



HAL
open science

Un modèle simple du PWR

Bertrand Mercier, Bruno Tarride

► **To cite this version:**

Bertrand Mercier, Bruno Tarride. Un modèle simple du PWR. CEA - Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. 2024. hal-04816281

HAL Id: hal-04816281

<https://hal.science/hal-04816281v1>

Submitted on 3 Dec 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Un modèle simple du PWR 2/12/2024

Bertrand Mercier, Bruno Tarride, CEA/INSTN

Introduction

Nous montrons, à l'aide d'un modèle à 5 équations, qu'un REP se comporte différemment selon qu'il fonctionne en secondaire suiveur ou bien en secondaire prioritaire.

Notations

PN	puissance nominale
ρ	réactivité du cœur (pcm)
x	nombre de neutrons normalisé ou puissance cœur normalisée (égal à 1 à PN)
y	position normalisée de l'ouverture de la vanne vapeur ou puissance secondaire normalisée évacuée (égale à 1 à PN)
c	population (normalisée) des précurseurs
α_D	coefficient Doppler (négatif) (pcm/°)
α_m	coefficient modérateur (négatif)(pcm/°)
$m.c$	l'inertie thermique du combustible (MJ/°)
a	Puissance nominale (PN) du réacteur (MW)
$h.s$	le coefficient de transfert thermique combustible → modérateur (MW/°)
T_c	la température moyenne du combustible (°C)
T_m	la température moyenne du modérateur (°C)
$M.C_p$	l'inertie thermique du primaire (modérateur + structure) (MJ/°)
$H.S$	le coefficient de transfert thermique primaire → secondaire (MW/°)
T_v	la température de la vapeur (saturante) côté secondaire (°C)
l	le temps de vie des neutrons
λ	constante de temps des précurseurs émettant les neutrons retardés
β	fraction des neutrons retardés

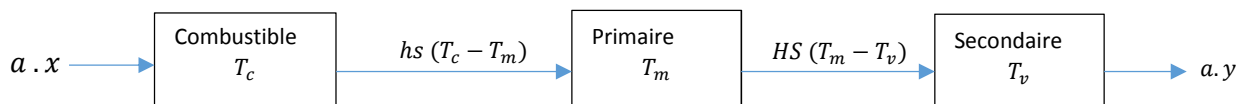
§1 Equations du modèle

Dans un PWR, la puissance d'origine neutronique $a . x$ est dégagée au sein du combustible et évacuée vers le modérateur (= caloporteur = eau).

Si h est le coefficient de transfert thermique et s la surface d'échange, cette puissance échangée entre combustible et modérateur s'exprime par $h.s (T_c - T_m)$.

De même, la puissance transférée du primaire vers le secondaire s'exprime par $H.S (T_m - T_v)$.

Notre modèle ultra-simplifié de PWR peut alors être décrit par le schéma suivant (cf [1]) :



Les bilans d'énergie s'écrivent sous la forme classique : accumulation = entrée – sortie.

On en déduit :

$$\text{Combustible : } m.c \frac{d}{dt} T_c = a . x - h.s (T_c - T_m)$$

$$\text{Primaire : } M.C_p \frac{d}{dt} T_m = h.s (T_c - T_m) - H.S (T_m - T_v)$$

Pour savoir comment évolue la puissance du cœur $a . x$, il faut évaluer la réactivité ρ .

Celle-ci peut varier en jouant sur les absorbants de contrôle (grappes solides ou bore soluble) ou par effet des contre-réactions couplant neutronique et thermo-hydraulique :

- L'effet Doppler $\alpha_D = \frac{d\rho}{dT_c}$
- L'effet modérateur $\alpha_m = \frac{d\rho}{dT_m}$

En l'absence de sollicitation des absorbants de contrôle, on a donc, en écrivant le bilan de réactivité :

$$\frac{d\rho}{dt} = \alpha_D \frac{d}{dt} T_c + \alpha_m \frac{d}{dt} T_m.$$

Pour relier réactivité du cœur et nombre de neutrons, proportionnel à la puissance cœur, on utilise les équations bilans de la cinétique à 1 groupe de précurseurs à l'origine des neutrons retardés :

neutrons : $\frac{d}{dt} x = \frac{\rho - \beta}{l} x + \lambda c$

précurseurs : $\frac{d}{dt} c = \frac{\beta}{l} x - \lambda c$

On aboutit ainsi au système différentiel suivant :

(1) $\frac{d\rho}{dt} = \frac{\alpha_D}{m.c} (a . x - h_s (T_c - T_m)) + \frac{\alpha_m}{MC_p} (h_s (T_c - T_m) - HS (T_m - T_v))$

(2) $\frac{d}{dt} x = \frac{\rho - \beta}{l} x + \lambda c$

(3) $\frac{d}{dt} c = \frac{\beta}{l} x - \lambda c$

(4) $m.c \frac{d}{dt} T_c = a . x - h_s (T_c - T_m)$

(5) $MC_p \frac{d}{dt} T_m = h_s (T_c - T_m) - HS (T_m - T_v)$

A ce stade, on notera deux modes de fonctionnement du réacteur :

- a) Sous 5%PN, la turbine n'est pas encore couplée ; la vapeur est évacuée au système de contournement turbine, sur lequel la vanne vapeur régule la pression secondaire sur une consigne.

Le secondaire étant à saturation, cela nous donne l'équation complémentaire suivante :

(6a) : $T_v = \text{constante}$

On dira que le secondaire est suiveur car la vanne, pour fixer la pression vapeur, verra sa position y adaptée de façon à évacuer la puissance produite au primaire.

- b) Au-delà de 5%PN, la vapeur est évacuée à la turbine, via une vanne dont la position est directement lié à la puissance imposée par l'exploitant au groupe turbo-alternateur.

En 1ere approximation, on pourra considérer que la puissance secondaire est, à tout instant :

(6b) $H.S (T_m - T_v) = a . y$, y étant une condition aux limites.

Le secondaire est dit prioritaire car y est imposé fixe, dès l'instant initial.

On verra, par la suite, les implications de cette situation.

§2 Etat stationnaire

En régime stationnaire, on aura :

$$a . x = h_s (T_c - T_m) = HS (T_m - T_v) = a . y , \text{ avec donc } x = y$$

$$\rho = 0 \text{ et } \frac{\beta}{l} x = \lambda c$$

§3 Données numériques : soit un PWR 1300MWe de puissance thermique 3800 MW (4 boucles)

D'après la référence [2], les données de cinétique neutronique sont :

. $l = 25 \mu s$,

. β fraction des neutrons retardés ($\beta \approx 0,6\%$) ; $\lambda = 0,08 s^{-1}$

D'après la référence [1] :

- . Contre-réactions : Doppler $\alpha_D = -3 \text{ pcm}/^\circ$
Modérateur $\alpha_m = -10 \text{ pcm}/^\circ$ (début de cycle) à $-60 \text{ pcm}/^\circ$ (fin de cycle).

Données thermohydrauliques :

- . Inertie thermique du combustible : $m.c = 40 \text{ MJ}/^\circ$.
- . Coefficient d'échange thermique combustible – eau primaire : $h.s = 7 \text{ MW}/^\circ$.
- . Inertie thermique du primaire (eau + structures) : $M.C_p = 3000 \text{ MJ}/^\circ$
- . Coefficient d'échange 4 GV's (primaire-secondaire) : $H.S = 160 \text{ MW}/^\circ$.

§4 Discrétisation

Pour tenir compte de la très courte durée de vie des neutrons prompts, nous allons introduire un schéma implicite couplant les équations différentielles (2) et (3). On introduit un pas en temps τ ; on désigne les nouvelles valeurs par ρ^* , x^* , T_c^* , etc.

La réactivité ρ du cœur étant connue, on demande que

$$\frac{x^* - x}{\tau} = \frac{\rho - \beta}{l} x^* + \lambda c^*$$

$$\frac{c^* - c}{\tau} = \frac{\beta}{l} x^* - \lambda c^*$$

$$\text{Soit } x^* \left(1 - \frac{\rho - \beta}{l} \tau\right) = \lambda c^* \tau + x$$

$$c^* (1 + \lambda \tau) = c + \frac{\beta}{l} \tau x^*$$

Qu'on peut écrire sous la forme

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^* \\ c^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ c \end{pmatrix}$$

En posant

$$A = 1 - \frac{\rho - \beta}{l} \tau \quad B = -\lambda \tau$$

$$C = -\frac{\beta}{l} \tau \quad D = 1 + \lambda \tau$$

Soit $\Delta = AD - BC$ on a

$$(7) \quad \begin{pmatrix} x^* \\ c^* \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} D & -B \\ -C & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ c \end{pmatrix}$$

Par ailleurs, on demande que

$$(8) \quad m.c. \frac{T_c^* - T_c}{\tau} = a. x^* - h_s (T_c - T_m) \quad \text{pour (4)}$$

$$(9) \quad M C_p \frac{T_m^* - T_m}{\tau} = h_s (T_c - T_m) - H S (T_m - T_v) \quad \text{pour (5)}$$

$$(10) \quad \rho^* - \rho = \alpha_D (T_c^* - T_c) + \alpha_m (T_m^* - T_m) \quad \text{pour (1)}$$

§5 Simulations effectuées

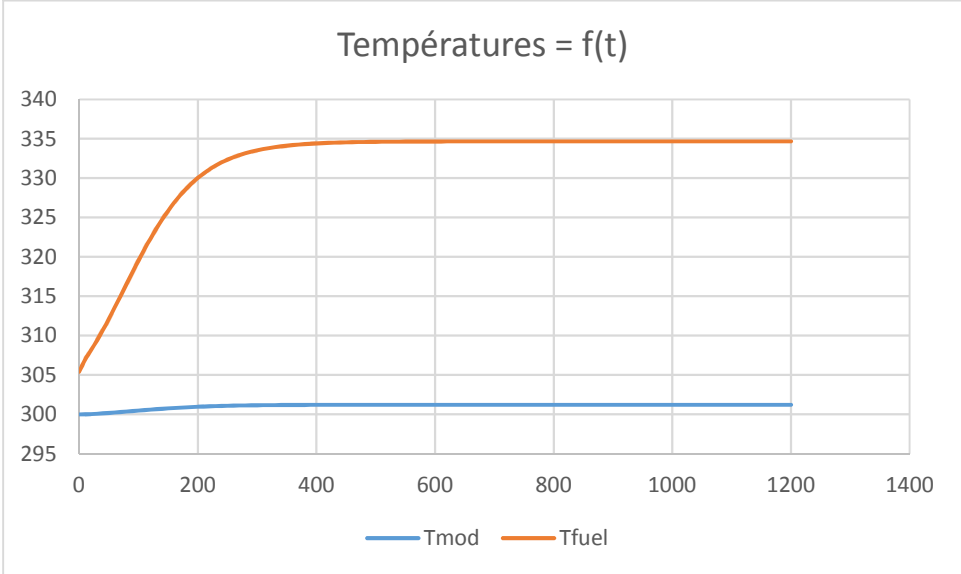
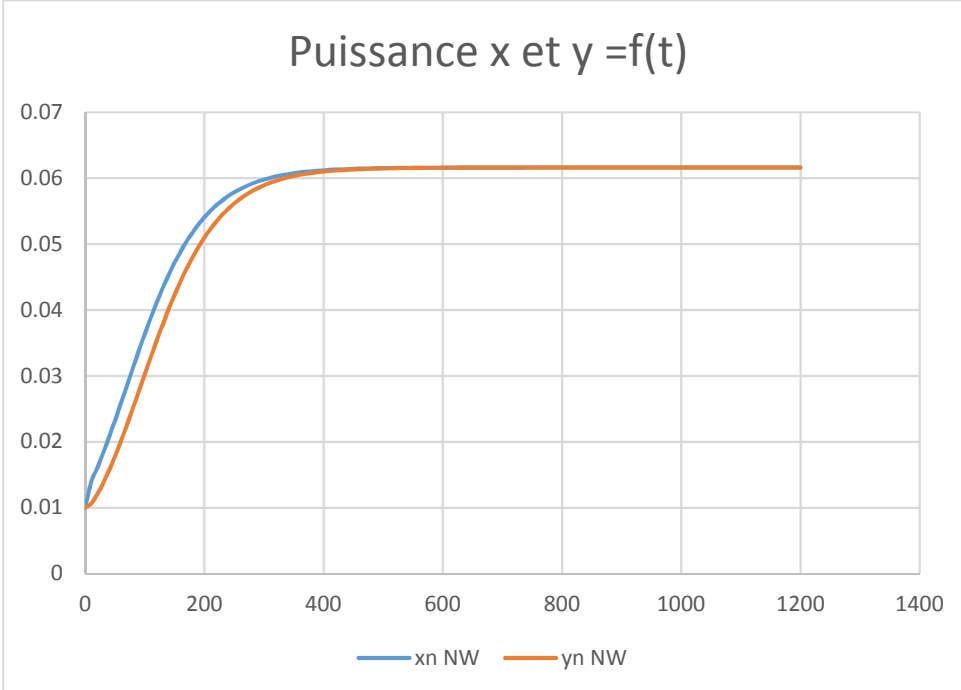
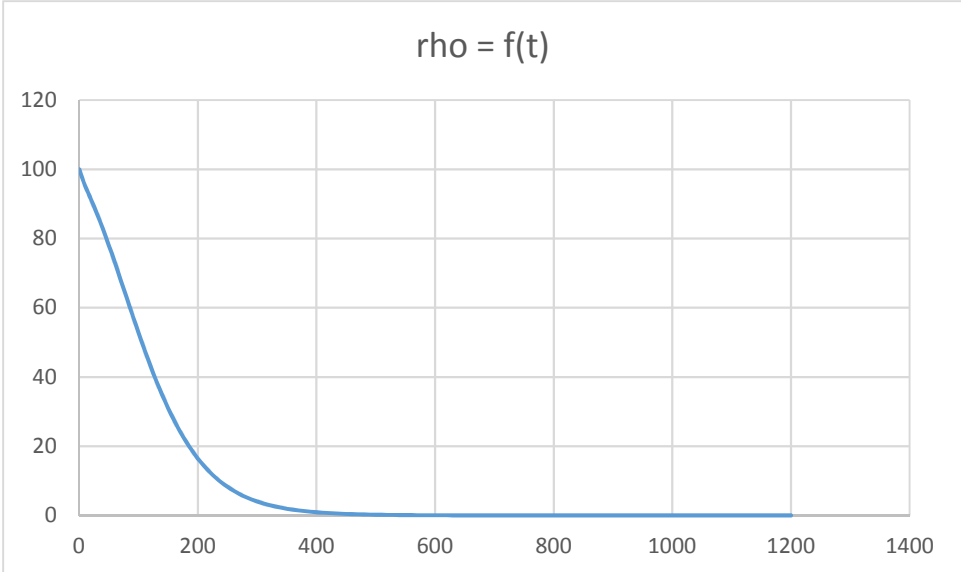
Tous les transitoires simulés le seront à partir d'un état stationnaire noté 0.

5.1 Secondaire suiveur (y variable) :

Cas 1 : Etat initial 1% PN – injection de 100 pcm par retrait d'absorbant

Le cœur est en début de cycle, on introduit un échelon de réactivité $\Delta\rho = +100 \text{ pcm}$.

Voici les résultats obtenus avec $\tau = 1s$.



On observe une stabilisation sur un état final stationnaire (juste critique) noté 1.

En notant entre l'état final et l'état initial :

$$\Delta W = a \cdot x^1 - a \cdot x^0 = a \cdot y^1 - a \cdot y$$

$$\Delta T_c = T_c^1 - T_c^0$$

$$\Delta T_m = T_m^1 - T_m^0$$

$$\Delta T_v = T_v^1 - T_v^0$$

avec dans ce cas $\Delta T_v = 0$

Les lois d'échanges donnent alors : $\Delta T_m = \Delta W / HS$ et $\Delta T_c = \Delta T_m + \Delta W / hs$

En écrivant le bilan de réactivité, qui reflète que la réactivité introduite est composée par les effets Doppler et modérateur, on a : $0 = \Delta\rho + \alpha_D \Delta T_c + \alpha_m \Delta T_m$

Et finalement :

$$\alpha_D \left(\frac{\Delta W}{HS} + \frac{\Delta W}{hs} \right) + \alpha_m \frac{\Delta W}{HS} = -\Delta\rho$$

D'où, en posant $\theta = \frac{H.S}{h.s}$:

$$\Delta W = -\frac{H.S \cdot \Delta\rho}{\alpha_D(1+\theta) + \alpha_m}$$

Avec les données considérées, l'application numérique donne 196 MW, soit 5.1%PN.

On vérifie bien sur les courbes que l'insertion de 100 pcm permet bien de passer la puissance du cœur de 1 à 6.1%PN.

On a aussi

$$\alpha_D \Delta T_c = \frac{(1+\theta)\alpha_D}{\alpha_D(1+\theta) + \alpha_m} \Delta\rho \quad \text{et} \quad \alpha_m \Delta T_m = \frac{\alpha_m}{\alpha_D(1+\theta) + \alpha_m} \Delta\rho$$

de sorte que les contre-réactions sont réparties entre 88% pour l'effet Doppler et 12% pour l'effet modérateur. (En FDC, ce serait plutôt 54% pour le Doppler et 46% pour l'effet modérateur).

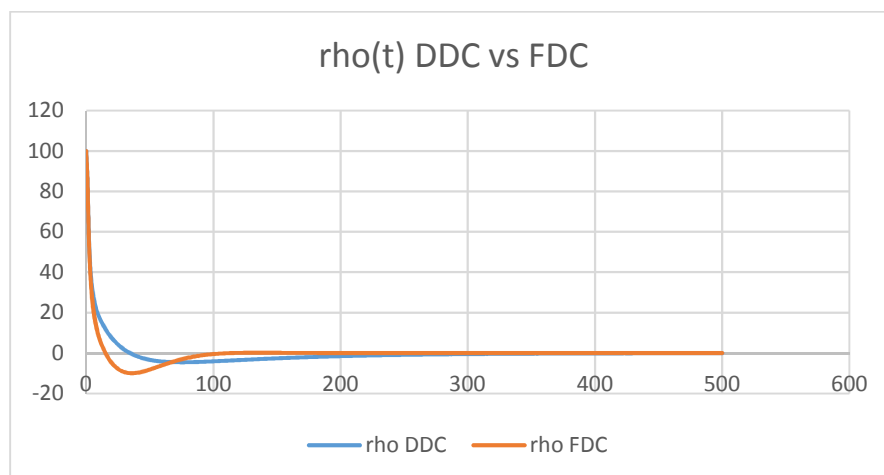
Enseignement : Ce comportement était attendu ; on constate que l'on n'a pas besoin de jouer sur les absorbants pour stabiliser le cœur; le cœur redevient naturellement juste critique par l'effet des rétroactions modérateur et surtout Doppler.

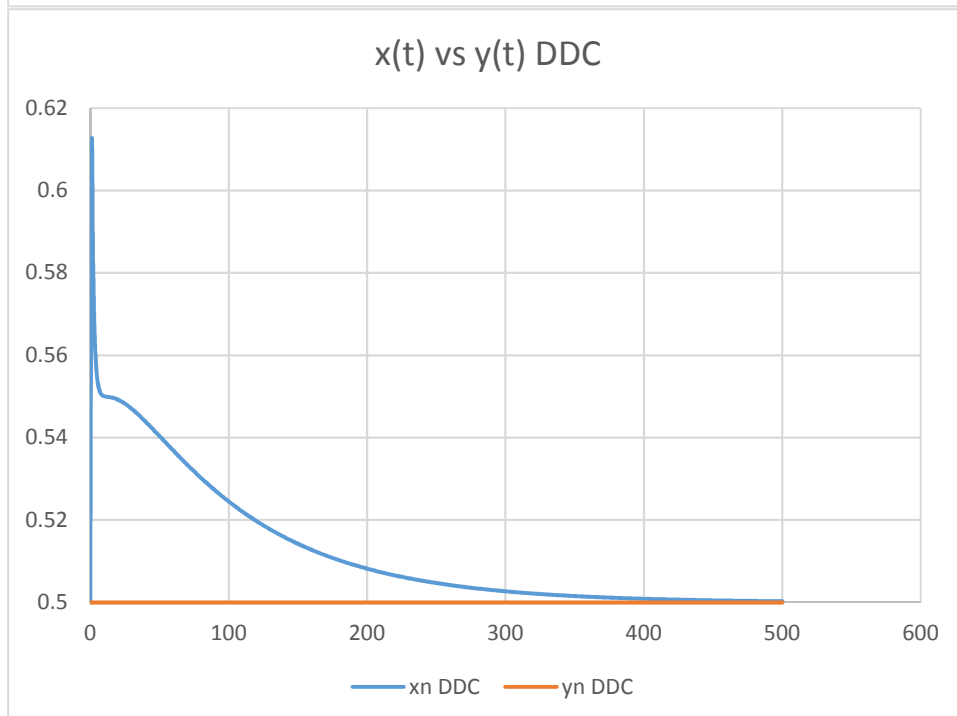
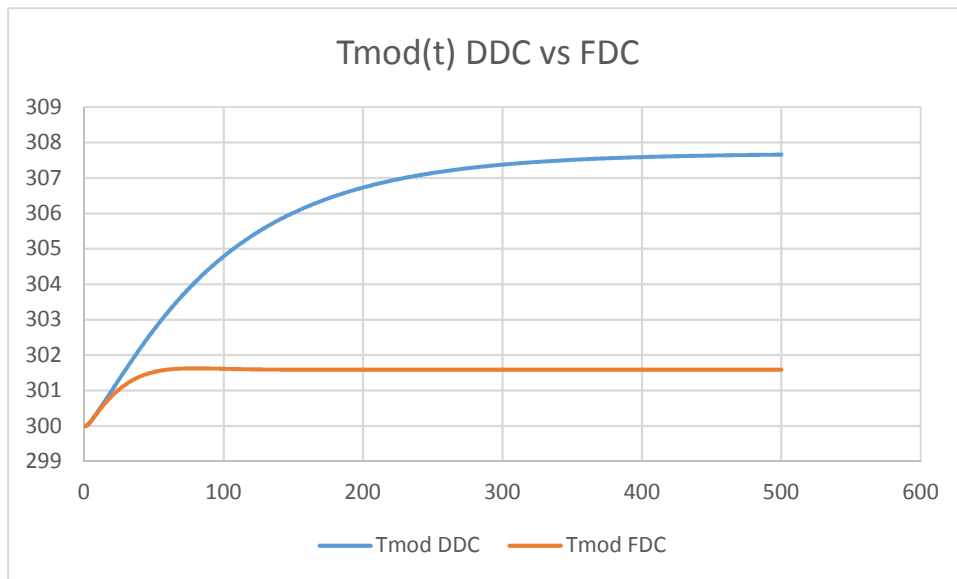
Le modèle met bien en évidence que les PWR sont intrinsèquement stables neutroniquement.

5.2 Secondaire prioritaire (y fixe)

Cas 2 : Etat initial 50% PN – injection de 100 pcm par retrait d'absorbant

La simulation qui suit est faite avec $\alpha_m = -10 \text{ pcm}/^\circ$ (DDC) puis avec $\alpha_m = -60 \text{ pcm}/^\circ$ (FDC)





Enseignement : ce cas de figure est finalement assez contre-intuitif : l'insertion de la même réactivité que dans le cas précédent ne permet pas d'augmenter la puissance de façon pérenne; en fait, la puissance cœur est ramenée, par les rétroactions Doppler/modérateur, sur la puissance appelée au secondaire, qui est restée inchangée au cours du transitoire. In fine, l'insertion de réactivité a pour effet de chauffer l'eau primaire : **on en déduit qu'une fonction possible des absorbants de contrôle est, turbine prioritaire, d'ajuster T_m !.**

Avec les mêmes annotations que précédemment, entre l'état initial et final :

On a ici : $\Delta W = 0$, d'où $\Delta T_v = \Delta T_m = \Delta T_c$

Le bilan de réactivité s'écrit alors : $\Delta \rho + \alpha_D \Delta T_c + \alpha_m \Delta T_m = 0$

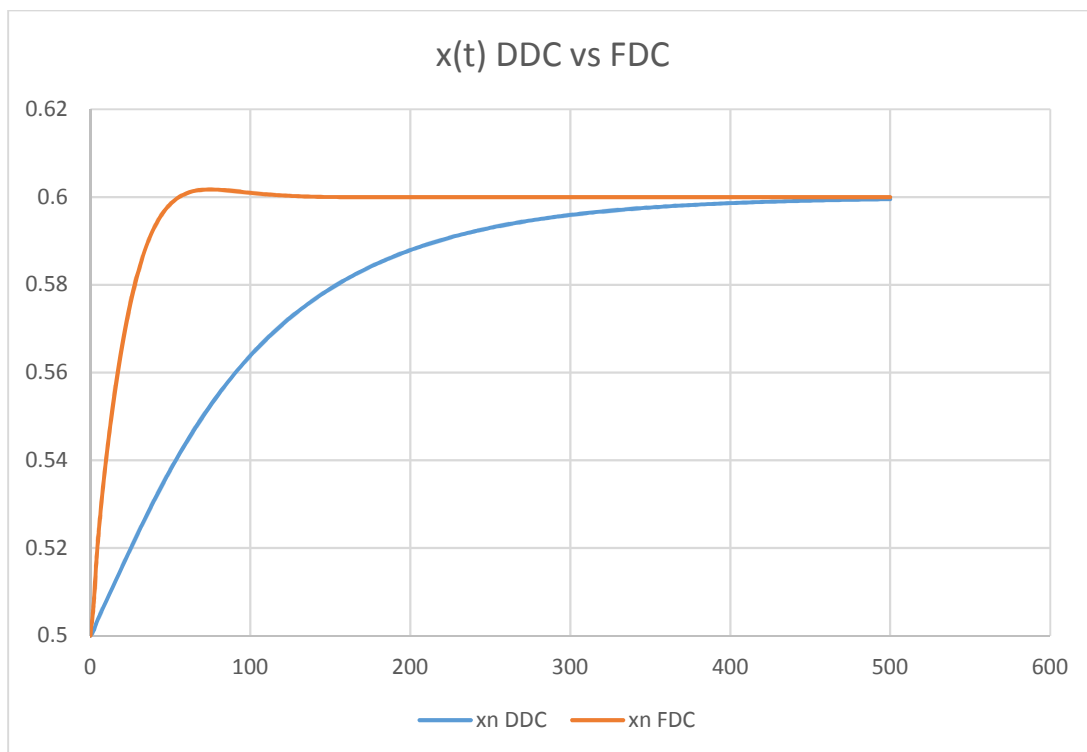
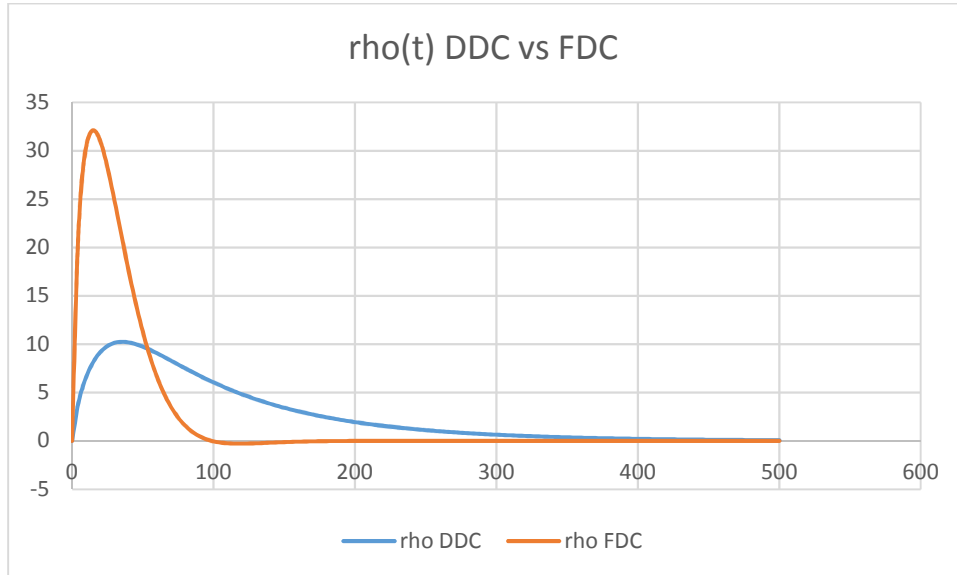
D'où $\Delta T_m = -\frac{\Delta \rho}{\alpha_D + \alpha_m}$

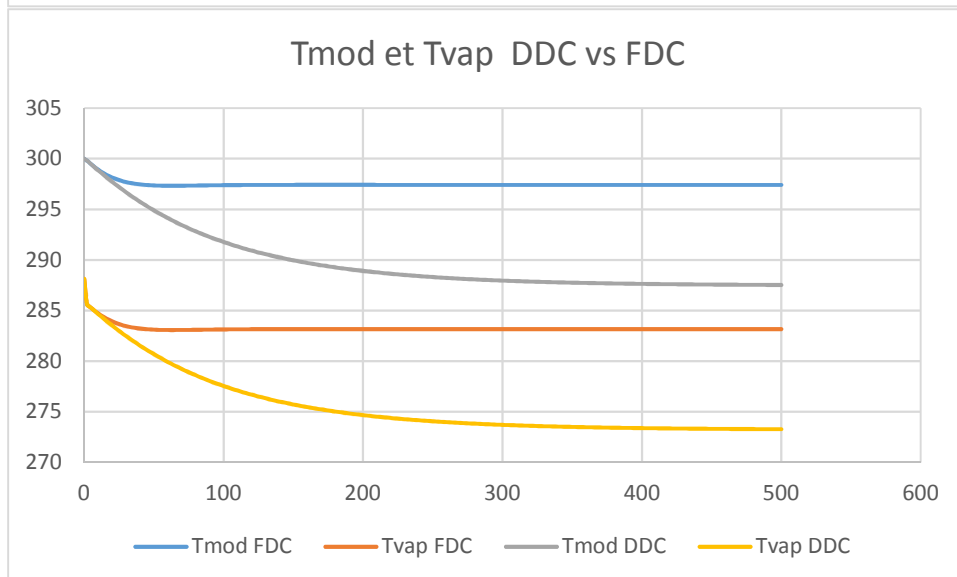
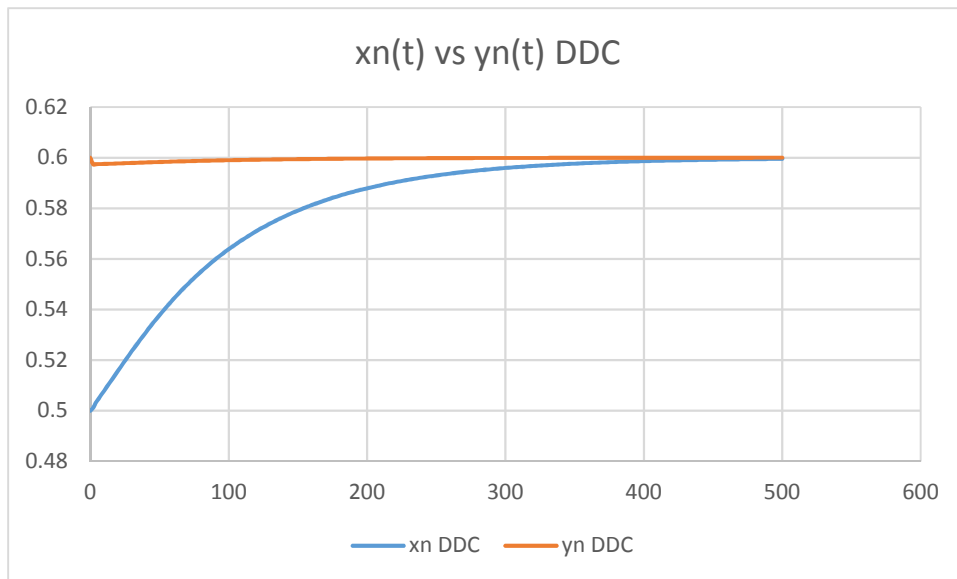
L'application numérique, avec les données considérées, donne $+7.7^\circ\text{C}$ en DDC et $+1.6^\circ\text{C}$ en FDC, ce qui est bien conforme à la troisième courbe donnée.

Cas 3 : Etat initial 50% PN – augmentation de la puissance secondaire, secondaire prioritaire

Ce cas sera étudié en début et fin de cycle.

Fort de l'enseignement précédent, on se propose, à partir du même état $x^0 = 0,5$ d'ouvrir la vanne d'admission turbine de 0,5 à 0,6.





On constate que le cœur suit bien l'évolution de la demande secondaire ; c'est extrêmement pratique pour l'exploitant qui impose ses conditions au groupe turbo-alternateur, de façon à répondre aux exigences du réseau... et le cœur suit par l'effet des rétroactions Doppler/modérateur, sans besoin de solliciter les absorbants de contrôle.

La contrepartie d'un tel fonctionnement est l'effet de refroidissement primaire/secondaire que l'on peut évaluer.

Avec les mêmes annotations que précédemment, entre l'état initial et final, on a ici :

$$\Delta W = hs (\Delta T_c - \Delta T_m) \text{ d'où } \Delta T_c = \Delta T_m + \frac{\Delta W}{hs}$$

$$\alpha_D \Delta T_c + \alpha_m \Delta T_m = 0 \text{ d'où } \alpha_D \left(\Delta T_m + \frac{\Delta W}{hs} \right) + \alpha_m \Delta T_m = 0$$

$$\Delta T_m = - \frac{\alpha_D}{\alpha_D + \alpha_m} \frac{\Delta W}{hs}$$

L'application numérique donne -12.5° en début de cycle et -2.6° en fin de cycle.

Finalement, si le combustible s'échauffe, primaire et secondaire se refroidissent.

Cette relation de décroissance de $T_m - T_v$ en fonction de la puissance est appelée programme naturel de température (lié aux seuls effets de rétroactions).

Enseignement 1 :

Une telle dégradation de la qualité vapeur (T_v , P_v) lors de la montée en puissance s'accompagnera d'une baisse de rendement de l'installation (la vapeur est la « source chaude » au sens de Carnot) : on convertit moins bien la chaleur en électricité, ce qui est pénalisant.

Cette perte de rendement n'est pas acceptable pour un électricien qui préférera s'imposer un programme de température « artificiel ». Pour ce faire, il impose un programme de consigne $T_m=f(y)$ et l'utilisation d'un groupe d'absorbants de contrôle pour ajuster T_m sur sa valeur de consigne (voir enseignements du cas 2).

Enseignement 2 :

Le transitoire 3 permet de mettre en évidence le caractère « complexe » d'un PWR, ainsi qu'une famille particulière d'accident de réactivité, par appel de puissance secondaire.

Par exemple, une rupture de tuyauterie vapeur dans la salle des machines, proche du groupe turbo-alternateur, entraînera un appel de puissance secondaire qui se transmettra au primaire ; le refroidissement primaire induit insère de la réactivité dans le cœur par la rétroaction modératrice.

Le modèle permet donc de sensibiliser à cet accident, en particulier aux conditions de son étude de sûreté ; il permet, en effet, d'identifier les conditions pénalisantes, maximisant $\frac{d\rho}{dt}$:

- Fin de cycle : α_m étant plus fortement négatif,
- GVs neufs (tubes ni bouchés, ni encrassés, maximisant HS) et inertie thermique $M.C_p$ minorée.

Conclusion générale

Ce modèle extrêmement simple d'un PWR donne des résultats proches de ceux obtenus sur simulateur de fonctionnement.

Exploité avec seulement trois transitoires, il est extrêmement riche en enseignements :

- 1) Les rétroactions Doppler et modérateur ramènent toujours la réactivité sur 0 ; en conséquence les PWR sont stables neutroniquement, facteur très favorable au respect de la première fonction de sûreté, le contrôle de la réaction en chaîne.
- 2) Il existe deux modes de fonctionnement d'un PWR : secondaire suiveur ou prioritaire ; pour un même évènement initiateur, le comportement général ne sera pas le même ; certains comportements sont mêmes contre-intuitifs, ce qui est une propriété des systèmes complexes, caractérisés par des interactions entre sous-parties (ici secondaire/primaire/cœur) et des rétroactions (ici Doppler/modérateur).
- 3) Turbine prioritaire, une montée en puissance doit se faire par appel de puissance secondaire ; le cœur est alors suiveur par l'effet des rétroactions ; la conséquence est la baisse naturelle de T_m et T_v ; pour éviter une dégradation du rendement de l'installation, on préférera réguler T_m par un groupe d'absorbants de contrôle dédié, apportant la réactivité nécessaire.
- 4) Cette physique implique qu'une rupture de tuyauterie vapeur peut être la cause d'un accident de réactivité ; le modèle permet de comprendre le transitoire, ainsi que les principales hypothèses pénalisantes pour son étude.

Commentaire :

Nos équations (4) et (5) figurent en page 62 de la référence [3]. On les retrouve probablement dans la plupart des simulateurs de fonctionnement des REP, lesquels ont des fonctionnalités beaucoup plus développées que notre petit modèle.

Références :

[1] : Physique, fonctionnement et sûreté des REP – Maitrise des situations accidentelles du système réacteur, Bruno Tarride, 2013, EDP-Sciences

[2] Précis de Neutronique, Paul Reuss, 2003, EDP Sciences.

[3] https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-22_2nd_web.pdf