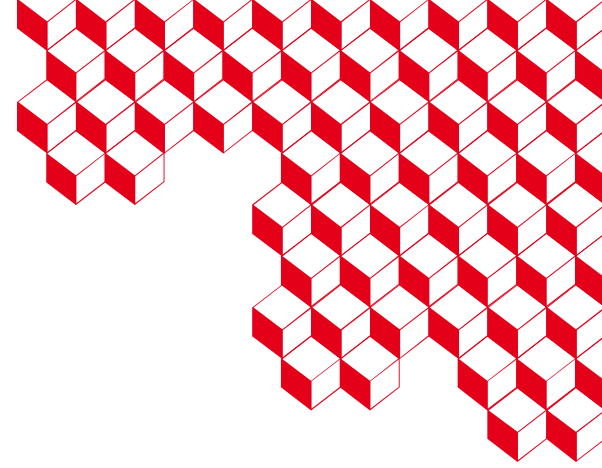




iresne



Activité Cycle & Modelica par ThermoSysPro : contexte, études & développement, retour utilisateurs et sujets d'intérêt

Nicolas Alpy, (G. Vescovi), Duc Nguyen

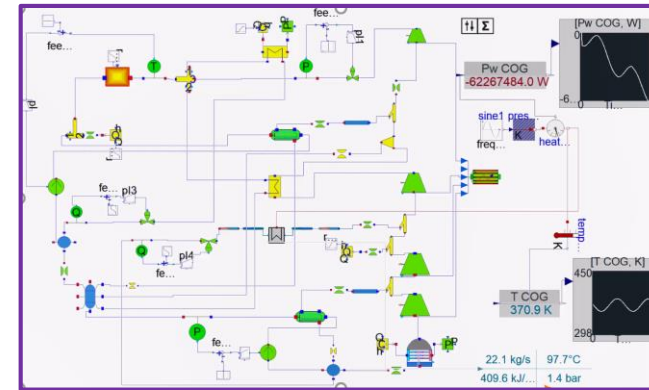
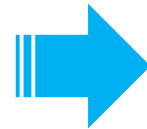
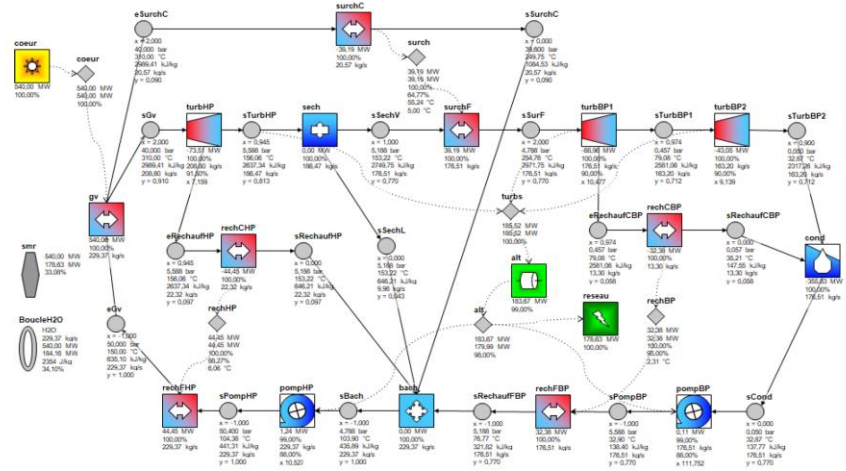
nicolas.alpy@cea.fr

*Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
CAD-DER/SESI/LEMS*

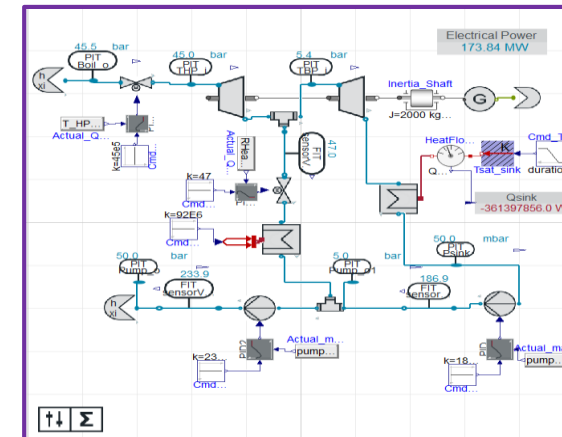
1 Contexte: ingrédients du guidage vers ThermoSysPro

- Projet CEA IDNES (2019 →) : Innovative Decarbonized Nuclear Energy Systems
 - Recherche d'un outils *flexible* pour modéliser la *flexibilité* du **BoP Rankine eau d'un SMR** (en //, dév. CATHARE)
 - Modelica partagé par divers organismes de R&D : CEA/LITEN, EDF, universités UE, INL
 - Pléthore de bibliothèques possibles
 - Clara (connexion Dymola) et TSPro bénéficient d'un cadre de validation (+ supposé que démontré!)
- Choix: Grille multicritère, évaluation de verrous (connecteur et MSL) et **cas-tests associés**

Hybridation ThermoSysPro - Clara



Clara



CYCLOP – CEA/IRENE

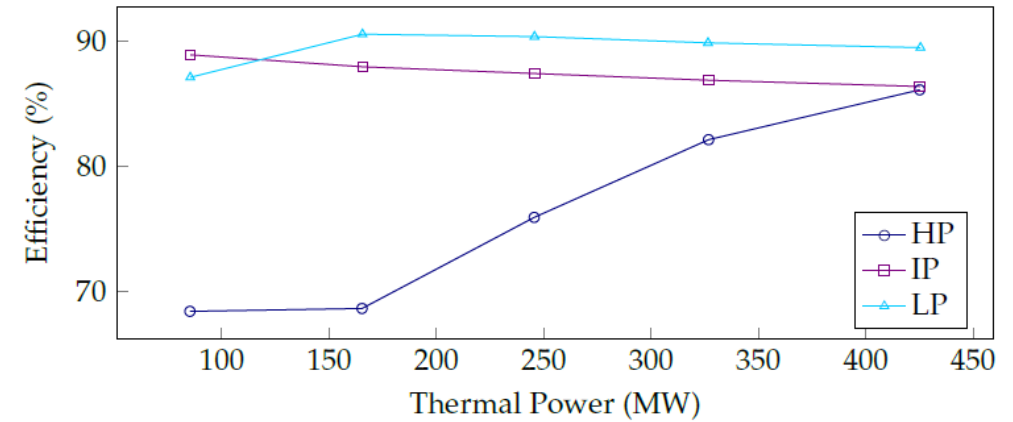
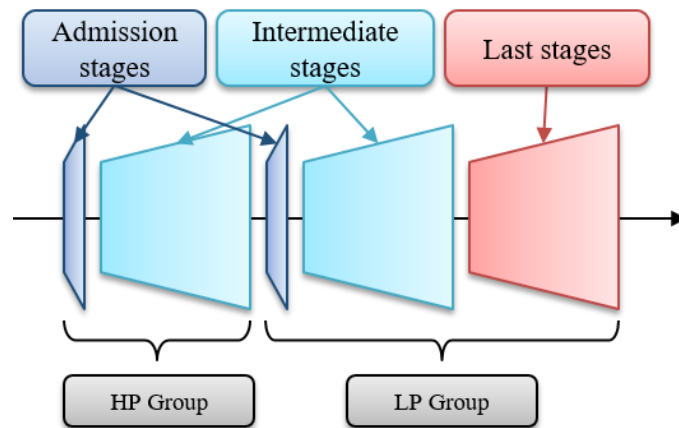
david.haubensack@cea.fr

2 Cas d'étude et développement: modélisation admission partielle

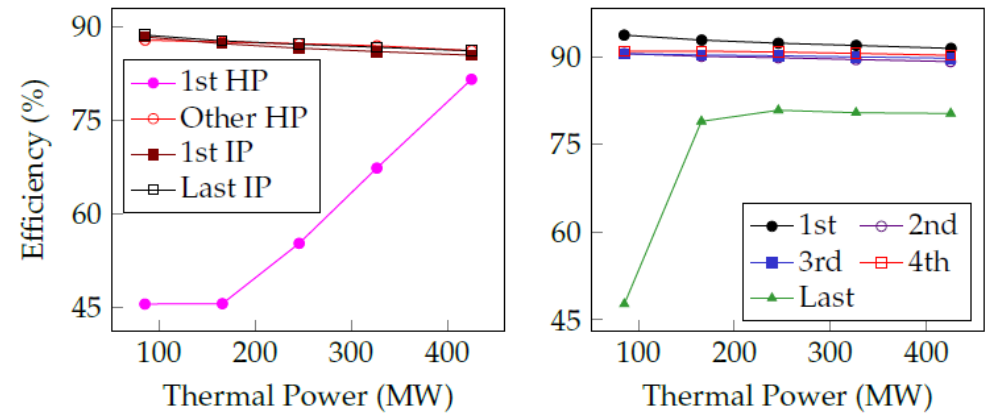
Objectif : recherche de gain de performance en variation de charge mécanique → flexibilité !

Littérature : admission et échappement turbine → pertes au 1^{er} ordre

Limite analyse: informations pour un mode pression glissante sur les corps intermédiaires, a priori!



(A) Efficiency of HP, IP and LP turbine groups

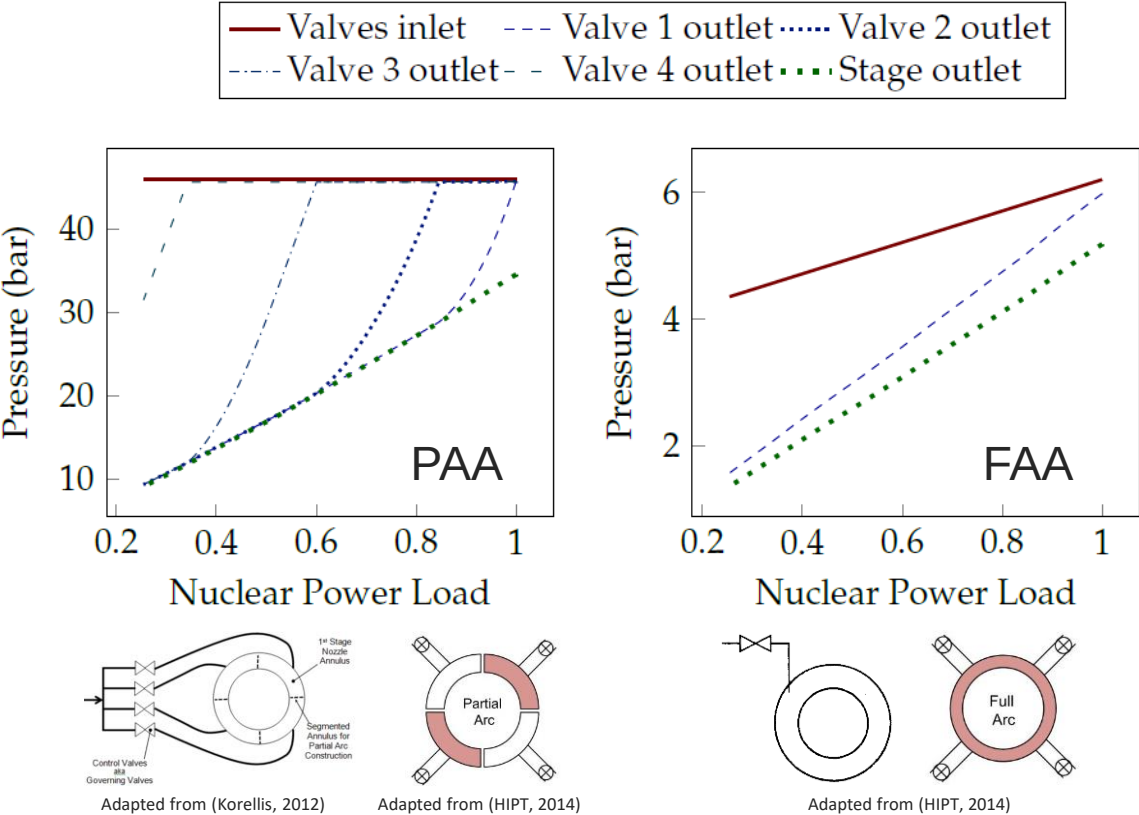


(B) Efficiency of HP and IP stages

(C) Efficiency of LP stages

FIGURE 3.1: Efficiency characteristics in a steam turbine during load following. Adapted from (Hesler, 2004).

2 Cas d'étude et développement: modélisation admission partielle



- Principe de l'admission partielle: maintenir la pression entrée rotor alors que la pression de sortie glisse (cf. ellipse de Stodola) → accroître le RP
- Développement d'un modèle dédié, base TSPPro:

General Valves Control Add modifiers Attributes

Component

Name pAA1

Comment

Model

Path BOP_Nuward_Duc_v3.ControlStage.FirstStage_corr_P3_ramp_pro3_V3_P1_EW_corr_rho_W_eff_frac_Fridh_massavg_Ax_optLoss_kPi

Comment

Parameters

Control_Type "PAA" Select the type of governing stage (constant pressure)

T0 15 °C Dead State Temperature

Losses

Constant_W_when_choked_arcs ☒ W remains constant when arc is choked

Only_V3_Loss ☒ true = Only considers the loss of kinetic energy at outlet, false = considers profile, secondary, incidence, kinetic energy and Partial Admission Losses

FracV3Lost_arcs 1

pitch_rel_S 0.81 pitch / chord

chord_S 0.052

pitch_rel_R 0.6 pitch / chord

chord_R 0.021

Initialize

Qin_init 225.5 kg/s Nominal mass flow value entering governing stage (used to initialize mass flow in section stages)

hin_init 2940527.988650269 J/kg Nominal enthalpy value at inlet of governor

V2_init 300 m/s Nominal speed value at rotor inlet of governor

Arc Sections

A2_arc1.start ☒ 0.011010161416378473 m² Stator outlet area of Arc

A2_arc2 ☒ pAA1.A2_arc1 m² Stator outlet area of Arc

A2_arc3 ☒ pAA1.A2_arc1 m² Stator outlet area of Arc

A2_arc4 ☒ pAA1.A2_arc1 m² Stator outlet area of Arc

n_shaft 3000 rev/min Rotational shaft speed

DR_fs 0 Degree of reaction of the rotor (DR=0)

D_fs.start ☒ 1.2069562225505066 m Diameter of first stage

eta_N_arcs 1 Nozzle efficiency: Same

gamma_arcs 1.285 Specific heat ratio (Cp/Cv)

alpha2_arcs 75 ° Stator blade angle

beta3_arcs -56.073536 ° Rotor blade angle

zeta_R_arcs 0 Relative loss rotor blade

PID controller

TSPPro@CEA/IRESNE

Pression sortie vanne ~ pression entrée rotor
(étage à action: pas de diffusion Ec → P dans le stator)

2 Cas d'étude et développement: modélisation admission partielle

Application SMR: projet CEA IDNES

Conference Paper
Partial Arc Admission in an SMR Steam Turbine to Improve Load Following: Model Benchmark, Thermal-Hydraulic Mechanism Analysis and Application Case in a Full Rankine Cycle
Vescovi, G., Alpy, N., Haubensack, D., ... Stouffs, P., Charvet, A.
Proceedings of the 20th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NURETH 2023, 2023, pp. 5267–5280

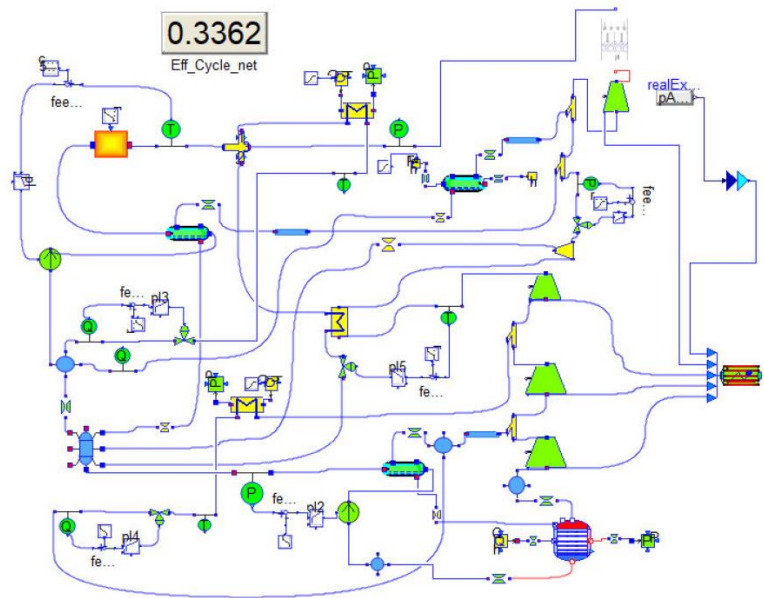


Figure 4. Water-steam Rankine cycle for an SMR-PWR nuclear power plant created with Dymola for part-load simulations.

Integrated Energy Systems

Partial Arc Admission in an SMR Steam Turbine to Improve Load Following: Model Benchmark, Thermal-Hydraulic Mechanism Analysis and Application Case in a Full Rankine Cycle

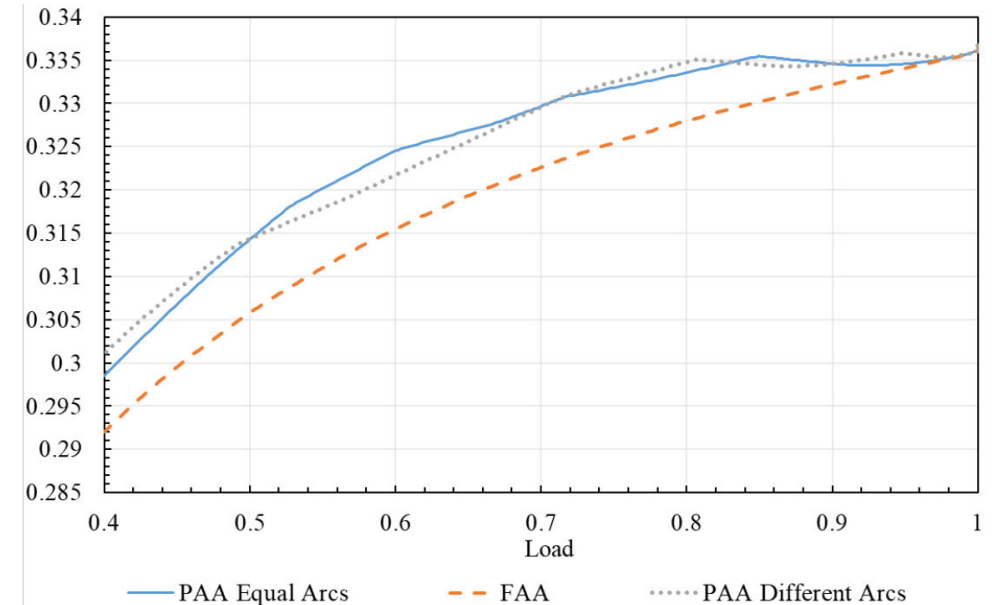


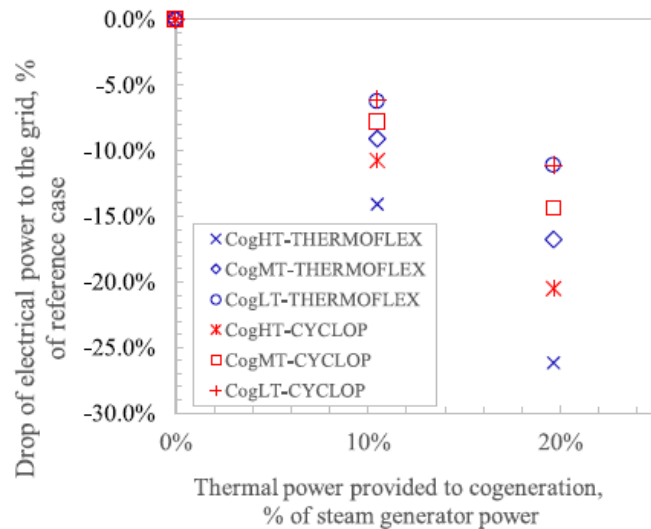
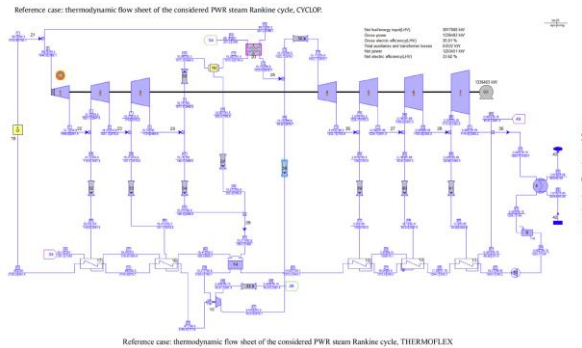
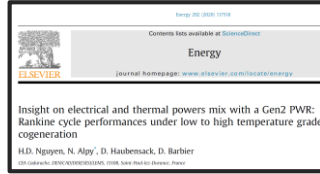
Figure 5. Net efficiency of SMR-PWR Rankine cycle during load following.

- Un potentiel de 1 à 2 points de gain sur le rendement
- Suivi de fréquence : **zone opératoire 80-100% très favorable**
- Quelques dixièmes perdus à 100%PN

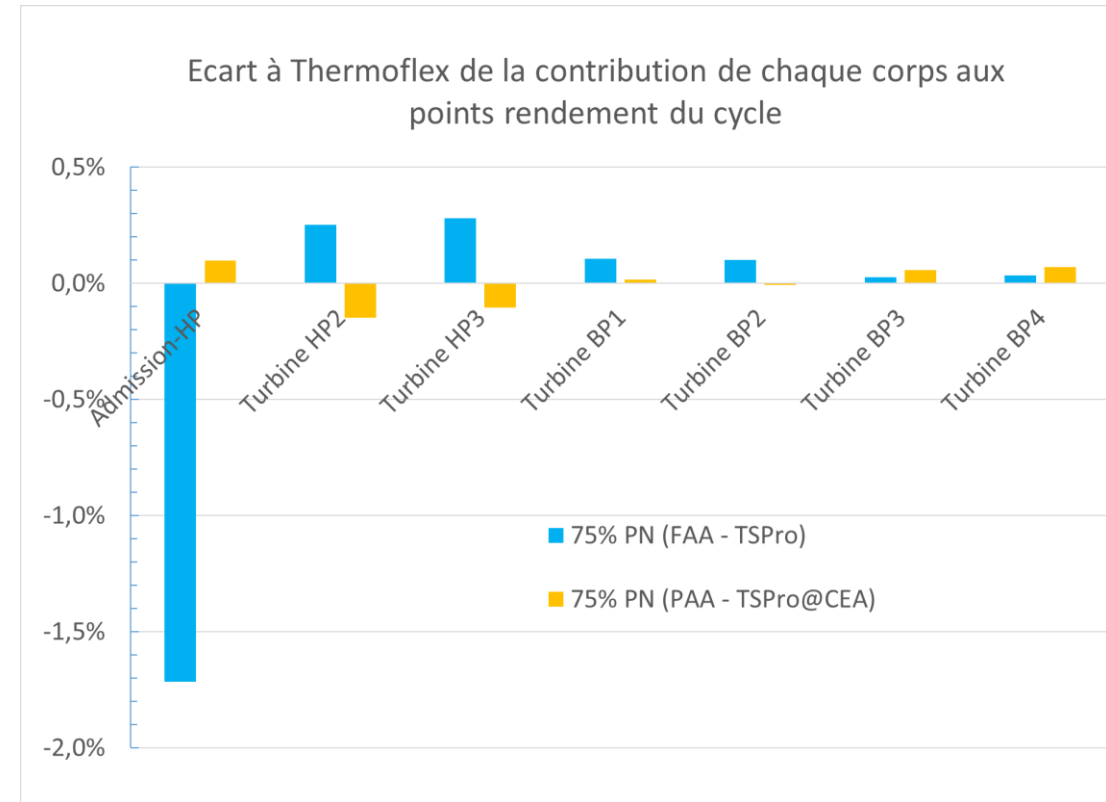
→ Etendu et optimisé au cours de la thèse :
(demande de brevet déposée)

2 Cas d'étude et développement: benchmark Thermoflex

2018 : benchmark CYCLOP –
Thermoflex, REP1300 en
cogénération



2024 : benchmark ThermoSysPro – Thermoflex d'un SMR en SDC élec.
Objectif: qualifier l'**admission partielle** (Tfx: MVL)

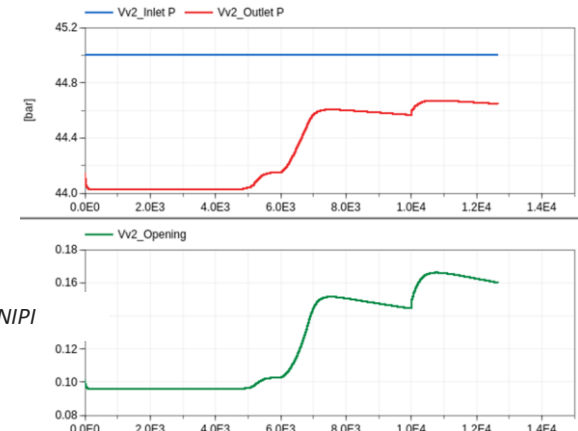
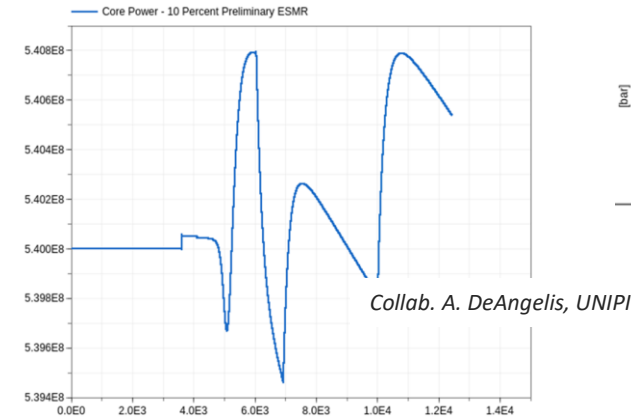
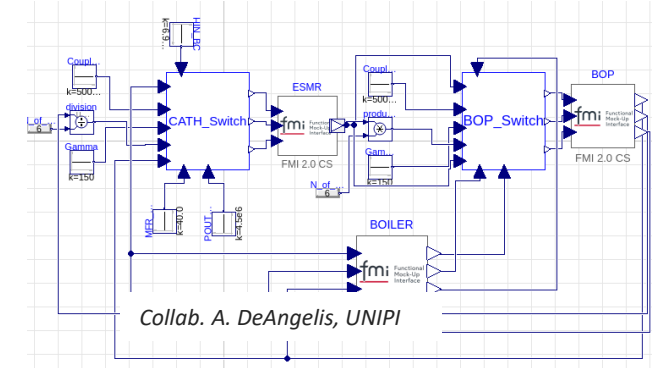
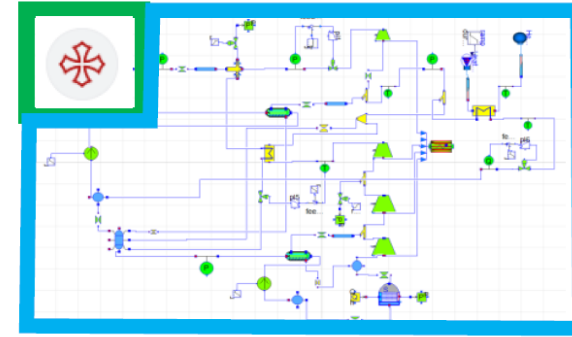


Avec admission TSPPro@CEA:

- performances très proches de TFX à 75% PN
- + de potentiel que Thermoflex MVL a priori : jeu de dimensions → informations pour corrélations thermohydraulique, mécanique

2 Cas d'étude et développement: développement couplage FMU par voie fluide

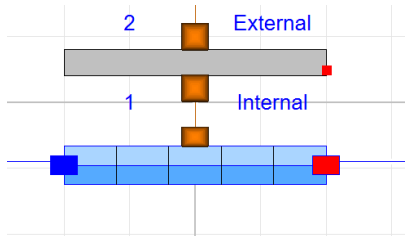
- Contexte projet UE TANDEM : intention de couplage code système (Cathare, Athlet) et BoP Modelica
- Voie originelle TANDEM, D2.1 : FMU par port thermique
- Alternative CEA/IRESNE proposée: FMU par port fluide. Intérêts vus:
 - Le GV est entièrement sous une responsabilité!
 - Plug&play connecteurs plutôt que interfaçage du maillage
- Développements de source et puit compatibles FMU (base TSPPro): échanges P, Q, H et démo.



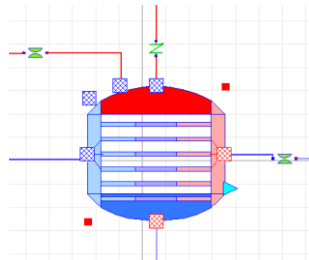
Résultats provisoires ... mais opérationnalité démontrée

3 Retour d'expérience utilisateurs: éléments, subjectifs

	PROS	CONS	Commentaires
Prise en main - support	+		- Formation Itech (demandeur complément +avancé) - Nombreux exemples, avec CL variées et CC
Par rapport à la concurrence	+		Effet poupées russes: limité Livre 2019 de B. El-Hefni & D. Bouskela Réflexion numérique originale Environnement développement favorable: à co-construire?
Validation <u>livrée</u>		-	Unique: cas d'ilotage sur le modèle réchauffeur (quid transitoire d'ilotage sans $\sim \Omega_{\text{turbine}}$?)
Librairie Water-Steam	+		Nous a permis - en peu de temps - de réaliser des études projet b : Physique : moment cin. machine tournante = $\{\emptyset\}$, quid bâche? Numérique: $\exists$ composants 2φ fragiles
Librairie Fluid		-	- Opérationnalité - Compatibilité import BDD thermo. → problématique centrale - Compatibilité MSL et FMU fluide → Sisyphe@CEA
Contrôle-commande	+		Modules poussés fournis. Mais non-documentés



Full dynamique: peut être instable ?



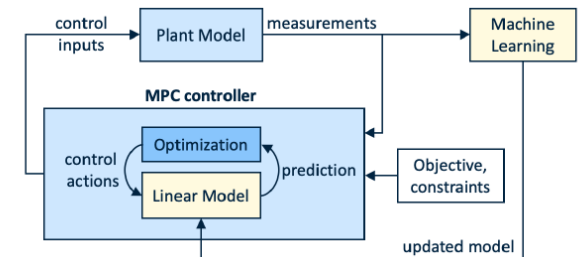
Selon initialisation, on peut obtenir $X_v = 1$?

4 Sujets d'intérêt : flexibilité poussée → stabilité ← contrôle base IA

- **Thèse, Nov. 24** → « *Dynamique d'un cycle à vapeur surchauffée pour la cogénération électricité-chaleur avec service réseau : analyse de stabilité et pilotage de la flexibilité* »
- **Motivations initiales:**
 - GV *simple-passe*, plus dynamique que *à recirculation* → un atout potentiel pour flexibilité et compacité
 - Potentiellement + instable selon raideur des rampes (cf. 20% PN/min TAG) & localisation cogénération (eg. sortie GV)
 - Non-linéarité plus forte : inertie versus forces d'accélération et de flottabilité
 - Modélisation moins pardonnante numériquement
 - Intérêt pilotage par modèle embarqué (IA)
- **Objets de la thèse:**
 - Modélisation d'un GV simple-passe (drift, inspiré de **BACCARAT**)
 - Carte de stabilité avec la charge. Approche *linéaire*
 - Modélisation Système en flexibilité:
 - Rankine dynamique : dont suivi de fréq. pour la turbine
 - Couplage primaire
 - Stratégie de pilotage: eg. matrice RGA
 - Contrôle *optimisé, approche graduée*: prédictive, apprentissage, *non-linéaire*
 - Challenges - benchmark: GV à recirculation, rampe TAG
- **Extension-connexion possibles** : SCE à + forte NL, technique num. d'homotopie
- **Directeurs de thèse**: S. Grieu (U.Perpignan) et M. Medale (AMU)

A one-dimensional full-range two-phase model to efficiently compute bifurcation diagrams in sub-cooled boiling flows in vertical heated tube

Medale, M., Cochelin, B., Bissen, E., Alpy, N.
Journal of Computational Physics, 2020, 404, 109131



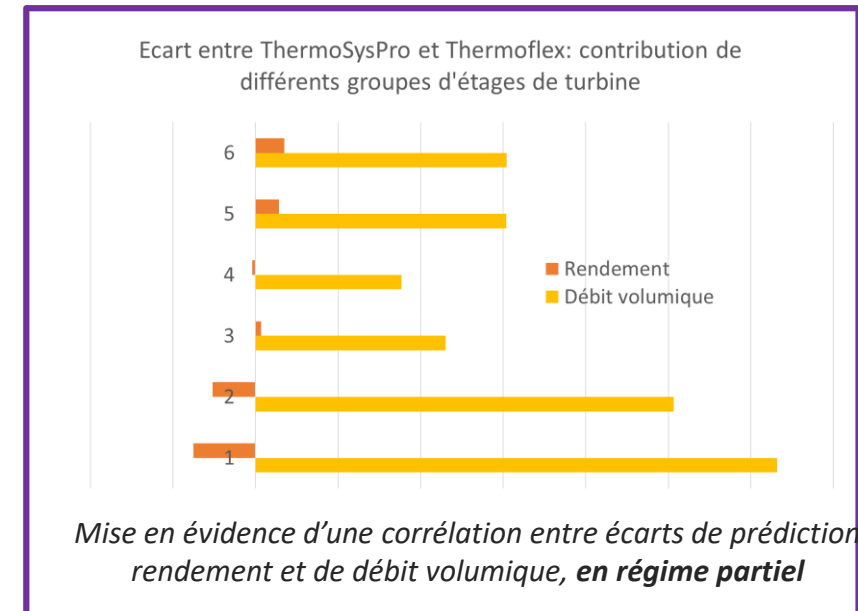
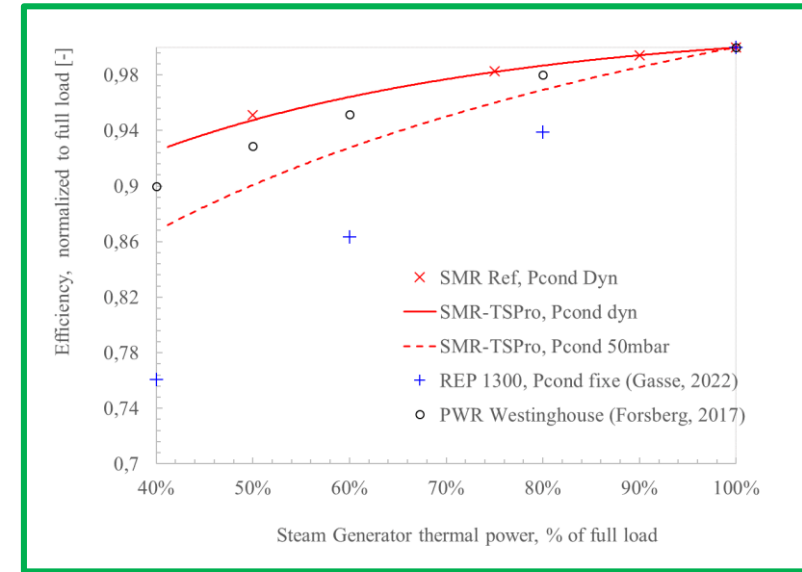
④ *Sujets d'intérêt* : modélisation turbine vapeur → SMR, AMR avec eau SC

Les performances en variation de charge demeurent un sujet:

- Avec du flou quant à **l'existant en simple suivi de charge é.**
- Donc plus fragile si on s'en éloigne : cas d'une cogénération poussée

Besoins clefs (complément du ③):

- **Validation:** en particulier dynamique et données en support (dont conception: eg. inertie, carte de perf.)
- **Développement:**
 - **Turbine:**
 - Statique:** *corrélation de pertes (avec support CFD idéalement):*
 - Effet de variation du débit vol., eg. pour cogénération poussée
 - Consolidation implantation PAA
 - Dynamique:** *équation de masse tournante : suivi fréq., ilôtage etc.*
 - + carte de performance ?
 - recouvre corrélation de pertes de l'approche statique ?
 - **Composants diphasique clefs:** apportant peu et bcp d'inertie



4 Sujets d'intérêt : modélisation cycle sCO₂ ou cycle + R&D → Gen4/AMR

- Cycle au sCO₂ : sujet d'une R&D *poussée* aux CEA/IRESNE & CEA/LITEN. Pour IRESNE et collab.:

Performance
thermodynamique du cycle

Mapping of the thermodynamic performance of the supercritical CO₂ cycle and optimisation for a small modular reactor and a sodium-cooled fast reactor

Pham, H.S., Alpy, N., Ferrasse, J.H., ... Haubensack, D., Saez, M.
Energy, 2015, 87, pp. 412–424

Pilotage de la non-linéarité
à la source froide

A numerical investigation of the sCO₂ recompression cycle off-design behaviour, coupled to a sodium cooled fast reactor, for seasonal variation in the heat sink temperature

Floyd, J., Alpy, N., Moiseyev, A., ... Sienicki, J., Avakian, G.
Nuclear Engineering and Design, 2013, 260, pp. 78–92

Remontée d'échelles: CFD →
coordonnées cartes de performance
code système

An approach for establishing the performance maps of the sc-CO₂ compressor: Development and qualification by means of CFD simulations

Pham, H.S., Alpy, N., Ferrasse, J.H., ... Cadiou, T., Saez, M.
International Journal of Heat and Fluid Flow, 2016, 61, pp. 379–394

Compresseur-pompe : cavitation

A numerical study of cavitation and bubble dynamics in liquid CO₂ near the critical point

Pham, H.S., Alpy, N., Mensah, S., ... Rodriguez, G., Saez, M.
International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 102, pp. 174–185

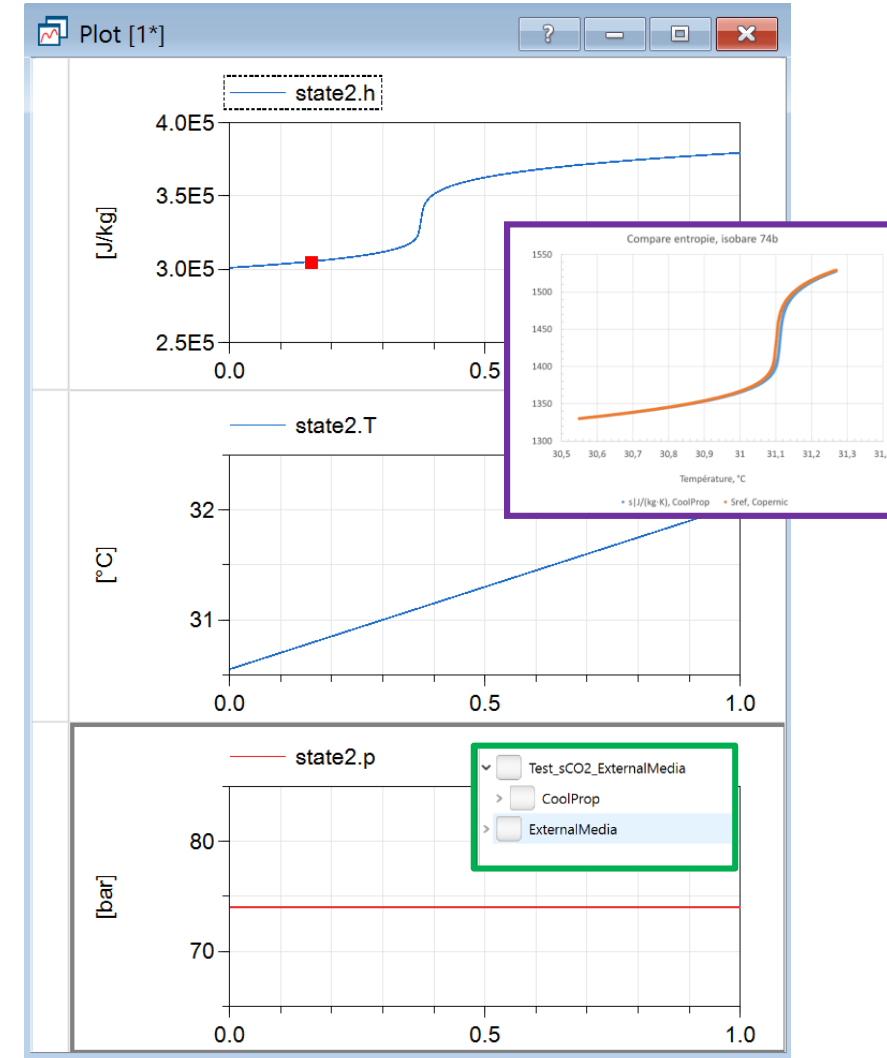
Hybridation solaire – SMR

HYBRIDIZATION OF A SMALL MODULAR REACTOR WITH A SOLAR POWER PLANT USING A SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE BRAYTON CYCLE

Tauveron, N., Pham, Q.T., Alpy, N.
Conference Proceedings of the European sCO₂ Conference, 2019, pp. 59–67

- Cycle complexe: vivier potentiel de sujets R&D en lien avec la flexibilité
- Chantier d'envergure !*
- Prérequis : lois thermodynamiques → eg. couplage avec **BDD thermodynamique** → Quid compatibilité TSPRO ?

Benchmark: Copernic@CEA/IRESNE & CoolProp



Annexe

BoP Dynamique: en progrès mais il reste bcp. de travail (briques manquantes, CC, test physique, etc.) pour une maîtrise **raisonnable** → cadre thèse 4

