du transitoire sensible



Le modèle de fonctionnement thermohydraulique et neutronique en régime **dynamique** d'une tranche P4 développé sous Modelica (EPO_P4)

Modèle physique/neutronique de l'outil d'aide au pilotage du transitoire sensible

Ce modèle comprend :

■ 1. Côté primaire :

- Le GV (1D),
- Une branche chaude (1D),
- Une branche froide (1D),
- Un GMPP (motopompe),
- Le cœur (thermohydraulique 1D et neutronique 1D),
- Le pressuriseur,
- La vanne d'aspersion PZR,
- Les régulations,
- ...,

■ 2. Côté secondaire :

- Le GV (1D),
- La vanne d'admission turbine HP,
- Le corps turbine HP et ses soutirages,
- Le GSS : Sécheurs –surchauffeurs + ventilation,
- Les réchauffeurs haute pression : RE5 et RE6,
- Le RCS : Refroidisseurs des Condensats des Surchauffeurs,
- La turbo-pompe alimentaire,
- La bache alimentaire,
- Les régulations,

Modèle physique/neutronique de l'outil d'aide au pilotage du transitoire sensible

Statistique du modèle

Le modèle de la centrale P4 (EPO_P4), comprend :

- ▶ 524 modules élémentaires,
 - ▶ 7729 variables dont 203 variables d'état ,
 - ▶ 1837 équations.
-
- Le modèle converge rapidement à condition que les variables d'itération ($\cong 5\%$ de toutes les variables) soient correctement initialisées par l'utilisateur.
 - Le temps de simulation est 60 fois plus rapide que le temps réel,

Modèle physique/neutronique de l'outil d'aide au pilotage du transitoire sensible

Calage du modèle

La phase de calage consiste à imposer au modèle les valeurs des certaines variables de sortie (**valeurs mesurées sur site, notamment disponibles sur ORLI**) et l'outil calcule certaines entrées (**paramètres internes**).

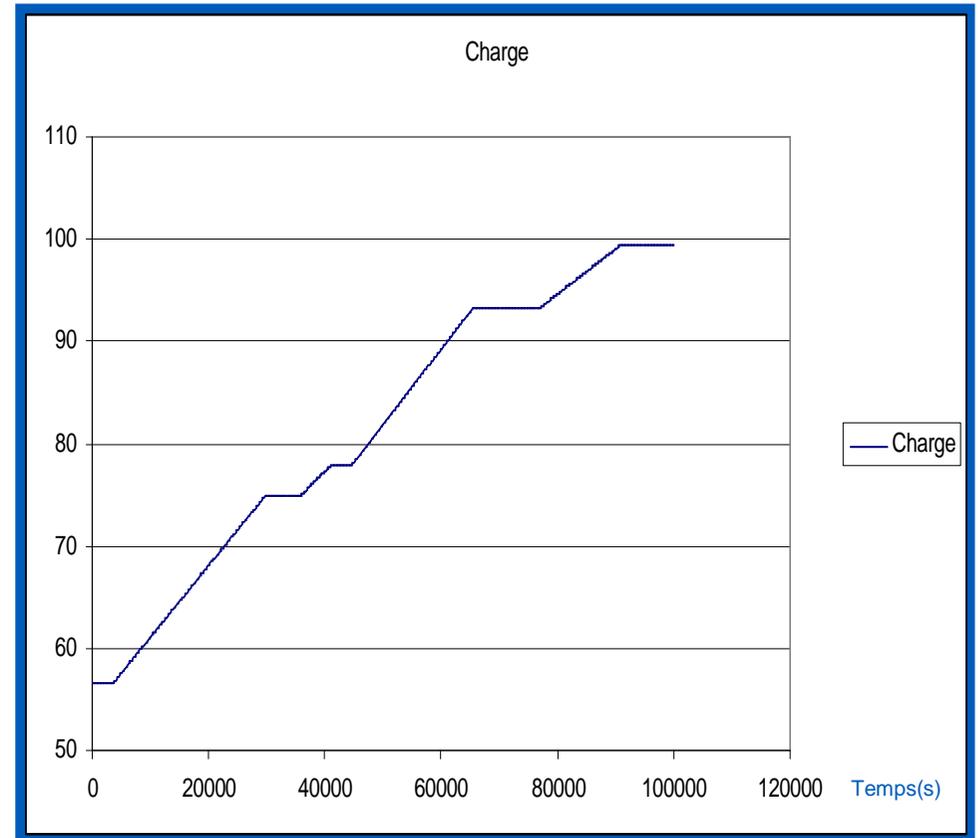
Le calage nous permet de calculer :

- **Échangeurs** : les coefficients de perte de charge et les coefficients d'échanges,
- **Turbines à vapeur** : les coefficients de Stodola,
- **Pompes** : les caractéristiques,
- **Vannes** : C_{vmax} et les ouvertures,
- **Pressuriseur** : paramètres de regulations,
- **GV** : paramètres de regulations,
- ...,

Modèle physique/neutronique de l'outil d'aide au pilotage du transitoire sensible

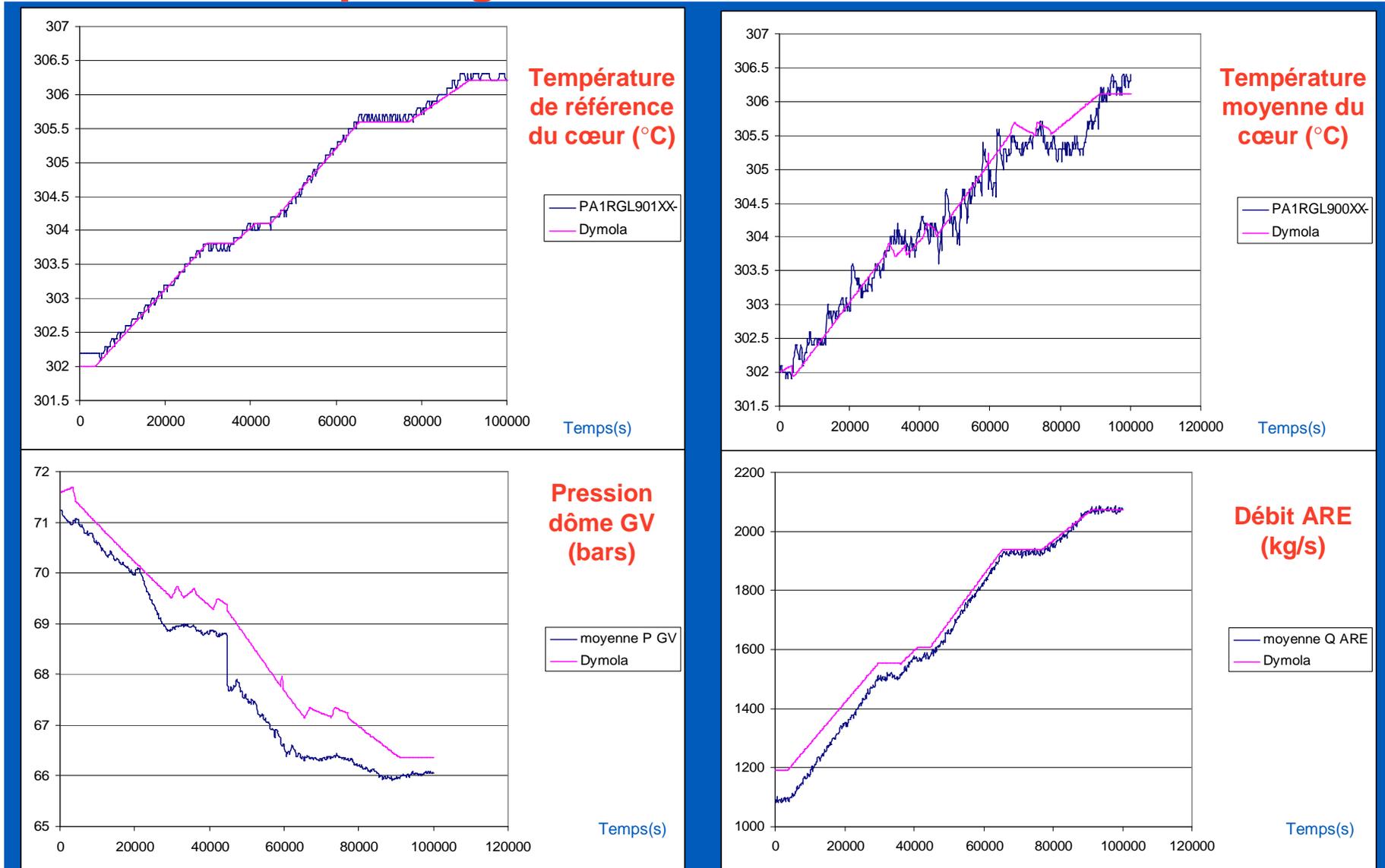
Résultats de simulation

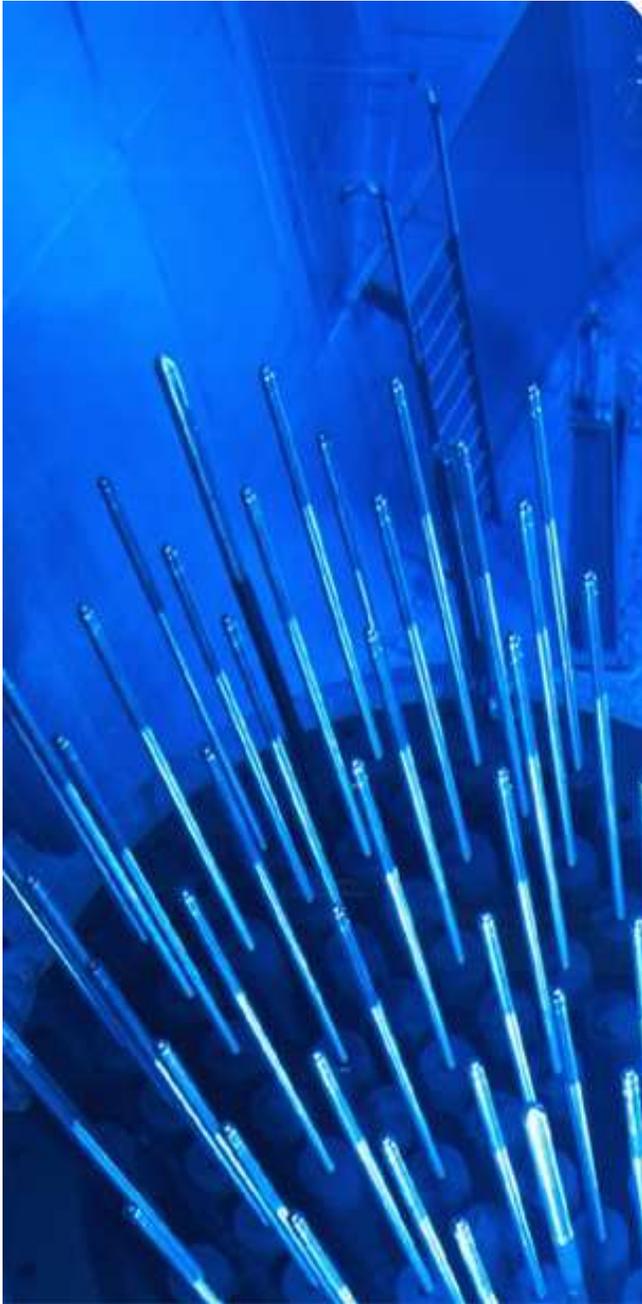
- ▶ Le modèle EPO_P4 a été testé sur un scénario réel de montée représentatif d'une montée en charge de **56%** à **99.5%Pn** de **Paluel 1**,
- ▶ La conduite de la montée en charge sur critère de 3% Pn/h intervient lorsque la puissance de la tranche est au-dessus de 48 % Pn.



Montée en charge lissée donnée en entrée du modèle (données ORLI)

Modèle physique/neutronique de l'outil d'aide au pilotage du transitoire sensible





Maquettage d'un outil d'aide au pilotage sous Excel/VB

Maquettage d'un outil d'aide au pilotage sous Excel/VB

Un outil d'aide à la montée en puissance après rechargement à été développé par EDF R&D sous Excel/VB

- ▶ L'outil reposant sur un modèle physique/neutronique de simulation du transitoire de montée à 3%Pn/h,
- ▶ L'outil utilise le modèle Dymola « P4 » (l'exécutable) sous une interface Excel développé à l'EDF R&D

l'interface Excel du modèle « P4 »

	A	B	C
1	P4_m2.E_Charge_debut	P4_m2.E_Charge_fin	P4_m2.Pression_Bache_debut
2	0.568	0.614	63000
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			

Ex: Interface Excel d'un modèle Biomasse

Données d'entrée		Valeurs initiales	
Turbine			
P d'admission	80.0	90.0	[bar]
T d'admission	480.0	520.0	[°C]
Q d'admission	20.0	96.6	[t/h]
Valeurs initiales			
P soutirage HP1	75.0	75.0	[bar]
Q soutirage HP1	0.0	0.0	[t/h]
P soutirage MP2	20.0	18.4	[bar]
Q soutirage MP2	6.0	0.0	[t/h]
P soutirage BP3	3.4	3.5	[bar]
Q soutirage BP3	0.0	21.0	[t/h]
Soutirage 3 Régulé	Non	Non	
Vide au condenseur	0.2	0.1	[bar]
Rendement alternateur	97.4	97.4	[%]
Rendement réducteur	98.7	98.7	[%]

Résultats		
Puissances fournies		
Puissance électrique produite	21.6	[MW]
Puissance électrique nette	20.1	[Mwe]
Puissance chaleur fournie	13.8	[MW]
Puissance entrée chaudière	70.1	[MW]
Puissance sortie chaudière	73.5	[MW]
Débit de vapeur fourni	8.0	[t/h]
% de soutirage sur débit vapeur	0.4	[%]
Débit biomasse	17.7	[t/h]
Efficacité globale		
Rendement élec. brut sur PCI	30.9	[%]
Eff. énergétique brut sur PCI	50.6	[%]
Eff. énergétique nette	48.5	[%]
Rendement chaudière sur PCI	104.9	[%]
Energie produite		
Volume d'électricité produit	86 453	[Mwhe/an]
Volume d'électricité net	80 453	[Mwhe/an]
Volume de chaleur client	27 677	[MxMth/an]

Maquettage d'un outil d'aide au pilotage sous Excel/VB

L'outil aide les opérateurs à :

1. Optimiser la pente de montée en puissance,
2. Optimiser la vitesse d'acquisition et le maintien des critères de stabilité aux paliers 80% et 100%,
3. Améliorer la sûreté de la tranche lors de cette opération.

L'outil ne pilote pas à la place des opérateurs, c'est une aide à la surveillance et à la prise de décision

Maquettage d'un outil d'aide au pilotage sous Excel/VB

Fonctions principales de l'outil d'aide à la montée à 3%Pn/h

L'étude des Facteurs Humains (EDF R&D MRI) a mis en évidence le besoin de neuf fonctionnalités pour l'outil :

Fonction 1 : Aide au suivi des paramètres de pilotage du réacteur,

Fonction 2 : Aide à l'évaluation par rapport à un état modélisé actuel et futur,

Fonction 3 : Aide à l'évaluation par rapport aux limites de sûreté,

Fonction 4 : Aide au suivi des actions de pilotage,

Fonction 5 : Aide à la détermination de l'amplitude des actions,

Fonction 6 : Aide à la régularité des actions,

Fonction 7 : Aide à la détermination des actions lors de l'oscillation xénon,

Fonction 8 : Aide à la simulation d'actions de pilotage,

Fonction 9 : Suggestion d'actions de pilotage.

Maquettage d'un outil d'aide au pilotage sous Excel/VB

■ Interface principale

Affichage de l'optimum passé et futur

État réel et passé

Ensemble des informations nécessaires à une prise de décision efficace

Fonctions

Suivi et affichage des actions

INFORMATION PILOTAGE	
Compens. Xe & puiss.	100L à 12m3/h toutes les 5min
Efficacité R	1 pas = 0.1C
Efficacité bore	30L à 3m3/h -> -0.1C
Efficacité eau	100L à 12m3/h -> 0.1C
Vol. neutralisation eaubore	72L

Maquettage d'un outil d'aide au pilotage sous Excel/VB

■ Configuration des objectifs

Configuration des objectifs

N°	Objectif	Pth	Gradient visé	Tm-Tref max	AO visé	Dérive AO max
1	Atteindre 80 %Pn	61.4	+ 2.3	+ 0.1	+ 2.5	+ 0.3
2	Stabilité 80 %Pn	78.2	0	0.5	2.5	0.3
3	Préparer montée à 100 %Pn	79.5	0	0.3	2.5	0
4	Atteindre 100 %Pn	99.3	+ 2.8	+ 0.3	+ 2.5	+ 0.5
5	Stabilité 100 %Pn	100	0	0.3	2.5	0.3

Ajouter un objectif Valider Fermer

■ Actions Suggérés

Actions calculées par simulation

Dilution 100L à 12 m3/h
dans 8 min 27

Dilution 80L dans 00:38:37

Extr. R à 234 pas dans 00:48:47

Fermer

Proposition d'actions de pilotage

INFORMATION PILOTAGE

Compens. Ye & puiss.	100L à 12m3/h toutes les 5min
Efficacité R	1 pas = 0.1C
Efficacité bore	30L à 3m3/h -> -0.1C
Efficacité eau	100L à 12m3/h -> 0.1C
Vol. neutralisation esubore	72L

Objectif visé

- Stabilité 80 %Pn
- Atteindre 80 %Pn
- Non disponible

Aides au pilotage

- Actions suggérées
- Simuler les actions
- Configuration
- Configurer les objectifs
- Réglage
- ON / OFF
- Réinitialiser l'outil

Maquettage d'un outil d'aide au pilotage sous Excel/VB

■ Simuler des actions

SIMULER DES ACTIONS

DILUTIONS / BORICATIONS

Dilution Borication \diamond 100 l. à \diamond 18 m³/h + Ajouter à la liste des actions simulées

Toutes les \diamond 10 min. Une seule fois heure : \diamond 15 h \diamond 45 min.

GROUPE R

Extraction Insertion \diamond 0,5 pas + Ajouter à la liste des actions simulées

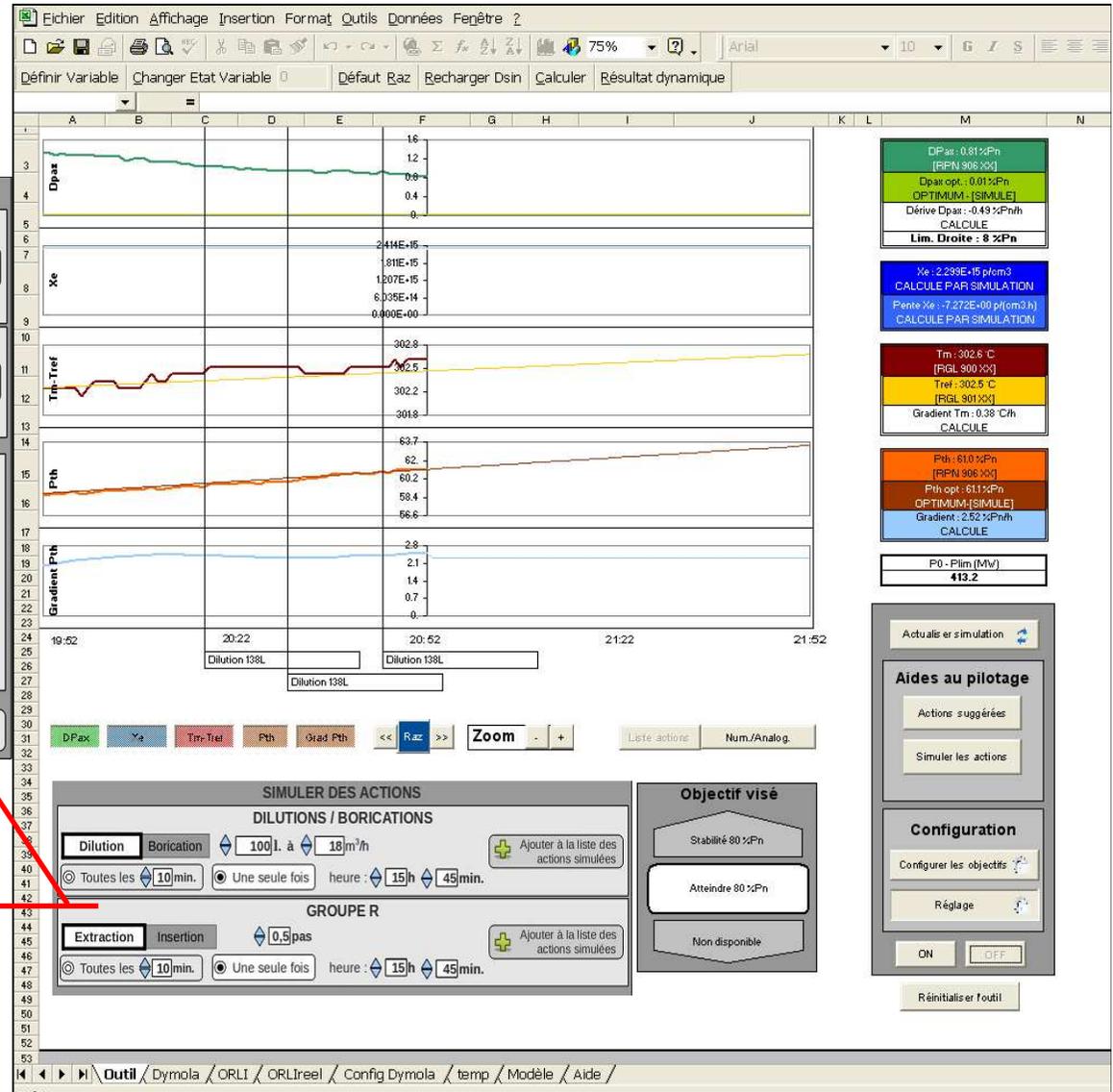
Toutes les \diamond 10 min. Une seule fois heure : \diamond 15 h \diamond 45 min.

LISTE DES ACTIONS SIMULÉES

Décaler toutes les actions de : \diamond 3 min.

N°	Date/heure	Action
1	11/12/2011 \diamond 15 h \diamond 45 min.	Dilution 100 l. 18 m ³ /h
2	11/12/2011 \diamond 15 h \diamond 55 min.	Dilution 110 l. 18 m ³ /h
3	11/12/2011 \diamond 16 h \diamond 05 min.	Dilution 110 l. 18 m ³ /h
4	11/12/2011 \diamond 16 h \diamond 15 min.	Extraction R 0,5 pas

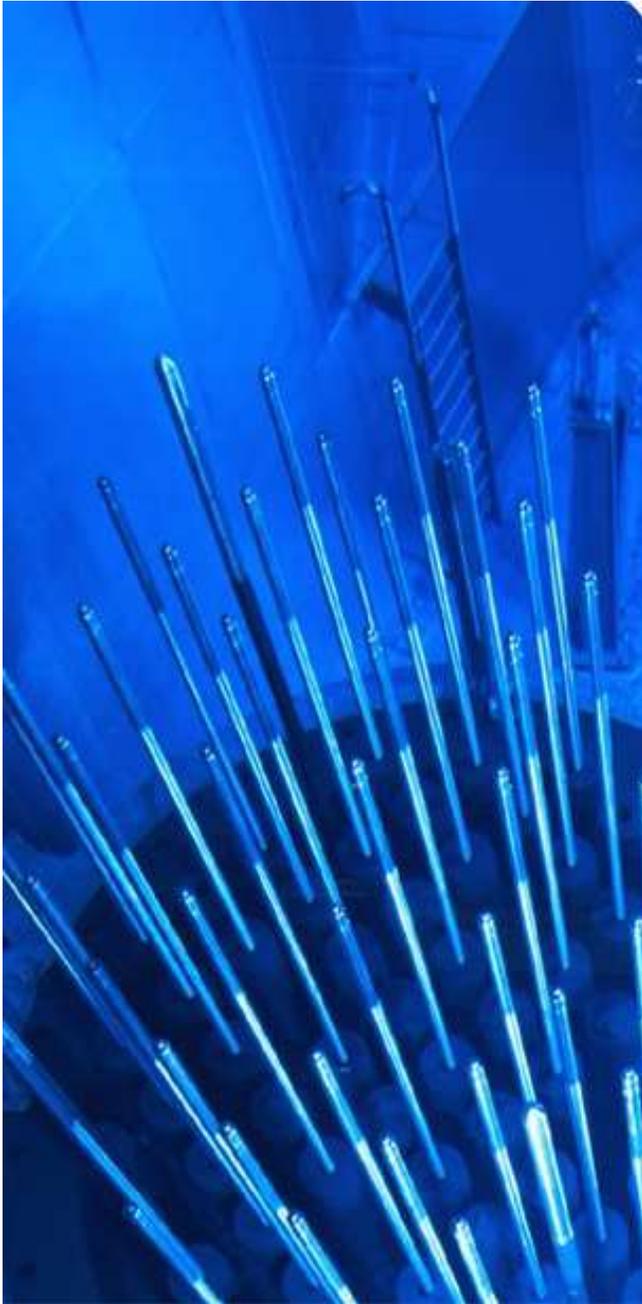
Simulation d'actions dilution/borication, insertion/extraction du groupe R



Conclusion

Le modèle EPO_P4 a été testé sur des scénarios de montée très contraignants (de 50% à 100%Pn)), les résultats montrent que :

- ▶ Le comportement physique est respecté,
- ▶ Le modèle est très robuste,
- ▶ La simulation est très rapide (60 fois plus rapide que le temps réel).



Merci de votre attention