

# THESE

présentée à

l'Université des Sciences et Technologies de Lille

pour obtenir le grade de

Docteur en Productique : Automatique et Informatique Industrielle

par

**Laurent Bodini**

Ingénieur EC-Lille

## **Préconditionnement des valeurs de référence des Réacteurs à Eau Pressurisée 900 MW**

Soutenue le 9 juillet 1998 à l'Ecole Centrale de Lille

Président : RICHARD J.P. (Professeur, LAIL-EC Lille)

Rapporteurs : HAMAM Y. (Professeur, ESIEE)  
KSOURI M. (Professeur, ENI Tunis)  
MEIZEL D. (Professeur, HEUDIASYC-UTC)

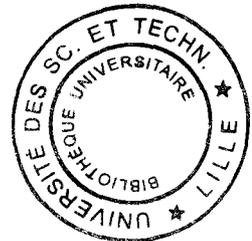
Examineurs : BORNE P. (Professeur, EC-LILLE)  
EL KAMEL A. (Maître de Conférences, EC-LILLE)  
FALINOWER C.-M. (EDF)  
MILLERAT P. (EDF)  
VASSEUR C. (Professeur, USTL)

Travail préparé conjointement avec

- Le Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (LAIL URA-CNRS D1440), Ecole Centrale de Lille, Villeneuve d'Ascq, France
- La Direction des Etudes et Recherches d'EDF, Service Ensemble de Production, Département Contrôle Commande des Centrales, Groupe Amélioration des Performances, Chatou, France.

Directeur de thèse : Borne P.

Responsable EDF : Millerat P.



## AVANT - PROPOS

Ce travail a été réalisé à la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France dans le groupe Amélioration des Performances du Département Contrôle Commande des Centrales.

Je voudrais exprimer ma gratitude à Monsieur le Professeur Pierre Borne pour m'avoir accepté dans son équipe de chercheurs et pour avoir dirigé ma thèse, ce que j'ai toujours considéré comme un grand honneur. Ses encouragements amicaux, la confiance qu'il m'a portée et ses conseils m'ont été extrêmement précieux. Je tiens à remercier chaleureusement Monsieur Pierre Millerat, Ingénieur de recherche, d'avoir mis sa confiance en moi et d'avoir pris une part si active à mes recherches et pour m'avoir prodigué ses conseils très profitables.

Je voudrais remercier Monsieur le Professeur Jean-Pierre Richard de l'honneur qu'il me fait d'avoir accepté d'être le président du jury. Je tiens à remercier Messieurs les Professeurs Yskandar Hamam, Mekki Ksouri et Dominique Meizel de m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de ce mémoire et pour y avoir consacré du temps dans un délai relativement court. Je remercie Monsieur Clément-Marc Falinower, Chef de groupe, pour le soutien qu'il a apporté à ce travail et pour avoir accepté de faire partie du jury. Je remercie Monsieur Abdelkader El Kamel, Maître de Conférences, d'avoir accepté d'être membre du Jury. Je remercie également Monsieur le Professeur Christian Vasseur pour avoir accepté de représenter l'Université des Sciences et Technologies de Lille.

Qu'il me soit permis de remercier également les membres du groupe P33 du département CCC pour leur accueil parmi eux et pour leur bonne humeur générale.

Je remercie particulièrement Monsieur Erwan Le Grand pour l'aide qu'il m'a apporté durant son stage de fin d'étude.

Je remercie également Cécile Boitreau, Richard Bodini, Chantal Chenu, Lambert Pierrat, Frédéric Sorhaïtz et mon épouse qui ont accepté de relire ce mémoire, leurs remarques m'ont permis d'en améliorer sensiblement la lisibilité.

*A mon épouse, qui par son soutien et son  
amour est la plus grande joie de ma vie*

*A mes parents, pour leur amour constant  
au long des années*

# TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DE LA CENTRALE .....	3
1. PRÉSENTATION SOMMAIRE DES CENTRALES DE TYPE REP 900 MW .....	3
2. NOTIONS DE NEUTRONIQUE .....	4
3. MOYENS DE COMMANDE D'UN REP .....	6
CHAPITRE 2 : MODÉLISATION DE LA CENTRALE .....	7
INTRODUCTION .....	7
1. MODÈLE QUALITATIF .....	7
1.1. Méthode SCFC .....	8
1.1.1. Introduction .....	8
1.1.2. Eléments constituant le diagramme SCFC .....	9
1.1.3. Remarques .....	11
1.2. Modèle global .....	12
1.2.1. Mode de lecture du schéma global .....	12
1.3. Schéma global .....	14
1.4. Processus décrits selon la méthode SCFC .....	15
1.4.1. Production de puissance nucléaire .....	15
1.4.2. Modération des neutrons .....	16
1.4.3. Apparition de xénon .....	17
1.4.4. Effet xénon .....	18
1.4.5. Décroissance radioactive du xénon .....	18
1.4.6. Chauffage du fluide primaire .....	19
1.4.7. Effet bore .....	20
1.4.8. Dilution .....	20
1.4.9. Borication .....	21

## Table des matières

1.4.10. Effet Doppler .....	22
1.4.11. Effet des grappes.....	22
1.4.12. Maintien du primaire sous pression .....	23
1.4.13. Circulation du fluide primaire.....	24
1.4.14. Vaporisation du fluide secondaire.....	25
1.4.15. Déplacement de la vapeur .....	25
1.4.16. Détente turbine HP.....	26
1.4.17. Séchage-surchauffage .....	26
1.4.18. Détente turbine BP .....	27
1.4.19. Production-Consommation d'électricité.....	27
1.4.20. Condensation.....	28
1.4.21. Extraction.....	29
1.4.22. Réchauffages 1,2,3.....	29
1.4.23. Stockage-Réchauffage 4 .....	30
1.4.24. Mise sous pression .....	30
1.4.25. Réchauffage 5 .....	31
1.5. Simplification du modèle qualitatif.....	31
1.6. Conclusions sur l'utilisation de la méthode.....	33
1.6.1. Conclusions sur la méthode elle-même .....	33
1.6.2. Résultat .....	34
2. MODÈLE NUMÉRIQUE.....	35
2.1. Spécifications .....	35
2.2. Equations.....	36
2.3. Validation qualitative .....	40
2.4. Présentation de l'ancien et du nouveau régulateur .....	42
2.5. Validation numérique.....	43
2.5.1. Présentation de Laura.....	43
2.5.2. Validation numérique.....	44
2.6. Conclusion.....	49
CONCLUSION .....	49

## CHAPITRE 3 : AMÉLIORATION DES PERFORMANCES .51

INTRODUCTION.....	51
-------------------	----

1. VARIABLES COMMANDÉES DE LA CENTRALE.....	51
1.1. Variables commandées du circuit primaire .....	52
1.1.1. Température moyenne du circuit primaire .....	52
1.1.2. Déséquilibre axial .....	53
1.1.3. Efficacité des grappes.....	54
1.1.4. Concentration en bore.....	55
1.2. Variables commandées du circuit secondaire.....	55
2. RÉGULATION DE LA CONCENTRATION EN BORE .....	56
2.1. Introduction.....	56
2.2. Elaboration de la concentration en bore de référence.....	56
2.3. Différents modèles de bore existants .....	57
2.3.1. Equation de base .....	57
2.3.2. Modèle de bore dans Laura .....	57
2.3.3. Volume mort.....	59
2.4. Choix d'une régulation .....	60
2.4.1. Cahier des charges .....	60
2.4.2. Détermination de la régulation .....	60
2.5. Mise en œuvre et résultats .....	67
2.5.1. Mise en œuvre .....	67
2.5.2. Résultats .....	67
3. ELABORATION DES NOUVELLES RÉFÉRENCES ( $T_{REF}$ , $\Delta I_{REF}$ , $\eta_{REF}$ ) .....	69
3.1. Objectif .....	69
3.2. Construction de la fonction F.....	71
3.2.1. Forme de la fonction F .....	71
3.2.2. Détermination des coefficients $\alpha(P)$ , $\beta(P)$ , $\gamma(P)$ , $\xi(P)$ .....	75
3.2.3. Prise en compte de la courbe de calibrage des groupes gris.....	75
3.2.4. Synthèse des relations.....	76
3.3. Forme analytique des paramètres de la fonction F .....	78
3.3.1. Forme à donner aux coefficients $a_i$ .....	78
3.3.2. Nombre de paramètres.....	80
3.3.3. Bornes sur les paramètres .....	83
3.3.4. Conclusion.....	83
4. PRÉSENTATION DU CRITÈRE .....	84

## Table des matières

4.1. Travail préliminaire à l'optimisation .....	84
4.1.1. Choix du scénario de puissance à suivre.....	84
4.1.2. Choix de la fonction à optimiser.....	84
4.1.3. Choix de la méthode d'optimisation.....	90
4.2. Optimisation par algorithme génétique .....	90
4.2.1. Algorithme génétique : description, mise en œuvre .....	90
4.2.2. Différents choix effectués .....	91
4.2.3. Influence des paramètres.....	93
5. RÉSULTATS DE L'OPTIMISATION .....	94
5.1. Scénario 1 .....	95
5.2. Scénario 2.....	96
5.3. Amélioration de l'optimisation.....	98
CONCLUSION .....	98
<b>CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION .....</b>	<b>101</b>
INTRODUCTION.....	101
1. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION SUR LES SCÉNARIOS TESTS.....	101
1.1. Notations, Rappels et Résultats.....	101
1.1.1. Différentes borications-dilutions et différents régulateurs.....	101
1.1.2. Scénarios de test.....	102
1.1.3. Rappel des termes constituant le critère d'optimisation .....	102
1.1.4. Tableaux de résultats des scénarios tests .....	103
1.2. Comparaison avec le modèle numérique .....	103
1.3. Centrage $\psi$ .....	104
1.4. Rôle de $\phi$ .....	104
1.5. Gains sur les actionneurs.....	106
1.6. Explication des performances réduites du régulateur multivariable par rapport au régulateur Framatome à références identiques.....	107
1.7. Comparaison des variables commandées du cœur.....	107
1.7.1. Scénario 1.....	108
1.7.2. Scénario 2.....	113
2. ROBUSTESSE DES NOUVELLES RÉFÉRENCES.....	117

2.1. Robustesse aux perturbations $k\Delta F$ et $NPr$ .....	117
2.1.1. Scénario 1 .....	118
2.1.2. Scénario 2 .....	120
2.2. Robustesse aux changements de scénarios .....	122
2.2.1. Palier à 50 % avec les résultats du scénario 2 .....	122
2.2.2. Palier à 72.5 % avec des pentes de 1.5%/min .....	124
CONCLUSION.....	126
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	127
BIBLIOGRAPHIE .....	129

# INTRODUCTION GENERALE

Afin d'améliorer le pilotage des centrales nucléaires qui fournissent aujourd'hui plus des trois quarts de l'électricité produite en France, Electricité de France (EDF) a lancé le projet Minotaure. Dans le cadre de ce projet, EDF a choisi de collaborer avec le Laboratoire d'Informatique et d'Automatique de Lille (LAIL) pour une étude sur l'amélioration du pilotage des centrales nucléaires à Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) 900 MW. La seule consigne des centrales est la consigne de puissance électrique, cependant de nombreuses variables caractérisent l'état de la centrale. Parmi ces variables, certaines sont commandées et ont une valeur de référence que les régulations essaient d'atteindre. Ces valeurs de référence sont actuellement des fonctions simples de la puissance (affines, affines par morceaux). L'étude entreprise porte sur l'amélioration des valeurs de références afin de réduire la sollicitation des actionneurs de la centrale.

L'étude doit être faite avec le régulateur multivariable robuste qui a été conçu au département Contrôle Commande des Centrales (CCC) de la Direction des Etudes et Recherches (DER) d'EDF ; ce régulateur a la particularité de prendre en compte la plupart des variables commandées. On dispose pour cette étude d'un modèle simplifié de la centrale conçu à CCC, et d'un modèle de connaissance qui permet l'adjonction de chaînes de régulation codées en MATLAB/SIMULINK. Comme aucun accès aux centrales nucléaires n'est permis pendant l'étude, c'est l'amélioration du pilotage de ce modèle de connaissance qui sera prise en compte.

Au cours de l'étude, nous nous proposons de déterminer des références qui réduisent la sollicitation des actionneurs. Ces références doivent maintenir les variables commandées dans leur domaine d'évolution admissible. Les deux écueils que nous nous efforcerons d'éviter sont :

- la détermination de références spécifiques au nouveau régulateur de la DER. En cas de changement de régulateur, la méthode développée au cours du mémoire doit pouvoir être reprise ;
- la détermination de références visant à piloter le régulateur. Il faut que les références soient des entrées au sens de consignes et non d'actionneurs pour le régulateur. C'est à dire qu'on s'interdit de compenser le régulateur de la centrale. Ce serait une approche peu

opportune compte tenu qu'une des contraintes de cette étude est d'utiliser un régulateur donné et donc de ne pas le compenser. Cela correspondrait sinon à changer de régulateur.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres.

Une présentation générale et minimale d'une centrale nucléaire de type REP est faite au premier chapitre.

Le second chapitre consiste en l'élaboration d'un modèle qualitatif et d'un modèle numérique de la centrale. Le modèle qualitatif permet de définir les phénomènes importants pour le pilotage. Ces phénomènes doivent apparaître dans le modèle numérique qui doit simuler la centrale avec vitesse et précision en vue d'une optimisation des références

Le troisième chapitre traite de l'élaboration proprement dite des références. Il est composé de deux parties principales : la première traite de la concentration en bore (la seule variable commandée non prise en compte par le régulateur), la seconde des variables commandées prises en compte par le régulateur.

Le quatrième et dernier chapitre est consacré à l'interprétation et à la comparaison des résultats obtenus par cette étude.

# CHAPITRE 1 :

## PRESENTATION DE LA CENTRALE

Afin de poser les éléments nécessaires à la compréhension de cette étude, nous présentons les notions requises d'abord au niveau macroscopique, puis au niveau neutronique. Nous décrivons ensuite les moyens de commande.

### 1. PRESENTATION SOMMAIRE DES CENTRALES DE TYPE REP 900 MW

Pratiquement toutes les tranches nucléaires d'EDF sont du type Réacteur à Eau Pressurisée. Parmi les 58 tranches en service en 1997, on compte 34 tranches de 900 MW, 20 tranches de 1300 MW, deux tranches de 1450 MW et une tranche de type Réacteur à Neutrons Rapides (Super Phoenix, arrêtée en 1998) de 1200 MW.

Les centrales de type REP sont composées de deux circuits (Fig. 1.1) : le circuit primaire (en clair) et le circuit secondaire (en foncé). Le combustible nucléaire se trouve dans des gaines étanches en acier spécial placées dans le réacteur nucléaire (noté "cœur" sur la Fig. 1.1) ; la réaction nucléaire se produit à l'intérieur de ces gaines. Celles-ci conduisent la chaleur dégagée par la fission vers le fluide caloporteur qui circule dans le cœur. Le fluide caloporteur est de l'eau pressurisée (155 bars, 304.5 °C à 100 % de la puissance nominale). Les pompes primaires contribuent à la circulation du liquide primaire dont la pression est régulée par le pressuriseur. Le générateur de vapeur est l'interface entre le fluide primaire et le fluide secondaire. En son sein le fluide primaire cède son énergie au fluide secondaire qui s'évapore (224°C, vapeur saturée). La détente de cette vapeur entraîne la turbine liée à l'alternateur qui produit l'électricité. La vapeur passe ensuite dans le condenseur et le liquide secondaire est reconditionné<sup>1</sup> pour entrer à nouveau dans le générateur de vapeur.

---

<sup>1</sup> Ce reconditionnement a été le sujet de quelques modifications au cours du programme de construction des REP 900. Cette étude porte sur le modèle le plus récent mais pourra être facilement transposée aux modèles plus anciens.

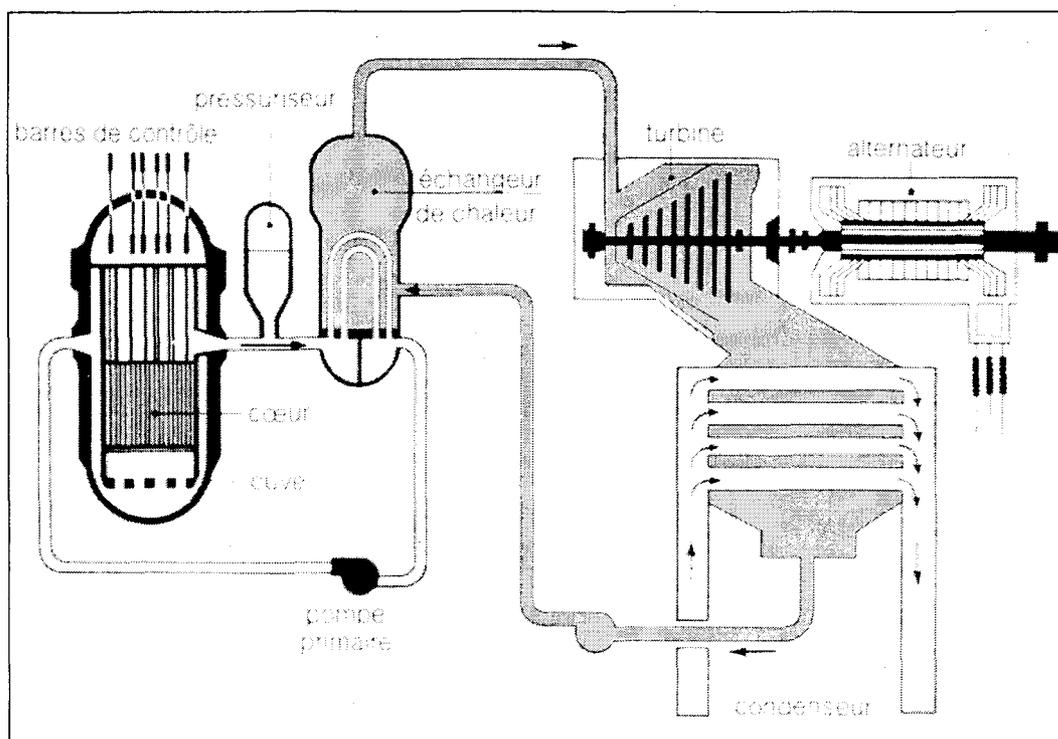
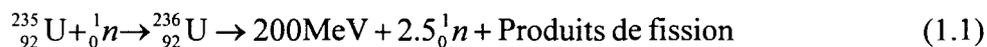


Fig. 1.1 Schéma fonctionnel d'un REP

## 2. NOTIONS DE NEUTRONIQUE

Le combustible est composé d' $^{238}\text{U}$  enrichi à 3% en  $^{235}\text{U}$ . L'absorption d'un neutron par un atome  $^{235}\text{U}$  engendre une fission dont le bilan s'écrit :



L'énergie moyenne libérée par une fission est de l'ordre de 200 MeV (il faut  $3 \cdot 10^{10}$  fissions par seconde pour dégager une puissance thermique de 1 watt).

Cette énergie se répartit de la façon suivante :

- 80 % en énergie cinétique des fragments de fission (ces fragments instables cèdent très rapidement leur énergie au milieu sous forme de chaleur) ;
- 19 % en rayonnement  $\beta$  et  $\gamma$  ;
- 1 % sous forme d'énergie cinétique des neutrons libérés.

Les deux ou trois neutrons libérés à chaque fission ont une vitesse de 20 000 km/s et sont dits "neutrons rapides". Pour créer des fissions, ils doivent atteindre un état d'agitation dit "thermique" où leur vitesse est proche de celle des noyaux du milieu dans lequel ils se

## Présentation de la centrale

déplacent (3 000 m/s à 300°C). Dans le cœur, l'eau du circuit primaire joue à la fois le rôle de fluide caloporteur et celui de modérateur qui permet de ralentir les neutrons.

Sur 100 neutrons émis par 40 fissions on vérifie dans les conditions nominales qu'en moyenne :

- 5 fuient pendant le ralentissement ;
- 10 sont capturés par  $^{238}\text{U}$  sans donner de fission ;
- 85 arrivent à l'état thermique.

Sur les 85 neutrons thermiques :

- 5 s'échappent ;
- 33 sont capturés par  $^{238}\text{U}$ , le modérateur et les matériaux des structures ;
- 7 sont capturés par  $^{235}\text{U}$  sans donner de fission (transformation en plutonium) ;
- 40 donnent des fissions.

Pour commander la réaction en chaîne, il suffit de contrôler le nombre de neutrons qui ne donnent pas de fission. On appelle la réactivité  $\rho$  la valeur sans dimension caractéristique de l'évolution de la réaction en chaîne :

$$\rho = \frac{N_2 - N_1}{N_2} \quad (1.2)$$

Avec  $N_1$  : nombre de neutrons libérés à la génération 1

$N_2$  : nombre de neutrons libérés à la génération 2

Selon que  $\rho$  est négatif, nul ou positif, on dit que le cœur est sous-critique, critique ou sur-critique. Le flux neutronique est une valeur mesurable. Il est directement proportionnel au nombre de fissions donc à la puissance fournie par le cœur. Ses variations permettent de calculer  $\rho$ . On quantifie l'effet des divers éléments  $i$  sur les neutrons par une réactivité partielle  $\rho_i$  qui sera souvent négative ; on parlera alors d'antiréactivité. Le bilan de réactivité s'écrira :

$$\rho = \sum_i \rho_i \quad (1.3)$$

avec  $\rho_i$  la réactivité de l'élément  $i$ .

L'unité usuelle de  $\rho$  est le pcm (pour cent mille). Les  $\rho_i$  sont donnés par des tables établies pour une ou plusieurs situations de référence.

### 3. MOYENS DE COMMANDE D'UN REP

Afin de commander la réactivité, on dispose de deux moyens : les grappes de commande et l'acide borique dissous dans le modérateur.

Les barres de commande sont des grappes de crayons de matériaux neutrophages. Leur introduction dans le cœur (par le haut) fait diminuer la réactivité ; leur retrait augmente la réactivité. Il existe deux sortes de grappes : les grises et les noires. Les grappes grises ont une efficacité moindre, ce qui leur permet d'être enfoncées plus profondément dans le cœur et d'avoir une action homogène ; les grappes noires ont une efficacité très grande et sont normalement peu enfoncées dans le cœur.

L'acide borique, qui lui aussi est neutrophage, a, contrairement aux grappes, une action complètement uniforme puisqu'il est dissous dans le modérateur. Son action est plus lente et la diminution de la concentration en bore du circuit primaire peut nécessiter l'injection d'une grande quantité de liquide et causer un volume important d'effluents<sup>2</sup> dont le traitement est coûteux.

---

<sup>2</sup> Le volume du circuit primaire est constant ; toute injection se traduit par le retrait d'un volume équivalent de liquide. L'ensemble de ces retraits de liquide constitue les effluents.

# CHAPITRE 2 :

## MODELISATION DE LA CENTRALE

### INTRODUCTION

Les variations de la demande en électricité conduisent les centrales à adapter leur production d'électricité. Les prévisions de la demande permettent d'établir à l'avance un plan de charge pour chaque centrale. Ce plan de charge est constitué de paliers. Des signaux de réglage fin de la puissance font évoluer le point de fonctionnement de la centrale autour du palier. Un modèle de la centrale doit présenter à la fois des caractéristiques statiques et dynamiques, car la centrale fonctionne à la fois en pilotage (lors des changements de palier) et en régulation (pendant les paliers). Face à un tel fonctionnement, afin de s'assurer de la validité d'un modèle numérique, il est capital de connaître les processus importants pour le pilotage. En effet si un de ces processus importants n'est pas représenté dans le modèle, alors celui-ci ne pourra pas être considéré comme fiable, même s'il donne de bons résultats pour un ou plusieurs plans de charge tests. Une modélisation qualitative de la centrale permettant de mettre en évidence ces processus importants sera proposée. Le modèle numérique sera ensuite explicité et validé.

### 1. MODELE QUALITATIF

Le but de la modélisation qualitative est la validation du modèle numérique par la prise en compte des processus importants pour le pilotage ([Bodini 96],[Bodini 97A]).

La science des systèmes<sup>3</sup> a permis de développer une méthode de représentation d'un système par les processus qui le composent (méthode dite Source-Cible-Flux-Champ ou SCFC). Cette méthode est mise en œuvre dans ce chapitre.

La modélisation de la centrale par ses processus nécessite une double description : celle des processus eux-mêmes (niveau local) et celle des relations entre les processus (niveau global). Ces deux descriptions sont envisagées conjointement au cours de la modélisation. Pour plus de clarté la présentation sera faite dans l'ordre suivant :

---

<sup>3</sup> cf. en Annexe 1 une introduction à la science des systèmes.

- les éléments constitutifs des diagrammes SCFC représentant les processus ;
- les éléments constitutifs du schéma global ;
- le schéma global ;
- les 25 processus prenant place dans la centrale.

### 1.1. Méthode SCFC

#### 1.1.1. Introduction

La notion de processus est très générale. Nous retiendrons les caractéristiques données dans [Borne et al. 92a] : "Un processus est un système dynamique traversé par des flux d'information, d'énergie et de matière, tout en étant soumis à des perturbations". Pour décrire un processus ayant une définition si générale, [Le Moigne 84] propose deux éléments principaux issus de la physique : les flux et les champs (les champs jouant le rôle d'éléments influents et perturbateurs). La mise en forme de ces éléments par la représentation SCFC est due à Jean-Louis Ermine. Elle a été utilisée la première fois dans [Grandamas et Ermine 92] et [Dos Santos, Lesbats et al 93]. [Ermine 96] présente une méthode pour décrire les systèmes de connaissance où il utilise la représentation SCFC pour décrire des processus.

Cette représentation s'appuie sur un graphe dit *Source-Cible-Flux-Champ* (Fig. 2.1) mettant en évidence un lien fort (**flux**) entre un phénomène physique (**phénomène source**) en un lieu donné (**système source**) et un autre phénomène physique (**phénomène cible**) en un autre lieu (**système cible**).

L'étude entreprise ici, ainsi que d'autres études réalisées en parallèle sur le fonctionnement incidentel, ont conduit à de légères modifications de cette méthode. La représentation employée dans ce mémoire tient compte de ces modifications.

Pour être complète, cette représentation des processus associe à ces premiers concepts ceux d'**environnement d'influence**, d'**événements déclencheurs** et de **corollaires**. Ces éléments seront décrits ci-après.

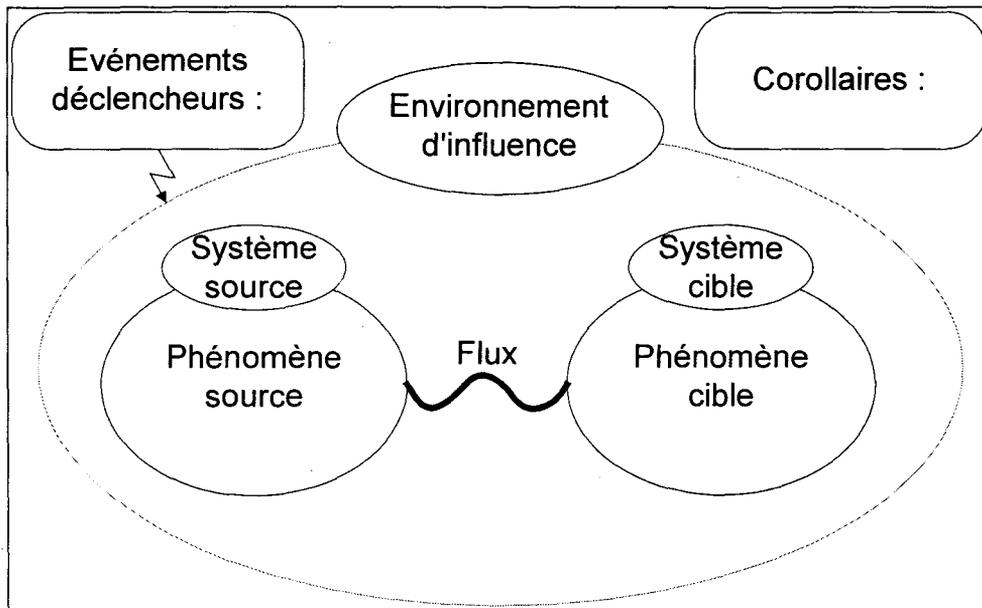


Fig. 2.1 Diagramme SCFC d'un processus

### 1.1.2. Eléments constituant le diagramme SCFC

#### a) Environnement d'influence

L'environnement d'influence est l'ensemble de ce qui peut influencer le processus sans en être une partie (comparable en physique à un *champ* de force qui a un effet sur un flux). Dans la plupart des cas lors du fonctionnement non-dégradé de la centrale, l'environnement n'a pas d'influence importante sur le pilotage des processus (cas proche d'un système fermé). Conformément au but de notre modélisation, l'environnement d'influence ne sera précisé que s'il est important pour le pilotage. C'est le Champ du sigle SCFC.

#### b) Système source

Le système source peut être un mécanisme, un fluide, un ensemble d'éléments, etc... C'est en son sein qu'a lieu le phénomène source.

#### c) Flux

Le lien entre le phénomène source et le phénomène cible est représenté par le flux. Le Moigne définit ainsi le flux : "un écoulement entre une source et un puits, entre deux réservoirs" ([Le Moigne 84]). Ce flux peut représenter un transfert de matière, d'énergie ou d'information. Ce transfert n'est pas toujours dirigé vers le système cible, mais parfois vers le système source, d'où l'absence de flèche sur la représentation du flux du diagramme général (Fig. 2.1). Il faut noter que le sens du flux n'implique pas une causalité. Par exemple dans le cas d'un échange thermique, il y a un flux d'énergie et donc une puissance transmise, or le refroidissement (phénomène source ou cible) n'est pas plus une cause du processus que le

réchauffement. Dans notre modélisation, nous ne cherchons pas à représenter une quelconque causalité mais seulement à exprimer les processus importants pour le pilotage.

d) Système cible

C'est au sein du système cible qu'a lieu le phénomène cible.

e) Corollaires

Souvent un processus ne peut être décrit correctement par deux phénomènes seulement. Sous la rubrique "Corollaires", les autres phénomènes découlant du processus et ayant un intérêt pour le pilotage sont représentés.

f) Evénements déclencheurs

Ce sont les événements ou les informations qui déclenchent<sup>4</sup> le processus. Ils peuvent être des phénomènes cibles, des corollaires ou encore des consignes. Les processus classiques ont un déclenchement déterministe, à la différence des processus nucléaires (résultant de la rencontre de deux éléments) dont le déclenchement est caractérisable par une probabilité d'occurrence<sup>5</sup>.

i) Evénement déclencheur déterministe

L'événement déclencheur déterministe peut être unique ou être la combinaison de plusieurs événements classiques.

La valeur caractérisant un événement déclencheur peut être prise dans l'ensemble {Vrai ; Faux}, auquel cas on parle d'événement causal booléen : sa réalisation (Vrai) est nécessaire au déclenchement du processus (ex : dépassement de niveau). Elle peut aussi être une valeur numérique dont la grandeur influence le processus. Pour l'étude, une valeur nulle signifie souvent la non-réalisation de l'événement déclencheur donc la non-activation du processus.

Une combinaison d'événements déclencheurs est presque toujours **conjunctive** (la réalisation de tous les événements est nécessaire au processus). Les événements disjonctifs déclenchent le processus si au moins l'un d'entre eux est réalisé.

Les événements déclencheurs sont précédés de

- '\*' s'ils sont conjonctifs

---

<sup>4</sup> On comprend le verbe déclencher dans son sens figuré : « Mettre en mouvement, déterminer brusquement une action, un mouvement » (Petit Robert, 1995).

<sup>5</sup> En raison de l'étude par processus, les processus nucléaires sont représentés à l'échelle nucléaire ; mais à l'échelle du pilotage on pourra considérer une valeur moyenne réalisée plutôt qu'une probabilité d'occurrence.

- '+' s'ils sont disjonctifs.

Si c'est une consigne, elle est grisée.

Si l'événement déclencheur trouve sa réalisation dans un processus, on fera précéder le nom du processus de '@' et on le fera suivre du nom du phénomène ou du corollaire correspondant ainsi que de la valeur caractérisant cet événement déclencheur, si nécessaire.

Par exemple :

"\*@Chauffage fluide primaire/Diminution de la densité du fluide primaire/Densité du fluide primaire"

signifie que le processus dépend de la densité du fluide primaire dont la réalisation dépend du processus "Chauffage fluide primaire". Dans certains cas la non-réalisation d'un événement est un déclencheur du processus. La réalisation de cet événement aura alors un effet inhibiteur sur le processus.

#### ii) Probabilité d'occurrence

Parfois la réalisation du processus dépend d'une probabilité définie par un ensemble de paramètres. Sauf indication contraire, les paramètres de valeur nulle entraînent une probabilité d'occurrence nulle. L'accroissement de certains paramètres peut entraîner une baisse de la probabilité d'occurrence. C'est pourquoi on affecte un signe à chaque paramètre, selon qu'il augmente ('+') ou qu'il diminue ('-') la probabilité d'occurrence. Leur représentation est la même que celle des événements causaux, le premier signe étant '+' ou '-'.

#### **1.1.3. Remarques**

On ne désire représenter que les phénomènes intéressants pour le pilotage, il résulte de ce fait un certain choix pour les processus. Ce choix est limité par la cohérence des processus eux-mêmes et des processus entre eux. S'il est déterminé au cours de la modélisation qu'un processus n'est pas important pour le pilotage et que son absence ne détruit pas la cohérence de l'ensemble des processus, alors il n'est pas représenté. Dans le cas contraire on le modélise. Une fois un processus choisi, il peut normalement n'être décrit que d'une seule façon<sup>6</sup>. La détermination de l'importance d'un processus pour le pilotage demande une certaine connaissance de l'objet qu'on modélise. Dans la phase finale de la modélisation, une seconde

considération sera portée aux processus pour déterminer leur utilité pour le pilotage. Une compréhension approfondie des phénomènes expliqués est nécessaire pour réussir la modélisation.

La cohérence entre les processus reflète la justesse de la modélisation. A partir d'un processus, par un enchaînement cohérent, on peut couvrir tout le domaine à modéliser. Il n'y a donc pas de « découpage » préalable en processus, c'est la mise en œuvre de la méthode qui force le découpage. En effet l'obtention d'un ensemble homogène oblige à descendre au cœur du processus physique. C'est pourquoi les processus nucléaires sont représentés à l'échelle atomique. La cohérence et l'homogénéité des processus eux-mêmes et des processus entre eux ainsi que l'opinion d'un expert déterminent la réussite de la modélisation.

### 1.2. Modèle global

Le modèle global donne une vue d'ensemble des processus et de leurs interactions (Fig. 2.4).

#### 1.2.1. Mode de lecture du schéma global

##### *a) Processus*

Le schéma global présente les processus décrits par la méthode SCFC dans la suite de ce chapitre. Leur description est faite selon un ordre arbitraire. La lecture du diagramme global doit guider l'ordre de lecture des processus. C'est pour cela qu'ils sont présentés après le diagramme global.

##### *b) Réservoirs*

Ils représentent un état assimilable à un niveau (positif ou nul). Un réservoir est le siège de deux processus : le remplissage et le vidage.

Afin de simplifier, pour ne pas avoir à faire apparaître ces deux processus, on introduit la notion de réservoir. On s'aperçoit au niveau global de la présence d'un flux entre deux réservoirs, le processus décrivant ce flux est représenté par la même couleur que le flux.

##### *c) Processus-réservoirs*

Le contenu de certains réservoirs peut avoir une influence sur le reste de la centrale. Les simples notions de vidage/remplissage ne sont plus suffisantes. On utilise la modélisation par processus afin de décrire l'influence du contenu du réservoir.

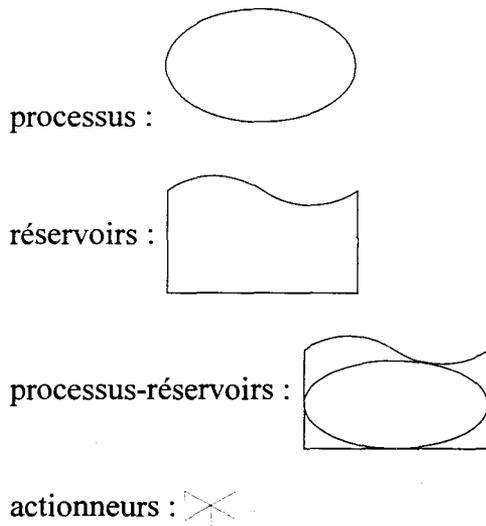
---

<sup>6</sup> Il n'a pas pour le moment de preuve de l'unicité de la représentation d'un processus par la méthode SCFC. Au principe d'unicité, il vaut mieux substituer le principe de convergence vers une représentation cohérente du processus.

Nous réservons l'appellation *processus-réservoir* à ce type de réservoir.

Par exemple le processus-réservoir **Effet bore** est représentatif de la concentration en bore du circuit primaire (cette concentration est le niveau caractéristique du réservoir). Le contenu de ce processus-réservoir (le bore) exerce une influence directe sur le contenu du réservoir **Concentration de neutrons lents** (cf. Fig. 2.4, Fig. 2.11). Parfois la différence entre processus, réservoir et processus-réservoir n'est pas toujours nette : est-ce que ce sont les neutrons qui agissent sur le bore ou est-ce l'inverse ? Le critère de choix a toujours été la pertinence au point de vue du pilotage. Ici le bore permet de régler la réactivité, donc la concentration de neutrons lents. On a dès lors considéré son action sur les neutrons.

d) Symboles utilisés



e) Flèches

Chaque flèche représente l'effet d'un processus sur un autre avec la signification suivante :

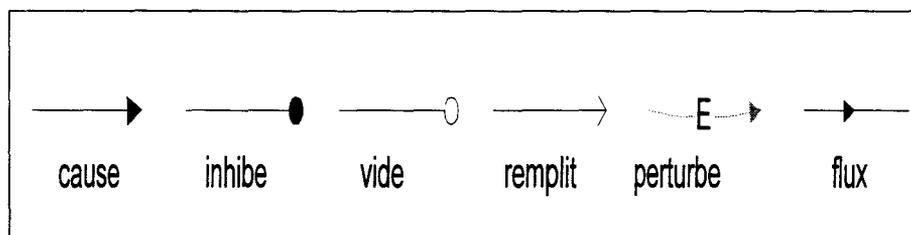


Fig. 2.2 Symbolisme des flèches

Par exemple

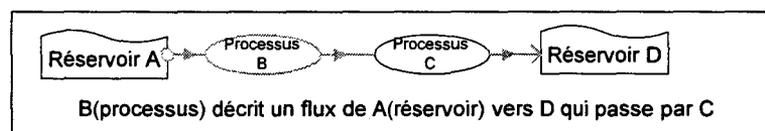


Fig. 2.3 Réservoirs, processus et flèches

NOTA : . Le flux et le processus décrivant le flux sont représentés de la même couleur (Fig. 2.3).

*f) Régulations*

Les actionneurs sont régis par des régulateurs ou, comme dans le cas du bore, par des opérateurs. Ces régulateurs ne sont pas très importants pour la compréhension des processus eux-mêmes. Sur le schéma global on fera apparaître les actionneurs mais pas les régulateurs.

**1.3. Schéma global**

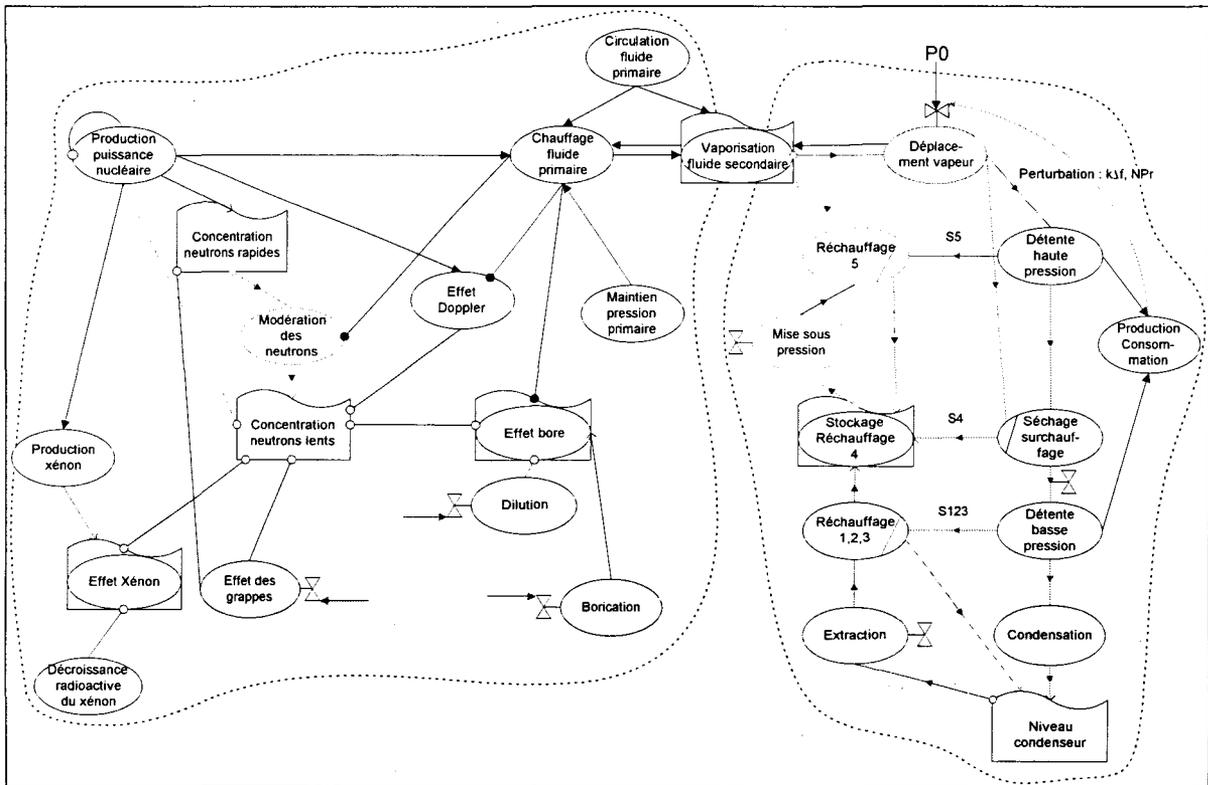


Fig. 2.4 Schéma global

Deux grands groupes de processus peuvent être distingués sur le schéma global : à gauche le cœur et le circuit primaire, à droite le circuit secondaire. Le processus-réservoir *Vaporisation fluide secondaire* est l'interface entre ces deux groupes.

A gauche, le réservoir *Concentration des neutrons lents* est lié aux nombreux processus qui interviennent dans le calcul de la réactivité (*Production de puissance nucléaire, Effet xénon, Effet bore, Effet des grappes, Modération des neutrons, etc....*). On aperçoit aussi les actionneurs et les variables qui les caractérisent ( $P_{osR}$ ,  $P_{osG}$ ,  $Q_{dil}$ ,  $Q_{bor}$ ). En bas à gauche, les processus caractérisant l'évolution du xénon sont reliés au processus réservoir Effet xénon.

A droite, on remarque les processus décrivant la circulation des flux (*Déplacement vapeur, Extraction, Mise sous pression*) et le trajet des flux qu'ils engendrent entre deux réservoirs : à droite l'évolution du flux depuis le GV jusqu'au condenseur, à gauche le traitement du fluide depuis le condenseur jusqu'à son injection dans le GV.

#### 1.4. Processus décrits selon la méthode SCFC

Ce sont les 25 processus du schéma global.

##### 1.4.1. Production de puissance nucléaire

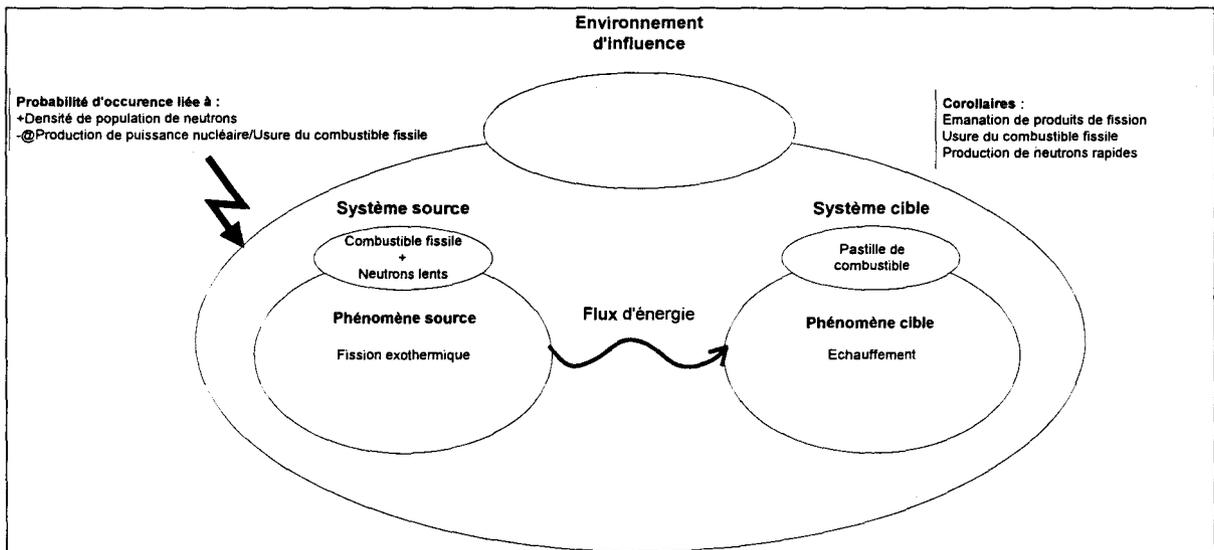


Fig. 2.5 Production de puissance nucléaire

Le processus de production de puissance nucléaire est le processus discret de la fission d'un atome de combustible fissile causée par l'absorption d'un neutron lent (voir *Modération des neutrons*). La probabilité d'occurrence de ce choc est une fonction croissante de la densité des éléments en jeu. La densité de neutrons lents est la clé du pilotage de la production de

puissance nucléaire. La puissance dégagée est proportionnelle à la fréquence des fissions. La fission libère un flux d'énergie qui chauffe la pastille de combustible.

Les autres conséquences sont :

- la décomposition de l'atome d'uranium en produits de fission ;
- la libération de neutrons rapides qui ne peuvent pas déclencher de fission ;
- la diminution de la densité de combustible fissile (usure du combustible, donc

variation à long terme de l'efficacité du cœur )<sup>7</sup>.

### 1.4.2. Modération des neutrons

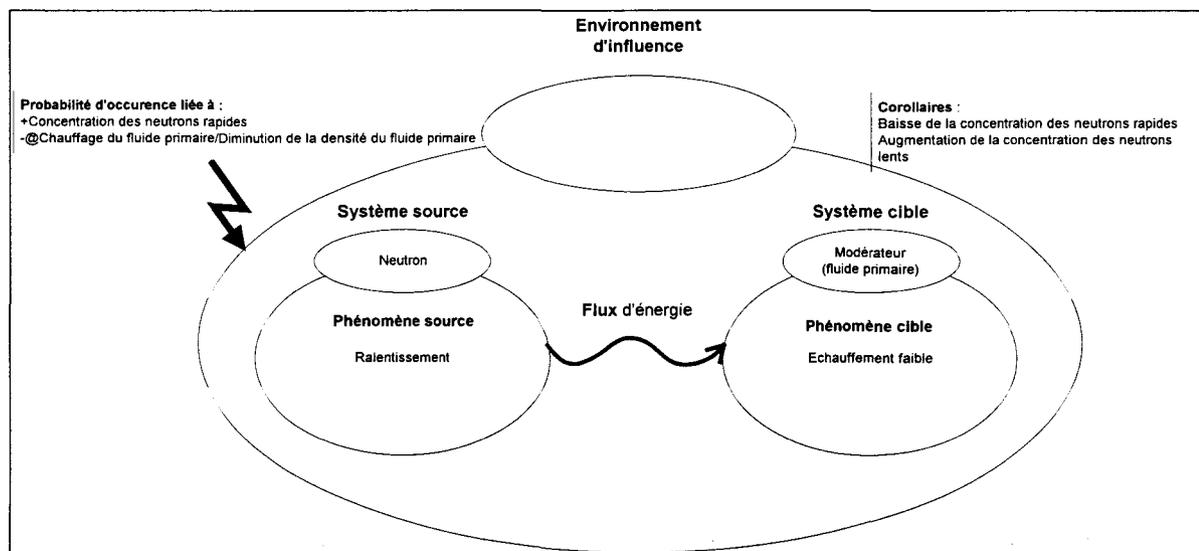


Fig. 2.6 Modération des neutrons

Les neutrons rapides (20 000 km/s) issus de la fission traversent la gaine et sont ralentis par le modérateur (le fluide primaire) pour devenir des neutrons lents<sup>8</sup> (ou neutrons thermiques). La probabilité d'occurrence de ce ralentissement dépend de la densité des éléments considérés (fluide primaire, neutrons). Le chauffage du fluide primaire diminue sa densité, d'où un ralentissement moindre.

Le flux d'énergie est l'énergie cinétique du neutron rapide absorbée par l'élément modérateur.

<sup>7</sup> Les crayons de combustible ont une durée de vie de trois ans. Au niveau du cœur, les crayons sont remplacés par tiers ou par quart chaque année. Leur répartition en fonction de leur âge, permet d'établir une probabilité d'occurrence sommairement égale dans le cœur. L'épuisement du cœur est donc à considérer au cours d'une année d'utilisation.

<sup>8</sup> Les neutrons sont ralentis progressivement. Les neutrons lents sont susceptibles de provoquer une fission. Cette séparation en deux groupes est artificielle et tolérée pour une raison de simplicité (pour des calculs précis, on utilise six groupes et parfois plus pour des calculs de cas critiques)

### 1.4.3. Apparition de xénon

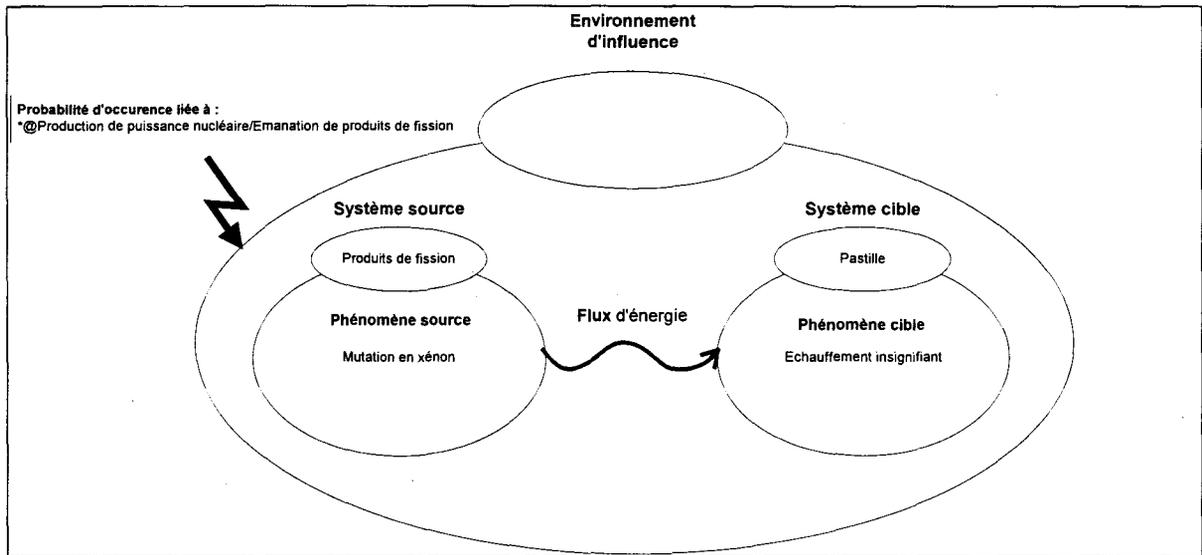


Fig. 2.7 Apparition de xénon

Les produits de fission vont muter au cours du temps en divers éléments et en particulier en xénon<sup>9</sup>, produit très neutrophage qui a une incidence non négligeable sur la réactivité. La mutation des produits de fission en xénon est complexe et n'offre pas d'intérêt pour la modélisation : ce phénomène *Mutation en xénon* est donc un *agrégat*<sup>10</sup>.

<sup>9</sup> Il existe plusieurs isotopes du xénon, un seul est neutrophage. On emploiera par abus de langage le terme xénon pour désigner le xénon neutrophage car lui seul est intéressant pour le pilotage. Quand on écrit que le xénon disparaît, il s'agit de l'isotope neutrophage.

<sup>10</sup> Dans le cas où la description d'un phénomène n'offre pas d'intérêt pour le modélisateur, celui-ci décide d'arrêter sa modélisation à ce niveau. Apparaît alors la notion d'agrégat ou de grain qui s'oppose au principe d'exhaustivité de *La Méthode*. (cf. Annexe 1)

1.4.4. Effet xénon

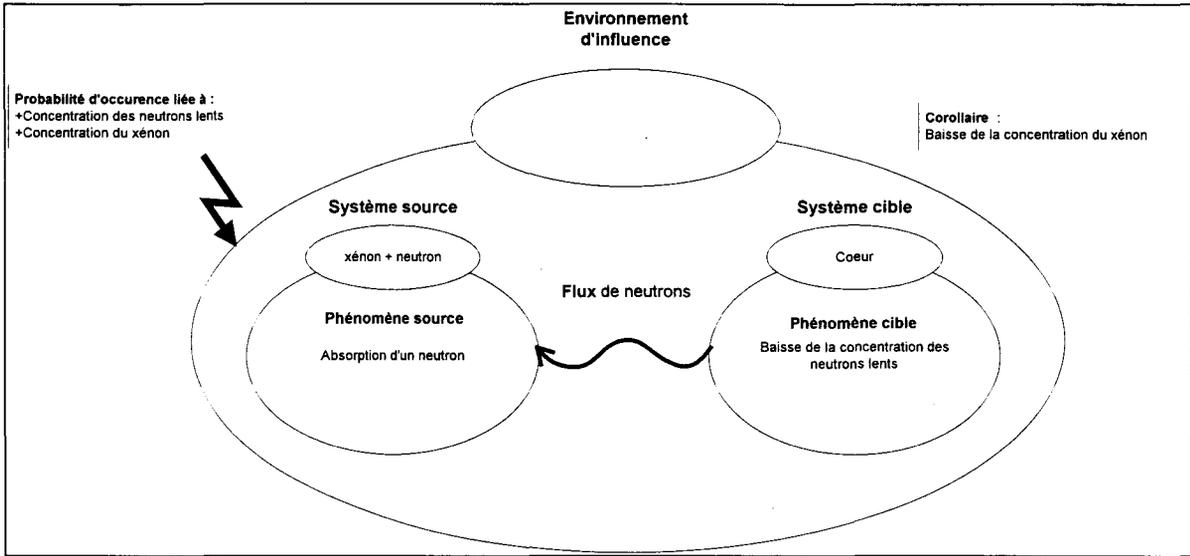


Fig. 2.8 Effet xénon

*Effet xénon* est un processus-réservoir<sup>11</sup> dont le niveau représente la concentration en xénon. Celle-ci dépend de la production de xénon, de la décroissance radioactive du xénon et de l'effet xénon (le xénon perd son pouvoir neutrophage après absorption d'un neutron). La différence entre la production du xénon et sa disparition peut entraîner des variations de réactivité importantes.

1.4.5. Décroissance radioactive du xénon

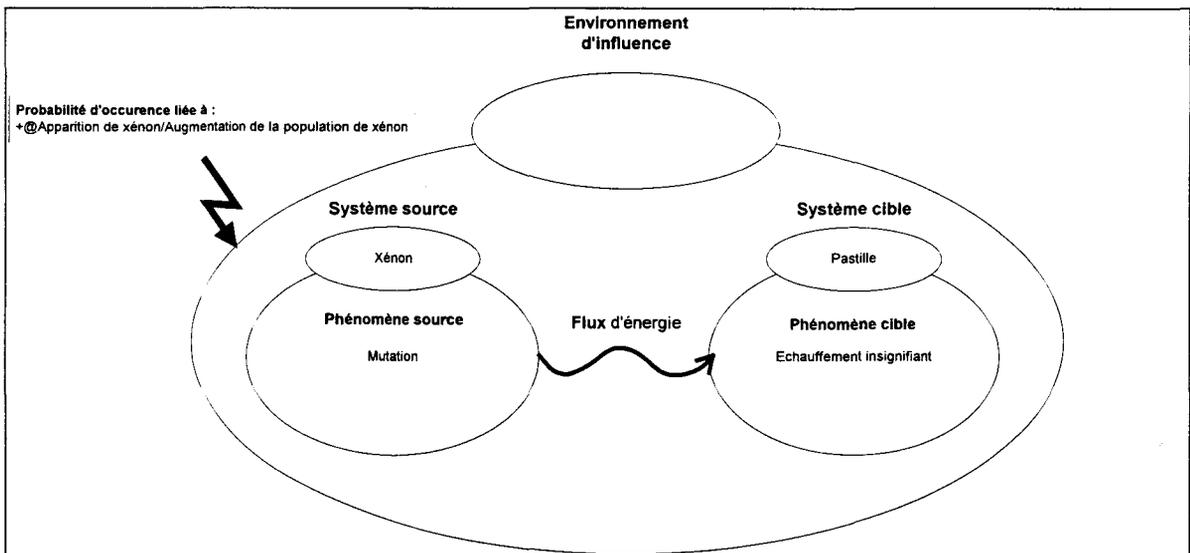


Fig. 2.9 Décroissance radioactive du xénon

<sup>11</sup> cf. c)Processus-réservoirs, p.12

Avec une décroissance radioactive de constante de temps 13 heures, le xénon neutrophage finit par muter et perd sa capacité d'absorber les neutrons.

### 1.4.6. Chauffage du fluide primaire

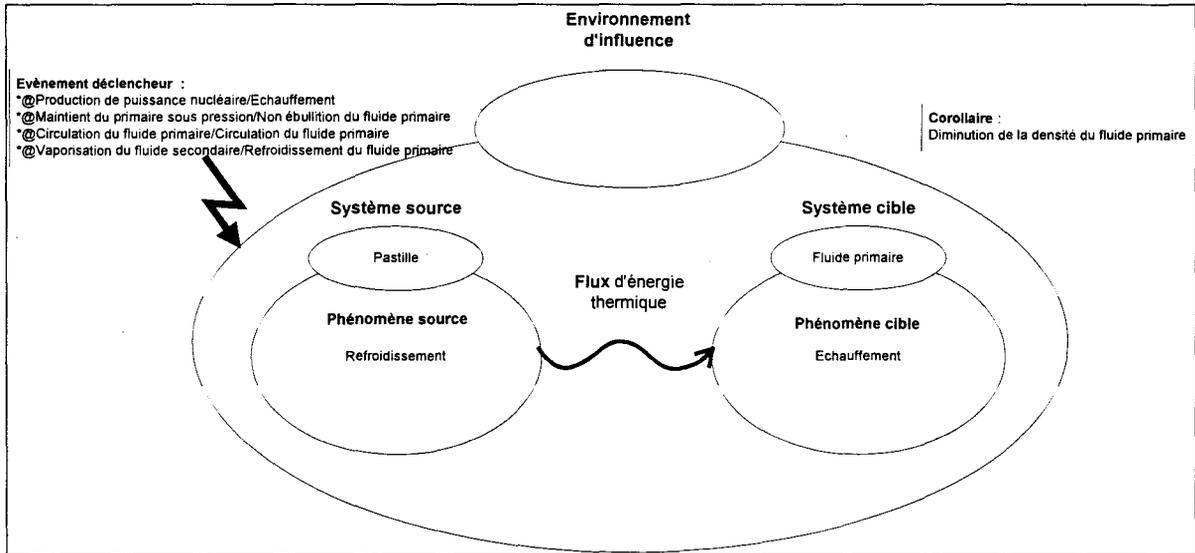


Fig. 2.10 Chauffage du fluide primaire

Le fluide primaire qui circule dans le réacteur permet le refroidissement du combustible par un transfert d'énergie thermique. Pour un meilleur échange thermique, la haute pression du fluide empêche toute création de film de vapeur le long des crayons. Dans une étude des processus de la centrale en mode de fonctionnement dégradé, il faudrait prendre en compte le transfert de l'énergie à travers la gaine du combustible. Une telle précision dans la modélisation n'est pas pertinente avec le cadre de cette étude (fonctionnement en mode non-dégradé).

1.4.7. Effet bore

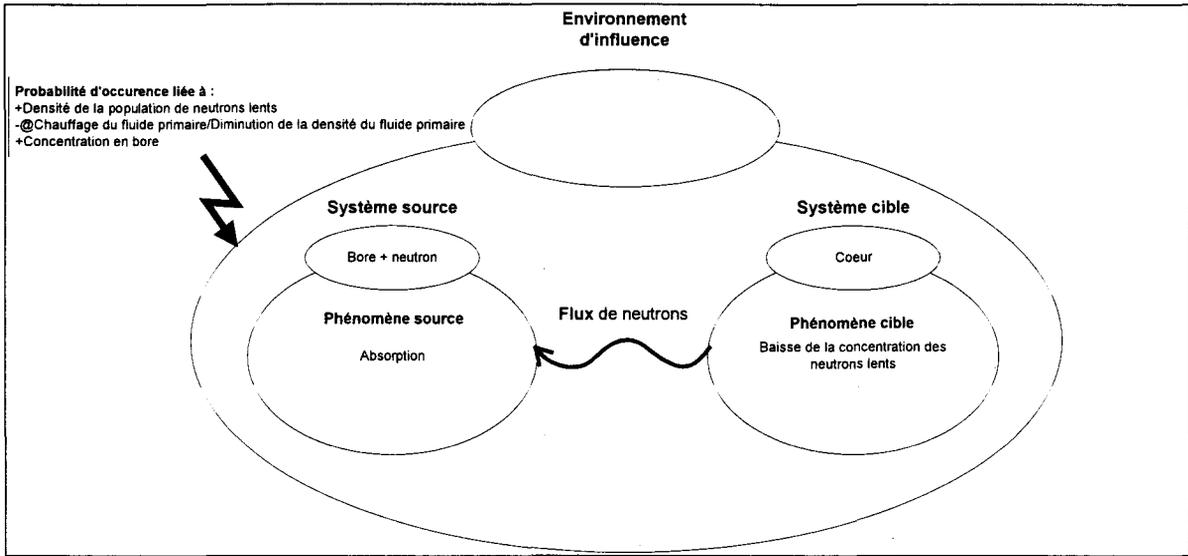


Fig. 2.11 Effet bore

Comme pour la modération des neutrons, la probabilité de choc est diminuée par la baisse de la densité due au chauffage du fluide primaire. Le bore est un élément neutrophage ; à chaque occurrence de ce processus, l'élément bore en jeu perd sa qualité d'élément neutrophage mais cet effet est marginal. On ne le représente pas. Le bore absorbe 10 000 fois mieux les neutrons thermiques que les neutrons rapides ; on n'a donc pas représenté son action sur les neutrons rapides.

Sur le schéma global, le réservoir représente la concentration en bore qui est modifiée par la dilution et la borication.

1.4.8. Dilution

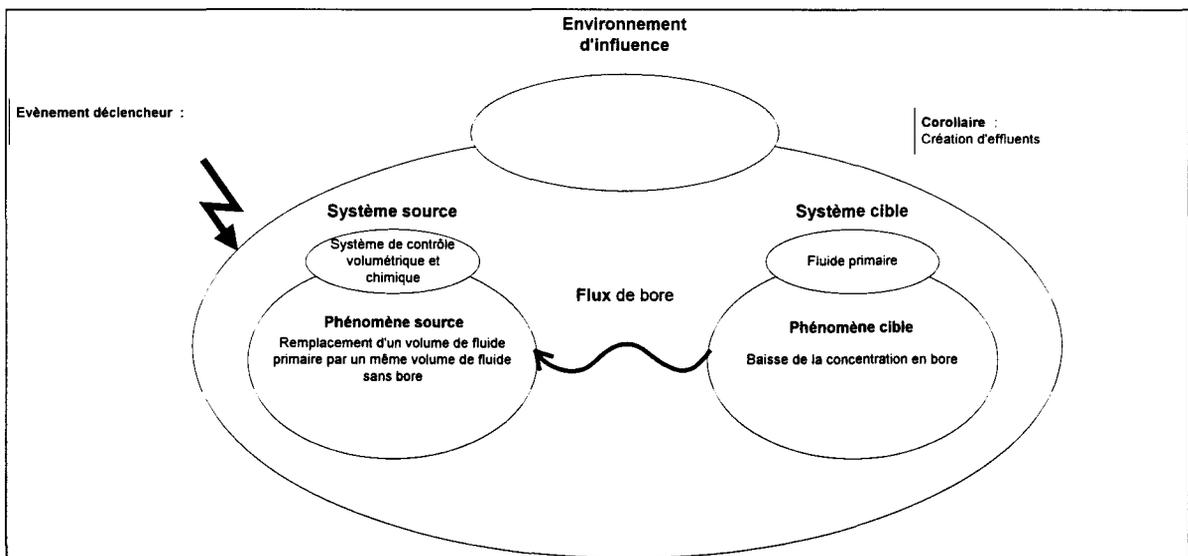


Fig. 2.12 Dilution

La consigne manuelle<sup>12</sup> de débit de dilution entraîne une baisse de la concentration en bore du circuit primaire par remplacement d'une quantité d'eau du circuit primaire par la même quantité d'eau non borée, d'où un accroissement des effluents.

### 1.4.9. Borication

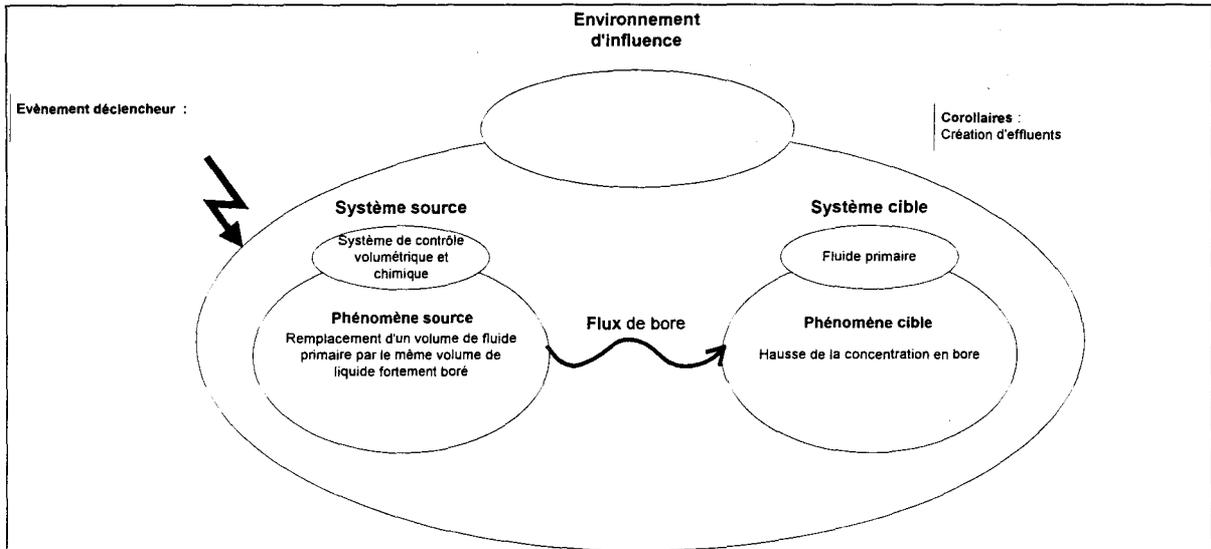


Fig. 2.13 Borication

La consigne manuelle de débit de borication entraîne une hausse de la concentration en bore du circuit primaire par remplacement d'une quantité d'eau du circuit primaire par la même quantité d'eau borée, d'où un accroissement des effluents.

---

<sup>12</sup> Il n'existe pas de régulateur de la concentration en bore, elle est commandée manuellement par les opérateurs d'après les procédures de conduite.

### 1.4.10. Effet Doppler

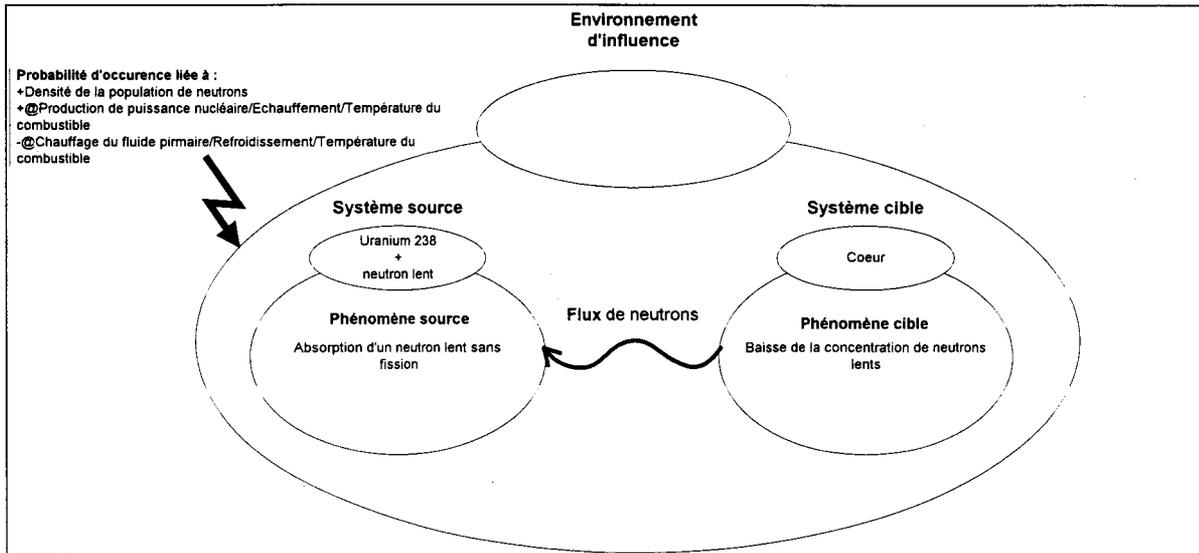


Fig. 2.14 Effet Doppler

Comme les autres processus de type nucléaire, l'événement déclencheur est ramené à une probabilité d'occurrence. L'uranium 238, non fissile, qui représente en début de vie 97% du crayon de combustible, est légèrement neutrophage. Sa capacité d'absorption croît avec sa température et diminue la réactivité globale. C'est l'effet Doppler

### 1.4.11. Effet des grappes

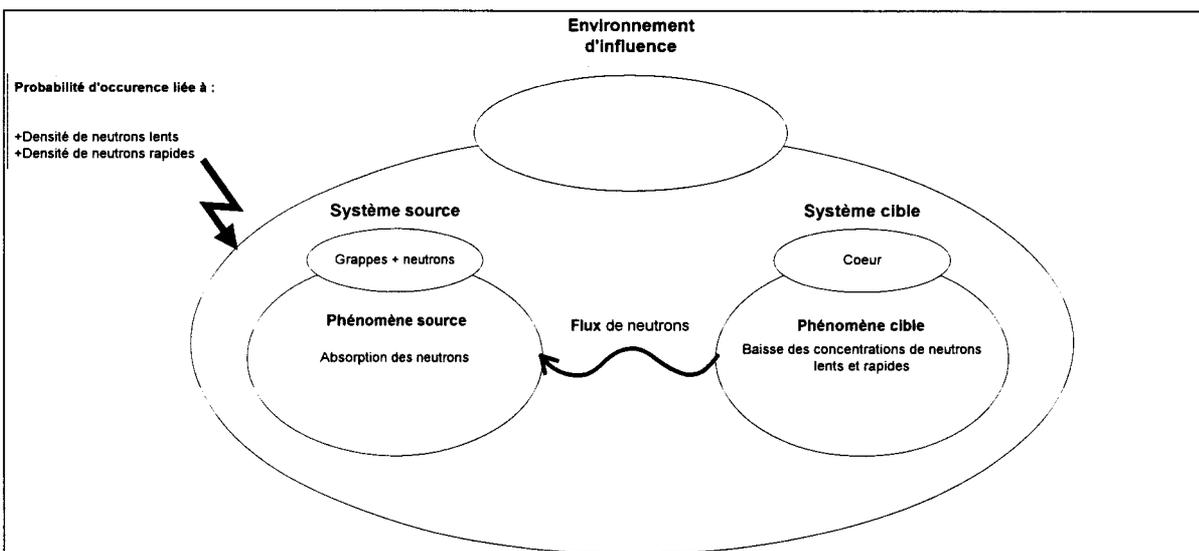


Fig. 2.15 Effet des grappes

La probabilité d'occurrence de l'absorption d'un neutron par les grappes dépend de la position des grappes (PosR, PosG ; plus elles sont enfoncées, plus l'antiréactivité est grande) ainsi que de la concentration de neutrons<sup>13</sup>.

Bien que les grappes grises soient moins antiréactives que les noires, le processus d'absorption des neutrons est le même. La quantification des phénomènes n'étant pas modélisée, il n'est pas possible de les différencier<sup>14</sup> au niveau qualitatif.

Les grappes grises étant moins antiréactives, leur enfoncement profond dans le cœur rend leur effet plus uniforme. A contrario, les grappes noires (R) sont beaucoup plus antiréactives. Elles ont une capacité d'action plus rapide et leur effet est localisé dans le haut du cœur. Pour prendre en compte cette différence d'amplitude des phénomènes et pour l'exprimer, on peut représenter cet effet en deux fois : l'une dans le haut du cœur, l'autre dans le bas du cœur<sup>15</sup>..

#### 1.4.12. Maintien du primaire sous pression

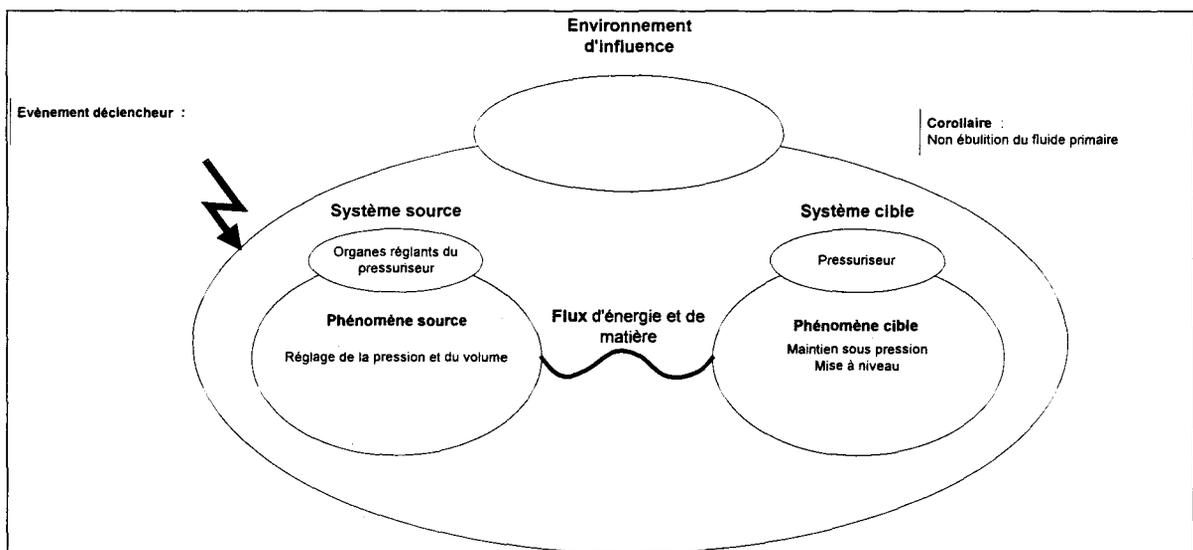


Fig. 2.16 Maintien du primaire sous pression

La haute température du fluide dans le cœur oblige le maintien d'une pression élevée dans l'ensemble du circuit primaire de façon à empêcher qu'un point d'ébullition ne se crée. Le pressuriseur, où il règne une plus haute température que dans le reste du circuit, contient une

<sup>13</sup> Les grappes absorbent 10 fois moins les neutrons rapides que les neutrons lents.

<sup>14</sup> Cette représentation est qualitative et non quantitative. L'amplitude des phénomènes n'est pas prise en compte, sauf si elle n'est pas significative au niveau du pilotage, auquel cas le phénomène n'est pas modélisé.

<sup>15</sup> Voir le diagramme deux cœurs Annexe 2.

phase gazeuse. La régulation de cette phase gazeuse permet d'imposer une pression constante au circuit primaire.

L'aspersion d'eau froide et le chauffage de l'eau contenue dans le pressuriseur créent un flux thermique (positif ou négatif) qui maintient le circuit primaire dans des conditions optimales.

La température plus haute dans le pressuriseur que dans le reste du circuit réchauffe très légèrement ce dernier (phénomène marginal).

### 1.4.13. Circulation du fluide primaire

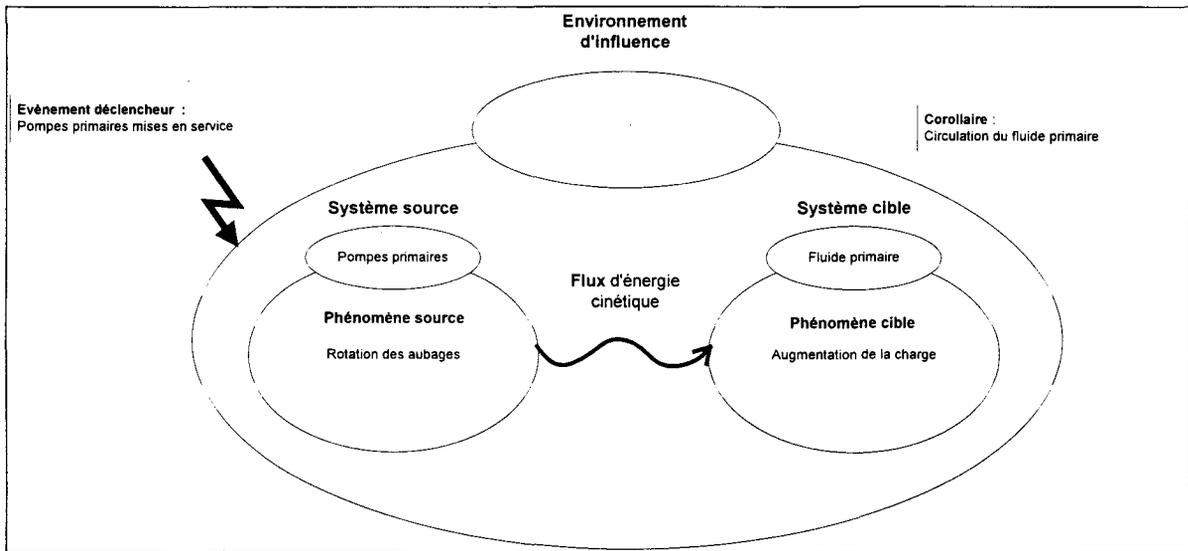


Fig. 2.17 Circulation du fluide primaire

Le moteur des pompes primaires est soumis aux perturbations venant du réseau électrique. Les études sur la sûreté du fonctionnement sont concernées par ces perturbations (coupure d'alimentation des pompes primaires, etc ...). Ce genre de perturbations sort du cadre de cette étude (fonctionnement en mode non dégradé).

L'énergie transférée au fluide par la pompe est principalement mécanique. Le rôle des pompes primaires est de vaincre les pertes de charge du fluide.

### 1.4.14. Vaporisation du fluide secondaire

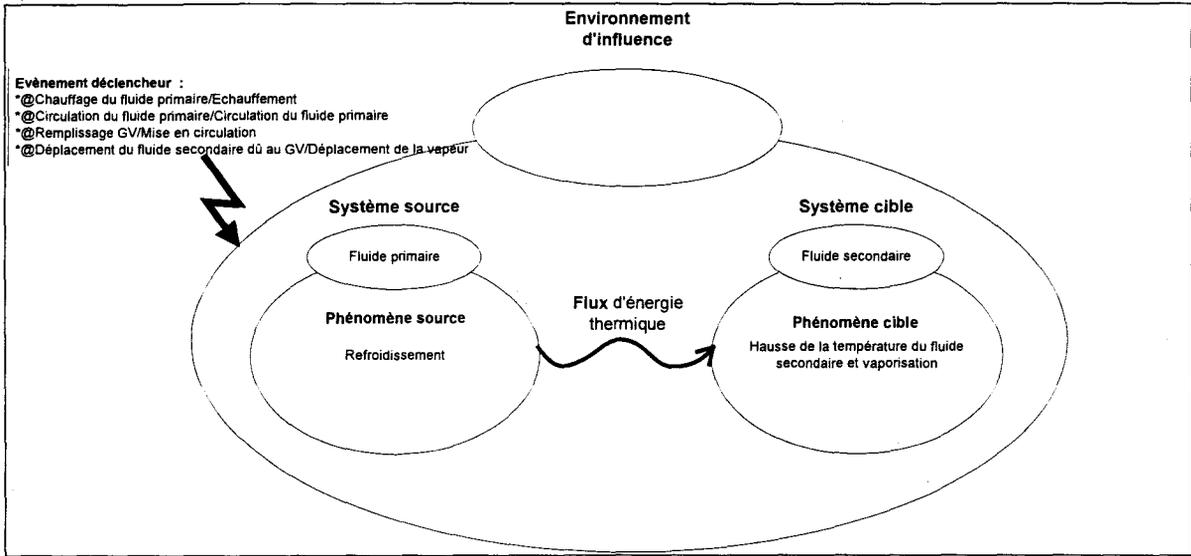


Fig. 2.18 Vaporisation du fluide secondaire

La chaleur cédée par le fluide primaire évapore le fluide secondaire. La vapeur présente dans le GV est saturée.

### 1.4.15. Déplacement de la vapeur

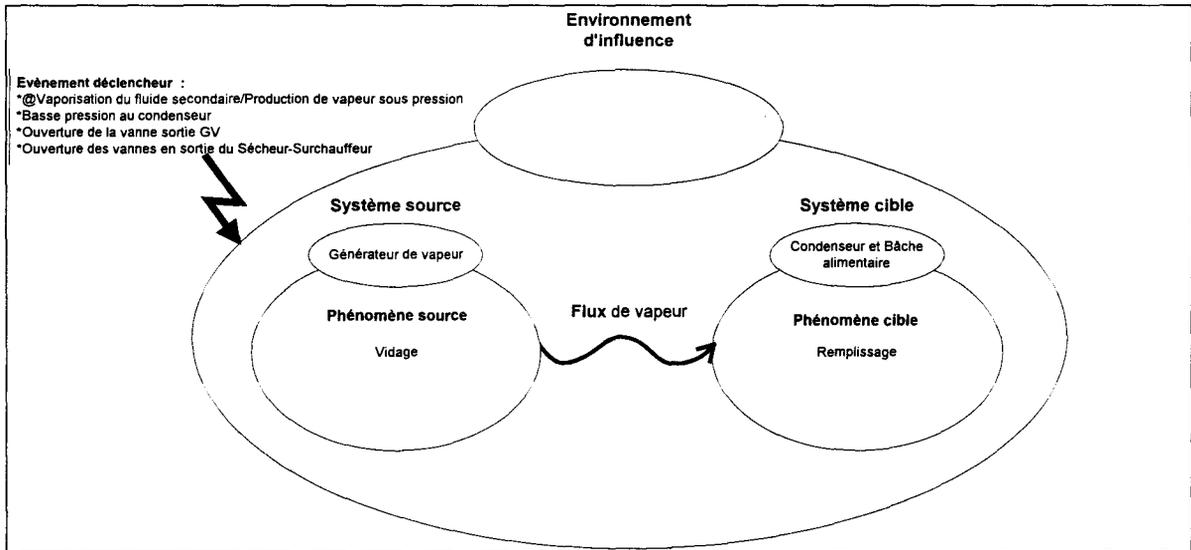


Fig. 2.19 Déplacement de la vapeur

La présence de vapeur dans le GV, l'ouverture de la vanne en sortie de GV ainsi que la différence de pression entre le GV et le condensateur provoquent le déplacement de la vapeur vers le condenseur. Ce déplacement ne peut avoir lieu que si les vannes en sortie du sècheur-surchauffeur sont ouvertes. Actuellement ces vannes normalement ouvertes ne sont pas utilisées pour le pilotage.

1.4.16. Détente turbine HP

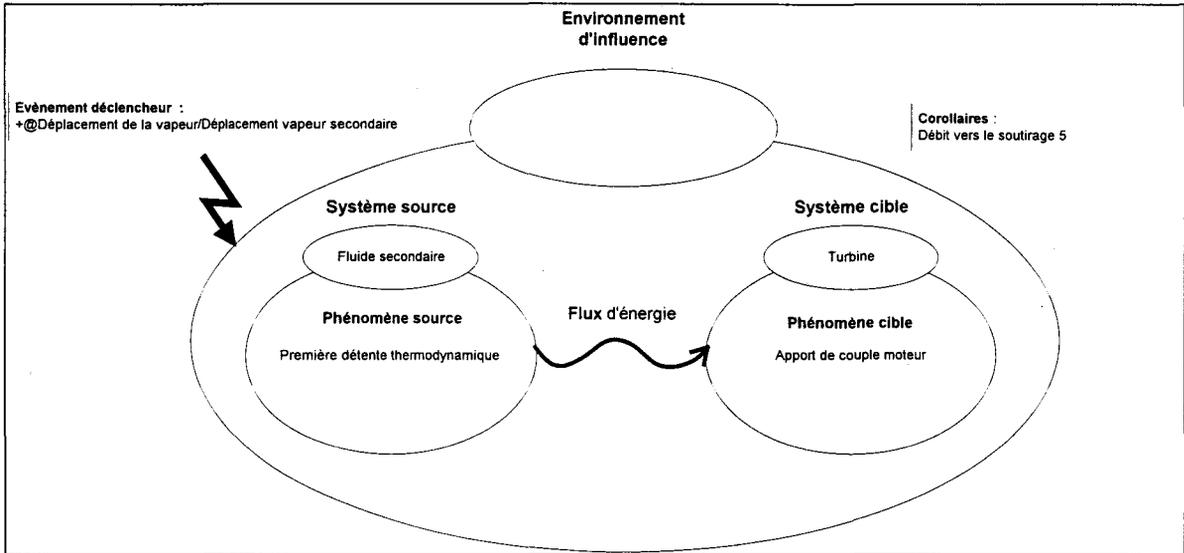


Fig. 2.20 Détente turbine HP

La détente de la vapeur entraîne la turbine. Cette détente provoque la condensation d'une partie du fluide qui est soutirée (soutirage 5).

1.4.17. Séchage-surchauffage

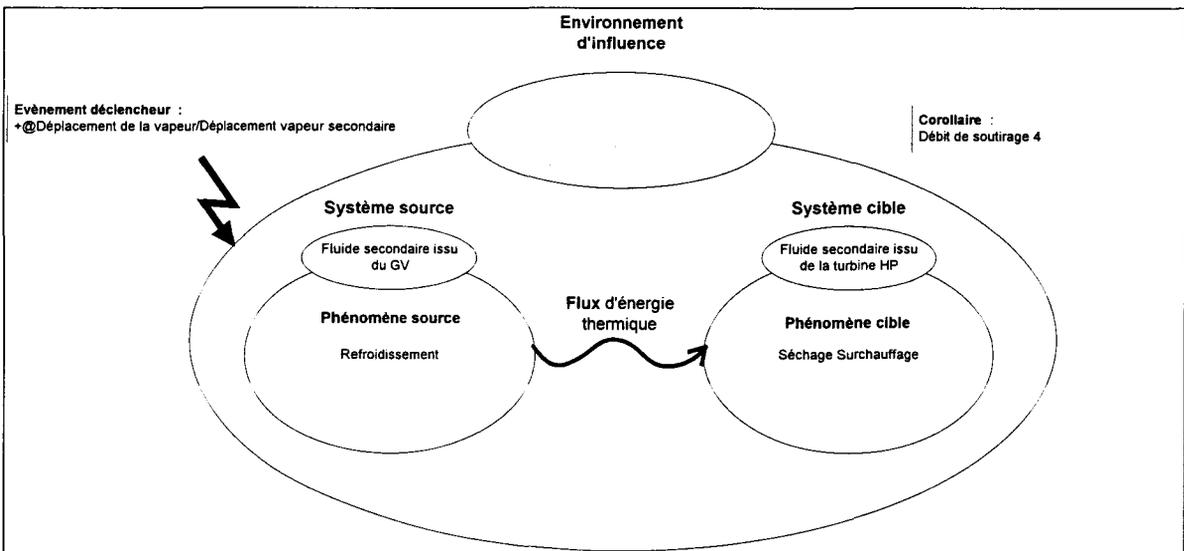


Fig. 2.21 Séchage-Surchauffage

L'afflux de vapeur humide venant de la turbine HP dans le sécheur-surchauffeur et son séchage entraînent un apport d'énergie thermique à la vapeur et une hausse de sa capacité de détente.

### 1.4.18. Détente turbine BP

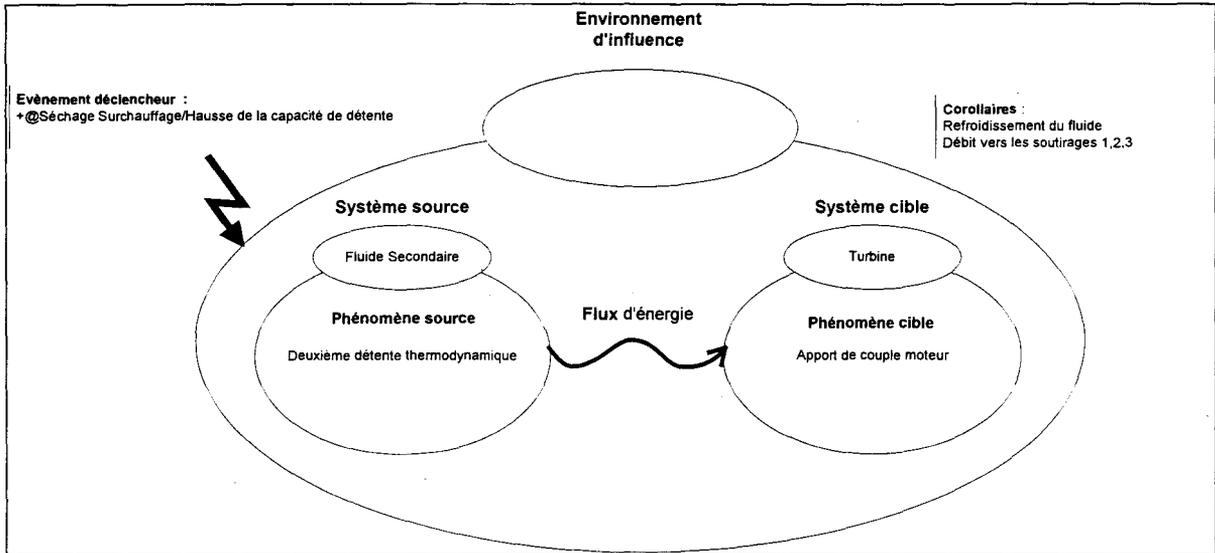


Fig. 2.22 Détente turbine Basse Pression

La vapeur issue du sécheur-surchauffeur est détendue dans la turbine BP. Cette détente provoque la condensation d'une partie du fluide qui est soutirée en trois endroits (soutirages 1, 2 et 3).

### 1.4.19. Production-Consommation d'électricité

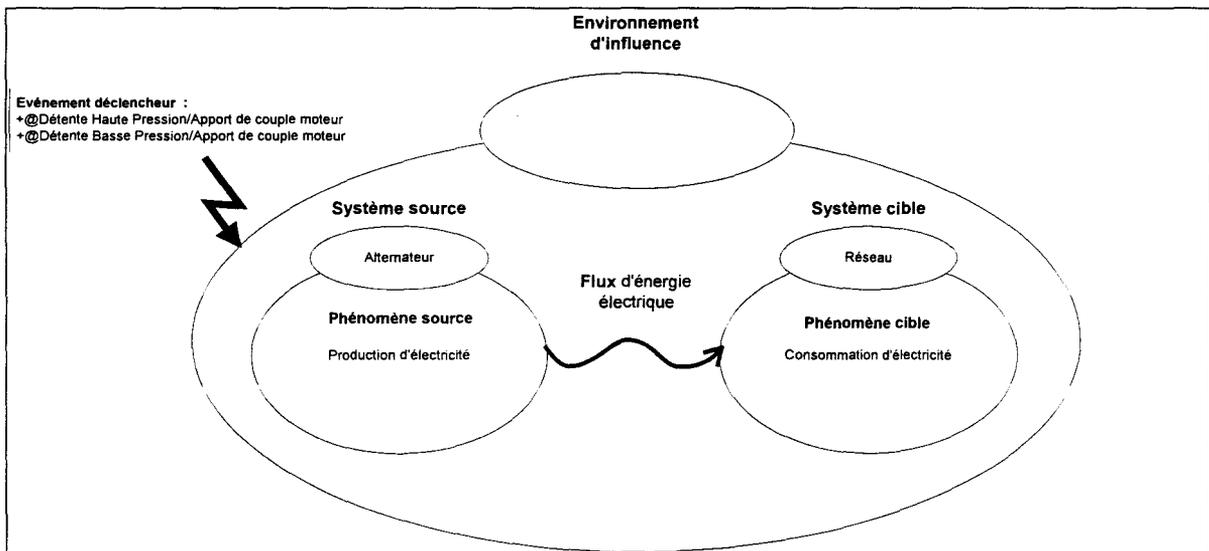


Fig. 2.23 Production-Consommation d'électricité

Le couple résultant des détente HP et BP dans la turbine est transmis à l'alternateur qui produit l'électricité fournie au réseau. Les REP français sont conçus pour être « turbine prioritaire » : la production doit suivre la demande. Ce phénomène de consommation d'électricité n'est pas commandable ; c'est *la* perturbation à laquelle doit faire face le pilotage.

## Chapitre 2

La consigne de puissance provient de cette perturbation. Elle est décomposée en trois signaux :

- le signal  $k\Delta f$  résulte d'un déséquilibre entre la production et la consommation d'électricité qui se traduit par un décalage de la fréquence de l'alternateur. C'est un signal qui a une dynamique élevée. Le facteur  $k$  constant détermine la réactivité de la centrale. Ce signal est élaboré dans chaque centrale ;
- le signal  $NPr$  correspond à un réglage permettant d'équilibrer globalement le système production-consommation (dynamique légèrement plus lente que le  $k\Delta f$ ). Ce signal est élaboré par les gestionnaires du réseau électrique et est transmis à chaque centrale toutes les 10 s ;
- le signal  $P0$  est la référence de charge (dynamique très faible, prévision des grandes variations du réseau ; ce signal est connu à l'avance).

Pour notre étude, nous rechercherons une amélioration du pilotage prenant en compte  $P0$  et nous testerons la robustesse des résultats aux deux autres signaux.

### 1.4.20. Condensation

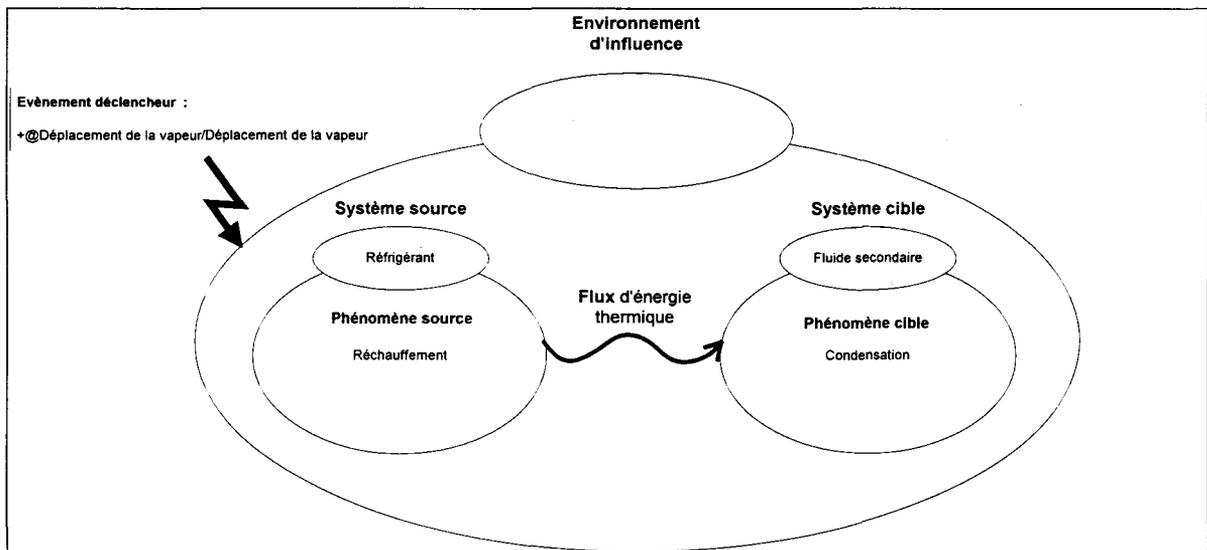


Fig. 2.24 Condensation

Le fluide issu de la détente BP est refroidi par le réfrigérant, ce qui entraîne sa condensation.

### 1.4.21. Extraction

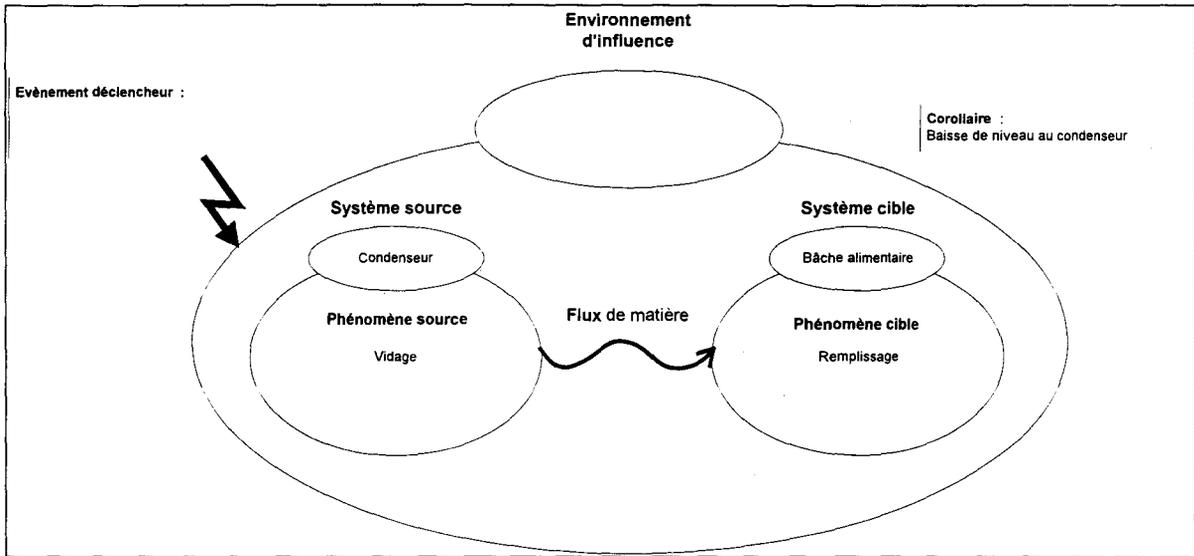


Fig. 2.25 Extraction

Dans un contexte normal, les pompes d'extraction sont toujours en marche. Pour que l'extraction ait lieu, il faut qu'il y ait de l'eau au condenseur. Ce sont les vannes d'extraction qui déterminent le débit entre le condenseur et la bâche.

### 1.4.22. Réchauffages 1,2,3

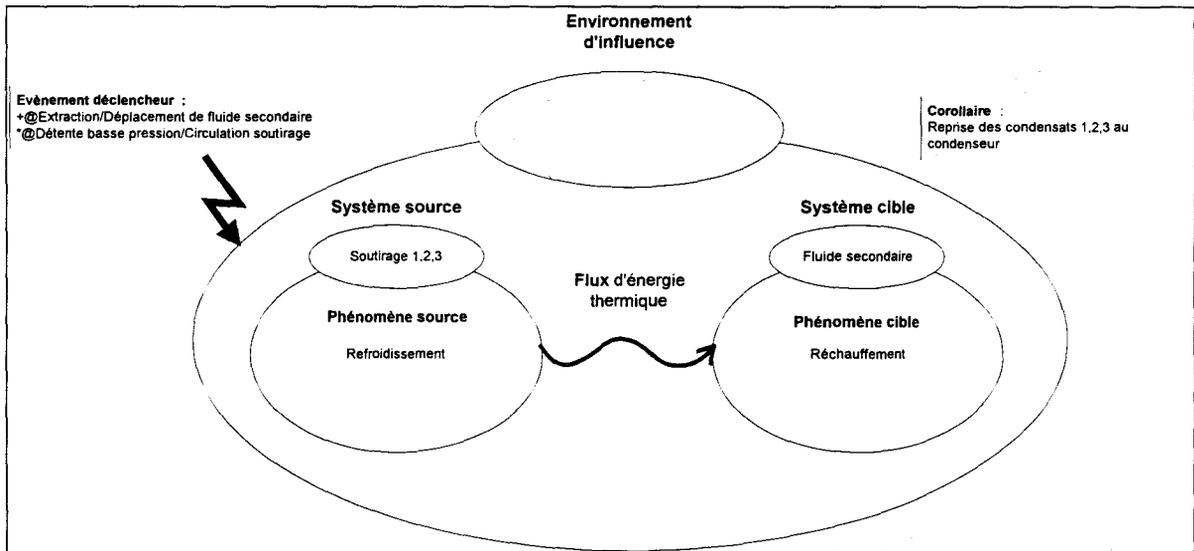


Fig. 2.26 Réchauffage 1,2,3

L'extraction force le déplacement de l'eau dans les réchauffeurs. La vapeur issue des soutirages 1, 2 et 3 circule dans les réchauffeurs et cède une partie de son énergie calorifique à l'eau. Le mélange eau-vapeur résultant de ce refroidissement est ensuite orienté vers le condenseur.

1.4.23. Stockage-Réchauffage 4

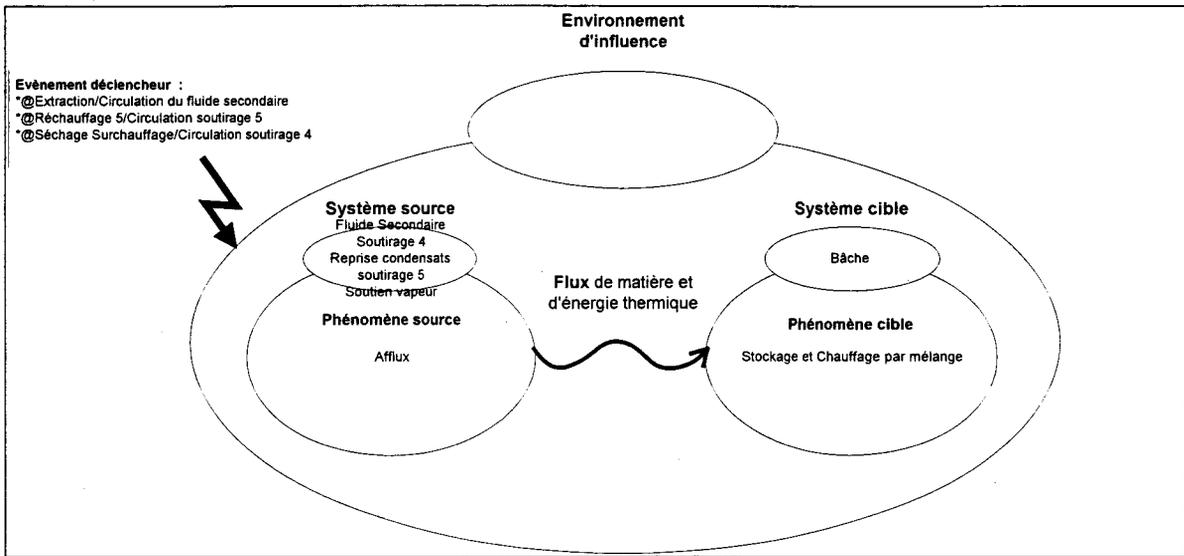


Fig. 2.27 Stockage-Réchauffage 4

C'est un processus-réservoir dont le niveau est celui de l'eau dans la bache. Le processus est le réchauffement de l'eau de la bache par mélange avec le soutirage 4.

1.4.24. Mise sous pression

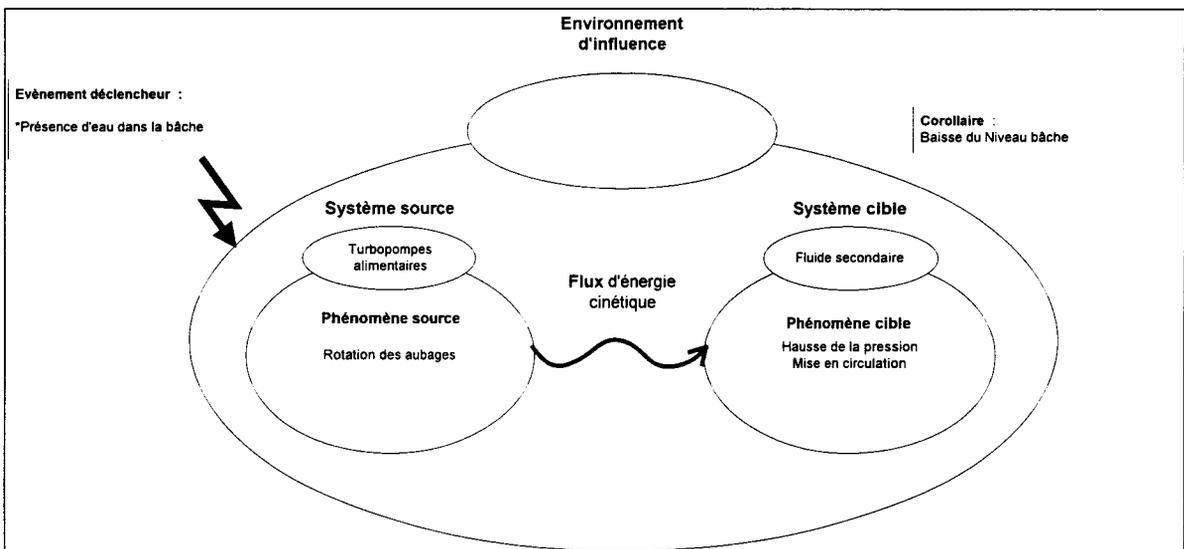


Fig. 2.28 Mise sous pression

C'est le processus qui détermine le déplacement d'eau secondaire entre la bache alimentaire et le GV. Le débit est déterminé par l'ouverture de la vanne d'alimentation. La pression est déterminée par la vitesse de rotation des turbopompes alimentaires.

### 1.4.25. Réchauffage 5

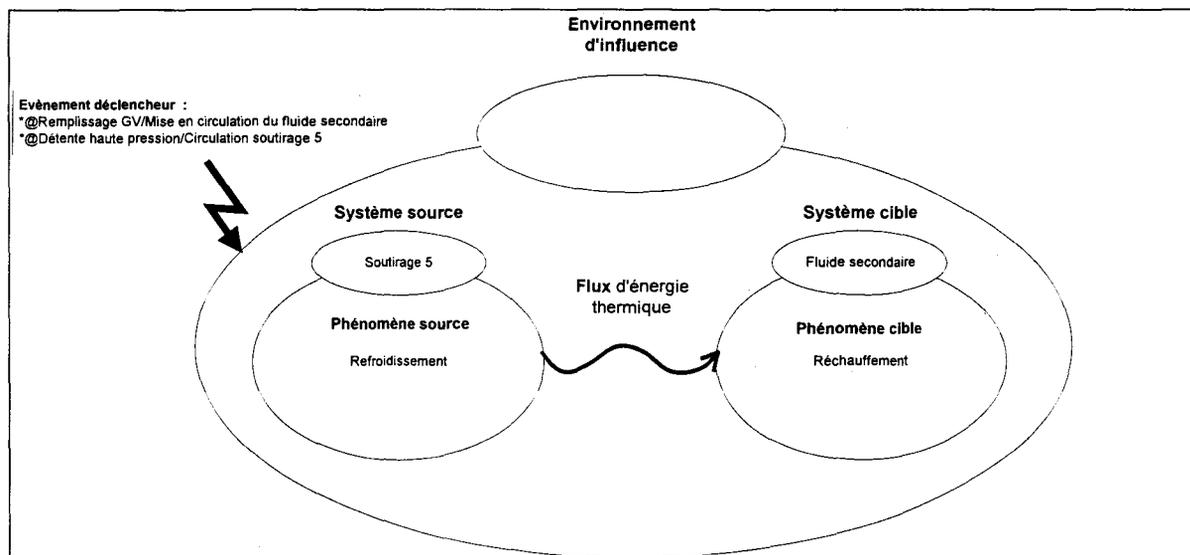


Fig. 2.29 Réchauffage 5

En passant dans le réchauffeur, la vapeur issue du soutirage cède sa chaleur au fluide primaire avant que celui-ci n'arrive au GV. Puis cette vapeur va à la bêche alimentaire.

### 1.5. Simplification du modèle qualitatif

Chaque processus forme un tout cohérent, les relations entre les processus également (Fig. 2.4 Schéma global). L'ensemble schéma global et processus qui composent le modèle qualitatif décrit bien le fonctionnement non-dégradé de la centrale.

Le modèle ainsi obtenu va servir à la validation d'un modèle numérique qui devra refléter tous les processus importants pour le pilotage. Or, dans le modèle, certains processus dont la pertinence n'était pas établie de façon sûre ont été modélisés par précaution. Il convient donc de le revoir et éventuellement de le simplifier, seuls les processus importants<sup>16</sup> pour le pilotage devant apparaître. La connaissance des phénomènes tels qu'ils sont décrits dans les processus et l'information donnée par le modèle global sur l'interaction des processus sont une grande aide pour la détermination de la pertinence des processus vis-à-vis du pilotage.

Quelques processus forment un groupe qui a un unique effet ou un unique rôle sur la centrale. La seule représentation de ce rôle ou effet sera suffisante pour le modèle numérique. Ces processus ne seront pas présentés individuellement dans le modèle numérique mais leur rôle ou effet le sera. Du point de vue du modèle numérique ils seront agrégés. La décision

d'agrégation d'un groupe de processus est liée à la connaissance de la centrale telle qu'elle est présentée dans le modèle global. L'agrégation peut aussi être liée à la simplification du modèle numérique pour atteindre le compromis vitesse/précision souhaité.

Si, à l'analyse du modèle qualitatif, un processus se révèle non-pertinent pour le pilotage, alors on peut l'éliminer. C'est le cas par exemple des processus qui ont pour rôle de maintenir constant un état de la centrale, s'ils y arrivent convenablement sans causer d'effets de bord.

Les processus suivants peuvent ainsi être agrégés ou éliminés :

- La modération des neutrons est représentée à l'échelle neutronique ainsi que l'effet sur les réservoirs de neutrons. Cela est dû au fait que ces processus ont lieu à cette échelle. La perception de ces effets à une échelle macroscopique suffit à représenter ce qui se passe au cœur de la matière. Nous considérerons l'agrégation des réservoirs *Neutrons rapides*, *Neutrons lents* et du processus *Modération des neutrons*.
- Le processus *Maintien de la pression au primaire* absorbe et corrige les variations de pression. On peut considérer que ce processus remplit sa tâche et que la pression du primaire est constante. On choisit donc d'éliminer le processus *Maintien de la pression au primaire*.
- La circulation du fluide primaire est importante pour les échanges d'énergie entre le cœur et le GV, mais on peut considérer de la même façon que ce processus n'apporte rien au pilotage. On peut donc le simplifier par élimination également. L'ensemble des processus *Détente de la vapeur issue du GV* et *Séchage-Surchauffage* correspond à des considérations techniques. On peut considérer une seule turbine ayant le rendement global de l'ensemble des trois processus. Il est alors possible d'agréger cet ensemble, considérant la modélisation d'une seule turbine.
- A la sortie de la détente basse pression, le recyclage du fluide secondaire commence. Le but de ce recyclage est de fournir de l'eau au générateur de vapeur dans des conditions de température et de pression constantes. On peut également considérer que cet ensemble de processus fonctionne correctement et que les caractéristiques de l'eau à l'entrée du GV sont constantes ; on peut alors éliminer ces processus.

---

<sup>16</sup> Un processus important pour le pilotage est un processus dont l'activation ou la non activation a une influence sur le pilotage, au contraire un processus sans importance pour le pilotage n'aura aucune influence sur le pilotage.

On note que le modèle qualitatif *est* le schéma global (Fig. 2.4) et l'ensemble des processus (Fig. 2.5-Fig. 2.29) ; les processus non pertinents peuvent en être retirés si leur absence ne nuit pas à la cohérence de l'ensemble. En revanche les autres processus et les processus agrégés ne doivent pas être retirés du modèle qualitatif afin de préserver sa cohérence. Le modèle qualitatif simplifié est le modèle qualitatif *plus* les simplifications, et non pas le modèle qualitatif *moins* les processus simplifiés.

Pour le modèle qualitatif simplifié (Fig. 2.30), on utilise les notations suivantes : en gris les processus agrégés, en hachuré les processus éliminés.

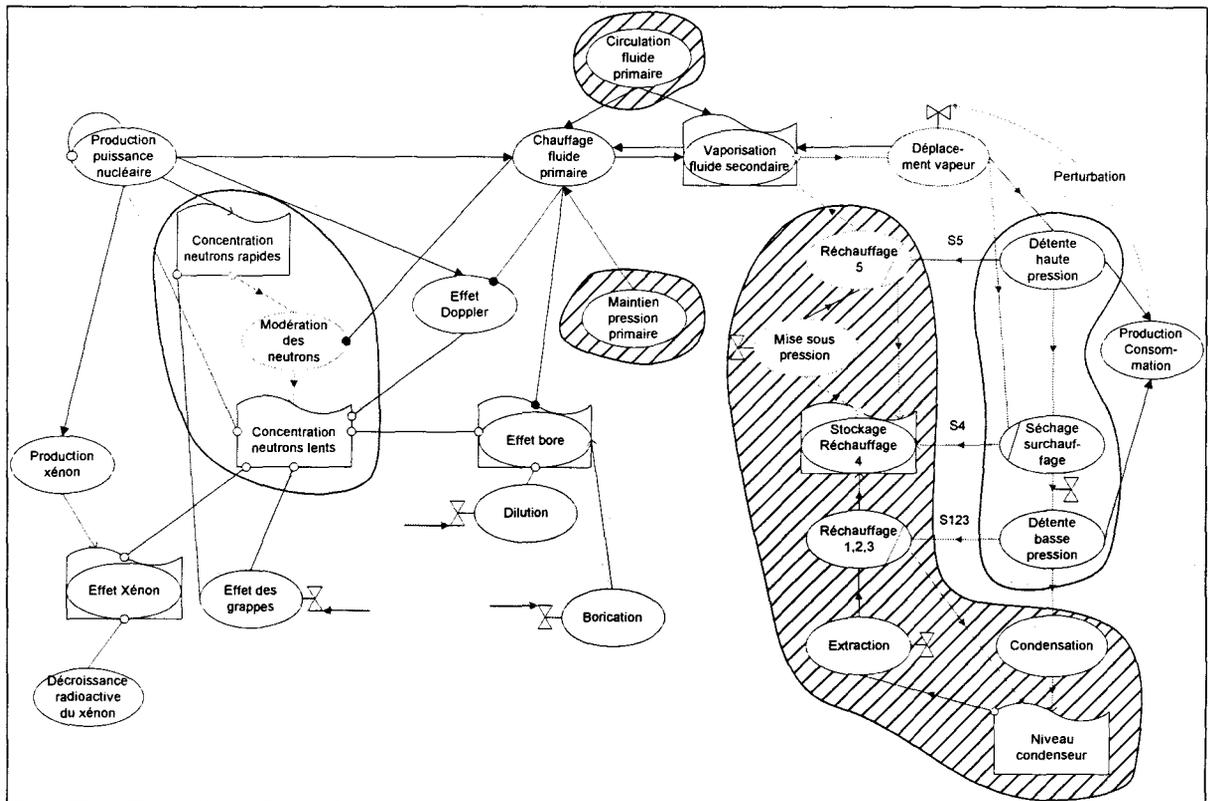


Fig. 2.30 Modèle qualitatif avec simplifications

## 1.6. Conclusions sur l'utilisation de la méthode

La méthode SCFC étant une méthode nouvelle, il est bienvenu de faire le point sur son utilisation. On considère d'abord la méthode elle-même puis le résultat auquel on a abouti.

### 1.6.1. Conclusions sur la méthode elle-même

L'utilisation de la méthode SCFC a, dans une large mesure, forcé le résultat de la décomposition en processus. En effet, l'obtention d'un schéma homogène et cohérent imposait un choix précis des éléments des processus (activité source - flux - activité cible). Les

schémas ont été réalisés en suivant les enchaînements logiques des processus. Il n'y a donc pas eu de découpage préalable en processus arbitraires, le choix du modélisateur résidant dans la détermination de la pertinence d'un processus pour le pilotage et dans la détermination des agrégats.

La présence de réservoirs et de processus-réservoirs résulte d'une réflexion orientée vers la simplicité et la bonne compréhension du résultat. Ce sont des améliorations à conserver dans les applications futures de la méthode.

Il en est de même pour la notion d'événement déclencheur qui a dû être précisée de façon qualitative (conjonction, disjonction, inhibition, etc...) pour améliorer la compréhension des phénomènes. La modélisation par la méthode SCFC est purement qualitative, et on peut regretter l'absence totale d'éléments quantitatifs qui sont non négligeables pour la compréhension. Par exemple, on pourrait croire que tous les éléments intervenant sur la population de neutrons lents le font avec la même intensité, ce qui n'est pas le cas. En annexe (Annexe 2.1), on trouve une tentative de pallier ce manque par des épaisseurs de flèches variables selon l'importance relative des effets. Cette distinction, bien que sommaire, est suffisante pour donner un ordre de grandeur. La compréhension s'en trouve améliorée. Même si l'importance des effets est variable, tant que l'ordre de grandeur ne change pas, la largeur des flèches garde tout son sens.

Sur le schéma global, les réservoirs et les processus-réservoirs avec les flèches adéquates (causalité, inhibition, remplissage, vidage) sont également des ajouts à la méthode SCFC. Tandis que la méthode SCFC s'intéresse aux processus, le schéma global permet de donner une vue d'ensemble et fait apparaître la complexité du système.

### 1.6.2. Résultat

Ce modèle ne prétend pas être complet mais pertinent du point de vue du pilotage.

Les contraintes dues à la sûreté ne sont pas apparentes dans le modèle. Par exemple la gaine n'apparaît pas, alors qu'elle est un organe de sûreté duquel découlent de nombreuses contraintes à respecter. Ceci n'affecte pas la pertinence du modèle du point de vue du pilotage. En effet, le but de cette modélisation est d'expliquer les processus physiques et leur enchaînement dans le cadre du fonctionnement non dégradé.

On considère que le modèle n'est valable qu'en mode non-dégradé et que les contraintes de sécurité sont respectées et donc transparentes. Il va de soi, cependant, que la conception d'une commande devra intégrer de telles contraintes et qu'elles devront être explicitées.

L'utilisation d'une telle méthode vis-à-vis des graphes de liaisons (bond-graphs) est justifiable pour les raisons suivantes. Les graphes de liaisons sont un outil de modélisation quantitative efficace pour décrire et simuler des systèmes linéaires. Ils peuvent faciliter la compréhension et permettre des simulations grâce aux outils qui ont été développés. Dans notre cas, les phénomènes d'une centrale nucléaire sont fortement non-linéaires. De plus nous disposons déjà de modèles quantitatifs (Lilliam<sup>17</sup>, Laura, Mistral) ; un modèle par bond-graph serait redondant. La réalisation d'un modèle selon la méthode SCFC a été préférée pour permettre la compréhension des phénomènes.

L'utilisation de la méthode SCFC a permis d'obtenir une modélisation homogène des processus qui, allée à une vue globale, permet une bonne compréhension du fonctionnement de la tranche et de son pilotage. Ce modèle a reçu l'approbation de spécialistes du pilotage de la DER.

## **2. MODELE NUMERIQUE**

Le modèle est réalisé pour l'élaboration et la mise au point du préconditionnement des valeurs de référence des variables commandées du cœur (efficacité de référence  $\eta_{ref}$ , température de référence  $T_{ref}$ ,  $\Delta I$  de référence  $\Delta I_{ref}$ ) en vue de l'amélioration du pilotage.

### **2.1. Spécifications**

Le modèle doit refléter les processus importants pour la conduite tels qu'ils ont été définis dans le modèle qualitatif avec simplifications (Fig. 2.30) et les variables importantes pour le pilotage. Celles-ci sont les variables qui représentent l'état du réacteur à savoir :

- $W_p$  : puissance fournie par le cœur
- $T_{moy}$  : température moyenne du circuit primaire
- $C_{xe}$  : concentration en xénon
- $\Delta I$  : déséquilibre axial
- $P_{osR}, P_{osG}$  : positions respectives des groupes noirs et gris
- $C_{bore}$  : concentration en bore du circuit primaire
- $W_e$  : puissance fournie par la tranche nucléaire.

---

<sup>17</sup> [Corfmat 92]

Les plans de charge classiques d'exploitation doivent pouvoir être simulés : par exemple à partir d'un fonctionnement à 100 %, des transitoires à +/-3 %/min et des paliers longs entre 100 % et 20 % de puissance.

Le modèle doit être rapide afin de permettre une optimisation des paramètres trouvés lors de la conception de la loi de commande et doit permettre d'insérer et de modifier facilement ces lois de commande.

## 2.2. Equations

De nombreux modèles de REP existent. La plupart sont des modèles de connaissance destinés à la représentation de phénomènes précis et leur manipulation n'est pas toujours aisée. Des modèles simplifiés ont été créés par le département Contrôle Commande des Centrales de la Direction des Etudes et Recherches d'EDF, ces modèles ont l'avantage de représenter l'ensemble des phénomènes des REP. C'est à partir de ces modèles simplifiés (Lilligv, Lilliam, Mistral) qu'a été construit le modèle numérique que nous utiliserons pour notre étude.

Ce modèle est bâti sur 4 équations principales représentant le transfert de la puissance depuis le cœur jusqu'à la turbine.

Une variation de la réactivité totale se traduit par des variations des réactivités partielles<sup>18</sup> :

$$\Delta\rho = \Delta\rho_{Tm} + \Delta\rho_R + \Delta\rho_G + \Delta\rho_{Bo} + \Delta\rho_{Xe} + \Delta\rho_{Do} \quad (2.1)$$

Le modèle étant un modèle aux différences, on réécrit (2.1) par souci de simplification d'écriture :

$$\rho = \rho_{Tm} + \rho_R + \rho_G + \rho_{Bo} + \rho_{Xe} + \rho_{Do} \quad (2.2)$$

Avec<sup>19</sup> :

$$\begin{aligned} \rho_{Tm} &= \alpha_M \cdot T_{moy} \\ \rho_{Do} &= \alpha_P \cdot W_P \end{aligned}$$

Après évolution et stabilisation de la puissance, la réactivité totale revient à zéro, les réactivités partielles ayant évolué.

---

<sup>18</sup> Pour la signification des variables, voir tableau en note de bas de page, page suivante

<sup>19</sup> Le facteur  $\frac{\alpha_M}{\alpha_P}$  varie selon l'usure du réacteur. Cette variation traduit à la fois l'usure du combustible et une diminution globale de la concentration en bore compensant cette usure

On déduit alors :

$$W_p = \frac{-\rho_G - \rho_R - \rho_{Bo} - \rho_{Xe}}{\alpha_p} - \frac{\alpha_M}{\alpha_p} T_{moy} \quad (2.3)$$

L'évolution de la température moyenne du fluide primaire dépend de la puissance fournie par le cœur et de la puissance fournie au générateur de vapeur<sup>20</sup> :

$$T_{moy} = \int \frac{W_p - W_{gv}}{\tau_i} dt \quad (2.4)$$

La loi d'échange de puissance au GV s'écrit en première approximation :

$$W_{gv} = K_{ech} \cdot (T_{moy} - T_v) \quad (2.5)$$

La pression au générateur de vapeur dépend de la puissance échangée au GV et du débit de vapeur quittant le GV<sup>21</sup> :

$$P_v = \int \frac{W_{gv} - Q_v}{\tau_a} dt \quad (2.6)$$

La vapeur dans le GV est saturée, le couple (P<sub>v</sub>, T<sub>v</sub>) peut être exprimé sous la forme approximative :

<sup>20</sup> Les différentes variables non-définies dans le texte sont définies dans ce tableau

Nom	Signification	Nom	Signification
a <sub>p</sub>	Coefficient de la régulation de l'ouverture de la turbine	α <sub>Xe</sub>	Coefficient de production du xénon due à la puissance
C <sub>bori</sub>	Concentration initiale en bore (ppm)	β <sub>Xe</sub>	Coefficient de mutation de l'iode en xénon
C <sub>Id</sub>	Concentration en iode (%)	γ <sub>Xe</sub>	Coefficient d'absorption des neutrons par le xénon
G <sub>Bo</sub>	Coefficient de réactivité du bore	ΔI	Déséquilibre axial de puissance (%)
G <sub>Xe</sub>	Coefficient de réactivité du xénon	ρ <sub>Bo</sub>	Réactivité due au bore (ppm)
K <sub>ech</sub>	Coefficient d'échange thermique au GV	ρ <sub>Do</sub>	Réactivité due à l'effet Doppler (ppm)
O <sub>v</sub>	Ouverture de la vanne de la turbine (%)	ρ <sub>G</sub>	Réactivité due au groupes gris (ppm)
Q <sub>bor</sub>	Débit de borication (m <sup>3</sup> /h)	ρ <sub>R</sub>	Réactivité due au groupes noirs (ppm)
Q <sub>dil</sub>	Débit de dilution (m <sup>3</sup> /h)	ρ <sub>Tm</sub>	Réactivité due à la température moyenne (ppm)
T <sub>v</sub>	Température de la vapeur du GV (°C)	ρ <sub>Xe</sub>	Réactivité due au xénon (ppm)
V <sub>prim</sub>	Volume du circuit primaire (m <sup>3</sup> )	τ <sub>a</sub>	Constante d'inertie du circuit primaire (s)
W <sub>c</sub>	Puissance consommée par le réseau (%)	τ <sub>i</sub>	Constante d'inertie du circuit primaire (s)
W <sub>gv</sub>	Puissance échangée au GV (%)	τ <sub>Id</sub>	Constante de temps de décroissance de l'iode (s)
α <sub>M</sub>	Coefficient de réactivité de la température moyenne	τ <sub>p</sub>	Coefficient de la régulation de l'ouverture de la turbine (s)
α <sub>p</sub>	Coefficient de réactivité de la puissance	τ <sub>Q</sub>	Constante de temps de la turbine (s)
α <sub>Q</sub>	Gain statique de la turbine	τ <sub>Xe</sub>	Constante de temps de décroissance du xénon (s)

<sup>21</sup> Le détail de l'obtention de cette équation est donné dans [Corfmat 92]. Les valeurs W<sub>p</sub>, W<sub>gv</sub> et Q<sub>v</sub> sont exprimées en % et sont adimensionnelles.

## Chapitre 2

$$T_v = \alpha_v \cdot P_v^{\lambda_v} + \beta_v \quad (2.7)$$

Le débit vapeur est calculé par la loi de Stodola simplifiée :

$$Q_v = k_v \cdot O_v \cdot P_v \quad (2.8)$$

Pour calculer la puissance électrique produite on prend en compte la constante de temps de la turbine :

$$\frac{W_e}{Q_v} = \frac{\alpha_Q}{1 + \tau_Q \cdot s} \quad (2.9)$$

L'ouverture de la turbine est commandée par la différence entre la puissance demandée et la puissance fournie par une régulation à avance de phase, la dynamique de la vanne étant négligée :

$$\frac{O_v}{W_c - W_e} = \frac{\tau_p \cdot s + \alpha_p}{s} \quad (2.10)$$

Les équations d'évolution du xénon sont présentées sous leur forme simplifiée :

$$\begin{cases} \dot{C}_{Id} = W_p - \tau_{Id} \cdot \dot{C}_{Id} \\ \dot{C}_{Xe} = \alpha_{Xe} \cdot W_p + \beta_{Xe} \cdot C_{Id} - \gamma_{Xe} \cdot C_{Xe} \cdot W_p - \tau_{Xe} \cdot \dot{C}_{Xe} \end{cases} \quad (2.11)$$

Les réactions de fission produisent directement de l'iode radioactif qui se transforme en xénon par mutation naturelle. Les fissions produisent également du xénon ; celui-ci disparaît soit par mutation naturelle, soit par absorption d'un neutron<sup>22</sup>.

Les opérations de dilution (remplacement du volume  $V_{dil}$  du fluide primaire par de l'eau sans bore) et de borication (remplacement du volume  $V_{bor}$  du fluide primaire par de l'eau de concentration en bore 7000 ppm) modifient la concentration en bore du circuit. Cela est modélisé par l'équation suivante<sup>23</sup> :

$$C_{bore} = C_{bori} + (7000 - C_{bori}) \frac{V_{bor}}{V_{prim}} - C_{bori} \frac{V_{dil}}{V_{prim}} \quad (2.12)$$

<sup>22</sup> En fait, seul le xénon 135 retient notre attention car c'est le seul isotope neutrophage. Qu'il mute en un autre élément ou qu'il change d'isotope suite à l'absorption d'un neutron, il perd son pouvoir neutrophage. On dit par abus de langage qu'il disparaît.

<sup>23</sup> Prendre un modèle plus juste de l'évolution de la concentration en bore n'aurait pas été très coûteux, mais c'est cette formule qui est utilisée dans le code SIROP qui sert de référence à notre étude. cf. 2.3 Différents modèles de bore existants, p. 57

On rajoute un retard pur  $T_{rB}$  de 40 s pour tenir compte du temps de transit dans les tuyaux et une fonction de transfert du premier ordre de constante de temps  $\tau_B$  de 200 s qui représente le temps d'homogénéisation dans le circuit primaire de la quantité de liquide injectée. Finalement, on peut représenter facilement l'obtention de  $C_{bore}$  par le schéma bloc suivant :

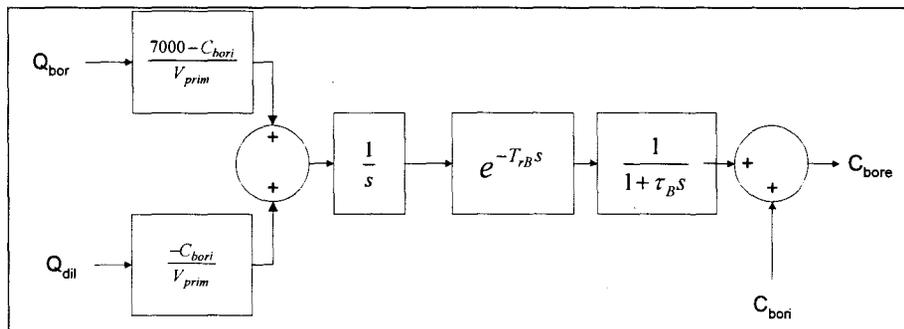


Fig. 2.31 Schéma bloc de la fonction donnant  $C_{bore}$

Il faut noter qu'il n'y a qu'un piquage sur le circuit primaire pour la borication et la dilution. La partie de tuyauterie commune à ces deux fonctions constitue un volume mort de 80 litres. La modélisation de ce volume commun sera présentée avec la régulation du bore.

Les réactivités introduites par le bore et le xénon sont calculées par :

$$\begin{aligned} \rho_{Bo} &= G_{bo} \cdot C_{bore} \\ \rho_{Xe} &= G_{Xe} \cdot C_{Xe} \end{aligned} \quad (2.13)$$

On obtient alors le modèle numérique représenté Fig. 2.32

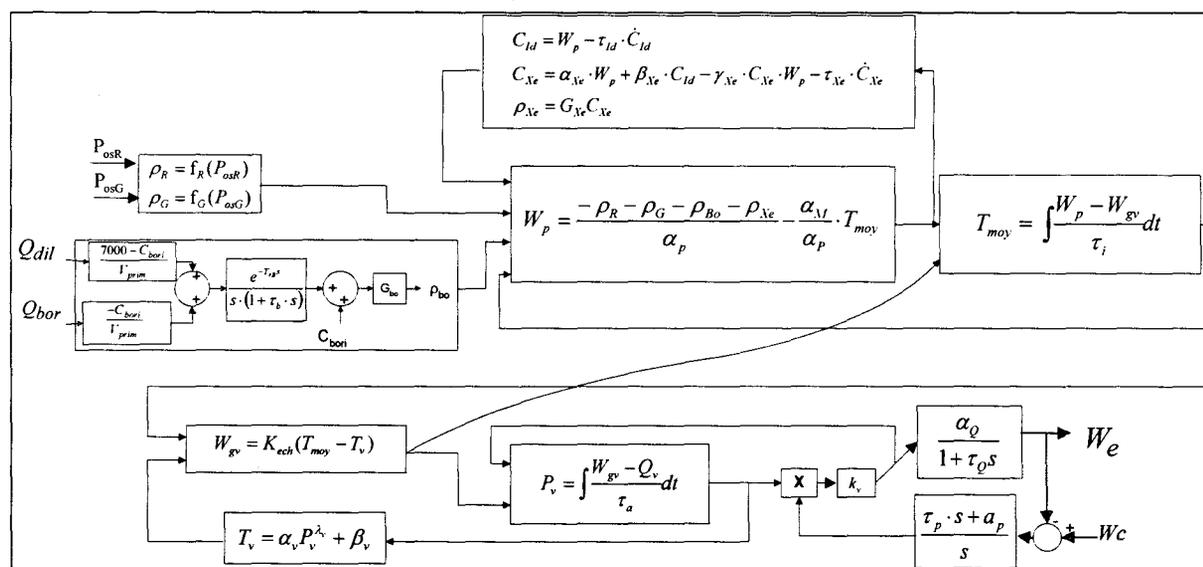


Fig. 2.32 Modèle numérique

La différence de puissance entre le haut et le bas du cœur causé par l'effet non homogène des grappes qui pénètrent dans le cœur par le haut, n'est pas représentée sur le modèle ci-dessus.

Soit :

- $\Phi_h, \Phi_b$  respectivement les flux dans le haut et dans le bas du cœur,
- $(\Phi_h + \Phi_b)_{100}$  la somme de  $\Phi_h$  et de  $\Phi_b$  à 100% de puissance.

On définit la valeur représentative de cet écart de puissance<sup>24</sup> :

$$\Delta I = \frac{\Phi_h - \Phi_b}{(\Phi_h + \Phi_b)_{100}} \quad (2.14)$$

Pour représenter le  $\Delta I$ , on utilise un modèle dit "deux cœurs" qui prend en compte l'effet non-homogène des grappes R<sup>25</sup> par une fonction tabulée de leur position et aussi la différence de concentration en xénon résultant des flux  $\Phi_h$  et  $\Phi_b$ . C'est le modèle deux cœurs qui est utilisé pour l'étude.

### 2.3. Validation qualitative<sup>26</sup>

L'ensemble des processus qui doivent être modélisés dans le modèle numérique ont été déterminés. Pour vérifier qu'ils y apparaissent bien on établit une correspondance entre les schémas qualitatifs et numériques (grandes lettres pour les processus et processus agrégés, numéros pour les liens, Fig. 2.34, Fig. 2.33). On voit que presque tous les éléments présents dans le modèle qualitatif trouvent une correspondance dans le modèle numérique. Dans certains cas, plusieurs processus sont modélisés par un seul bloc du modèle numérique. C'est le cas en particulier du bloc P. On s'aperçoit que les liens 8 et 9 sont représentés par une seule variable et que les liens 6 et 7 ainsi que le processus *Effet Doppler* n'ont pas de correspondance.

L'effet de la température du modérateur sur l'effet du bore (liens 6 et 7) n'est pas représenté ; les études montrent que le coefficient  $\alpha_M$  (variation de l'antiréactivité induite par la variation de température du modérateur contenant du bore) varie en fonction de la température et de la concentration en bore. Cette variation ne sera pas très importante à condition que la concentration en bore ne dépasse pas 2000 ppm et que la température du modérateur reste supérieure à 200°C. De telles valeurs sont atteintes lors des arrêts du cœur pour maintenance,

<sup>24</sup> Une autre valeur caractérise l'écart de puissance : l'axial offset  $AO = \Phi_h - \Phi_b$ , mais c'est le  $\Delta I$  qui est considéré ici, car c'est une valeur qui ne doit pas sortir d'un domaine relevant de la sûreté.

<sup>25</sup> Les grappes grises sont moins efficaces que les grappes noires, elles sont plus enfoncées et on considère que leur effet sur le cœur est homogène par rapport à celui des grappes noires.

ce qui sort du cadre de notre étude. Le modèle numérique est donc acceptable de ce point de vue.

L'effet Doppler n'est pas représenté directement mais le coefficient  $\alpha_M$  a été calé pour prendre en compte l'effet modérateur et l'effet Doppler.

Tous les processus importants pour le pilotage sont représentés dans le modèle numérique à l'exception de l'*Effet Doppler* et de l'influence de la variation de la température moyenne du circuit primaire sur l'effet du bore. L'effet Doppler apparaît à travers  $\alpha_M$  et les conditions de simulation préservent de grandes variations d' $\alpha_M$ . L'effet de la température sur la réactivité est réduit à la variation pondérée de la température moyenne du circuit primaire.

Le modèle est donc validé qualitativement avec les restrictions indiquées.

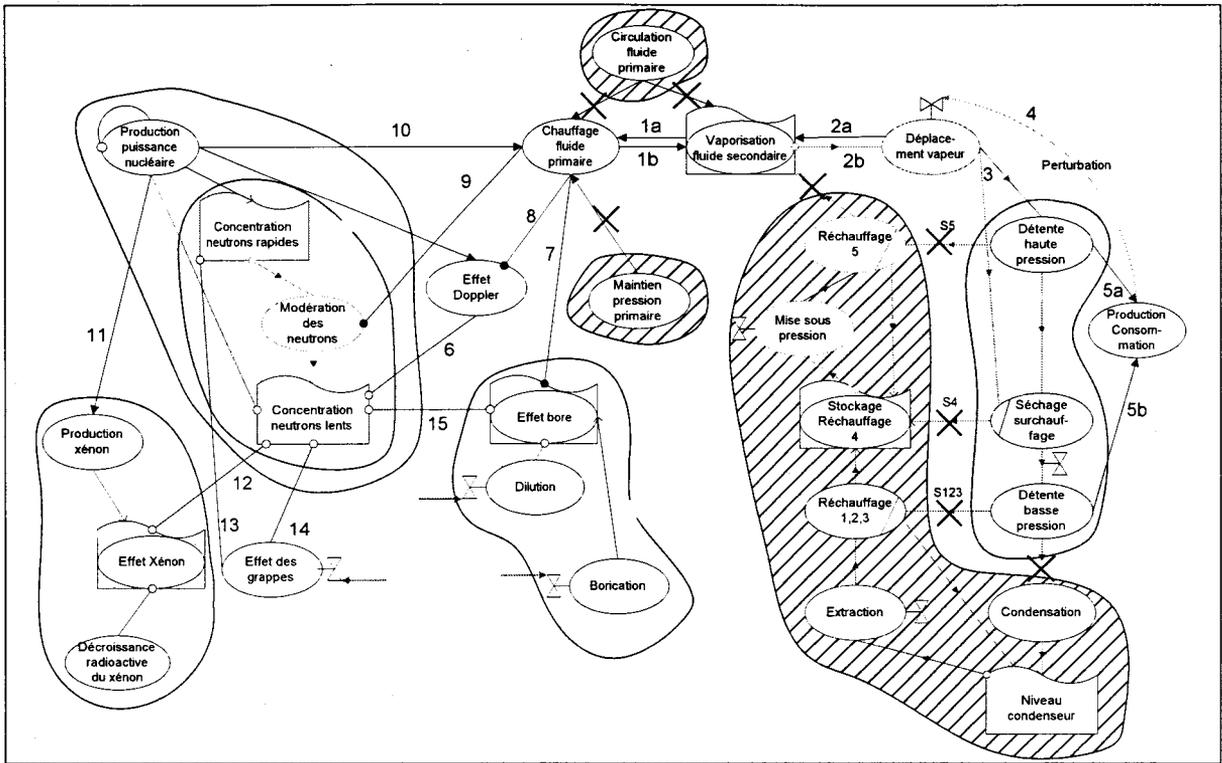


Fig. 2.33 Modèle qualitatif - Correspondance

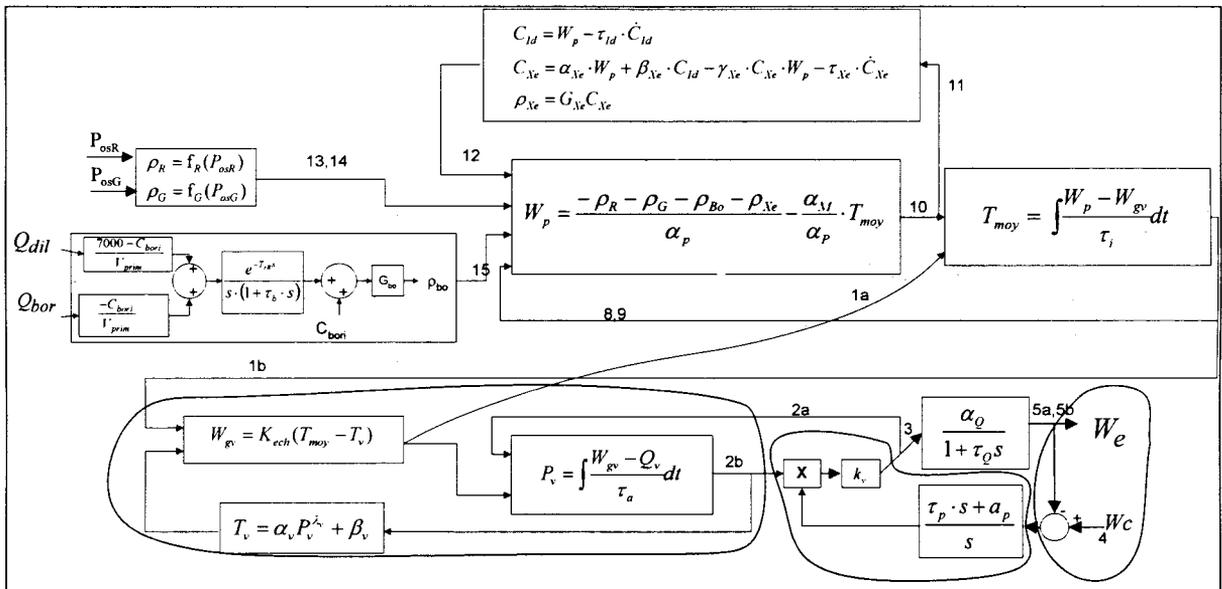


Fig. 2.34 Modèle numérique - Correspondance

### 2.4. Présentation de l'ancien et du nouveau régulateur

Le pilotage actuel des REP est dit "mode G" ([Mourlevat 93]). Le régulateur est dit « régulateur Framatome ». Il consiste en deux chaînes de régulation. La première chaîne dite « chaîne de puissance » est en boucle ouverte ; les groupes gris sont positionnés en fonction de la puissance de consigne. La deuxième chaîne dite « chaîne de température » est en boucle fermée ; les groupes noirs très efficaces sont utilisés pour contrôler  $T_{moy}$ , la température

moyenne du circuit primaire.  $T_{ref}$ , la consigne de température, est une fonction affine de la puissance (0 %, 286 °C ; 100 %, 304.5 °C). L'avantage du mode G par rapport aux modes de commande antérieurs est la mise en place des groupes à faible antiréactivité qui ont une action plus homogène sur le cœur.

Bien que les régulations de température et de puissance soient différenciées dans le mode G, les actionneurs ont un même effet sur le cœur, ils diminuent ou augmentent la réactivité. Le département Contrôle-Commande des Centrales de la DER d'EDF a conçu un régulateur multivariable robuste utilisant de façon coordonnée les grappes R et G. La consigne de puissance CP0 et les valeurs de référence des variables commandées  $T_{ref}$ ,  $\eta_{ref}$  et  $\Delta I_{ref}$  sont vues comme étant des consignes par le régulateur

La concentration en bore est capitale pour le pilotage. Bien qu'évoluant lentement, elle a un effet très homogène sur l'ensemble du cœur. Le coût induit par le traitement des effluents et la lenteur d'action du bore empêchent de n'utiliser que celui-ci. La régulation de la concentration en bore dont la consigne est fixée par les procédures de conduite est faite manuellement par les opérateurs. Aucun des deux régulateurs ne prend en compte la concentration en bore dans le circuit primaire.

## **2.5. Validation numérique**

### **2.5.1. Présentation de Laura**

Cette étude a été réalisée avec un modèle de connaissance des REP : le code Sirop, écrit en Fortran et développé à EDF. L'avantage du code Sirop par rapport aux autres codes est de regrouper des codes de calculs précis des différents éléments de la centrale (bonne représentativité locale) et d'offrir également une bonne représentativité globale.

Il existe pour Sirop une interface Laura qui permet d'inclure dans le code des régulations issues de schémas SIMULINK. Nous utilisons Laura pour transposer toutes les régulations élaborées avec le modèle pour le pilotage sur le code Sirop.

Comme en centrale, il n'existe pas de régulateur de la concentration en bore dans Sirop. La procédure habituelle consiste à écrire un fichier de borication-dilution avant la simulation.

Le poste d'eau n'étant pas très intéressant pour une étude sur le pilotage<sup>27</sup>, nous utilisons le modèle Sirop sans poste d'eau.

### 2.5.2. Validation numérique

Pour valider le modèle, deux scénarios caractéristiques ([Millerat 95]) des sollicitations classiques des centrales nucléaires ont été choisis. Partant d'une situation stable à 100%<sup>28</sup> de la charge nominale, un premier palier est fait à 95% de la puissance nominale suivi par un autre palier à 50% ou à 20%, avec finalement une remontée de charge jusqu'à 95%, tous les changements de puissance étant effectués à 3 %/min.

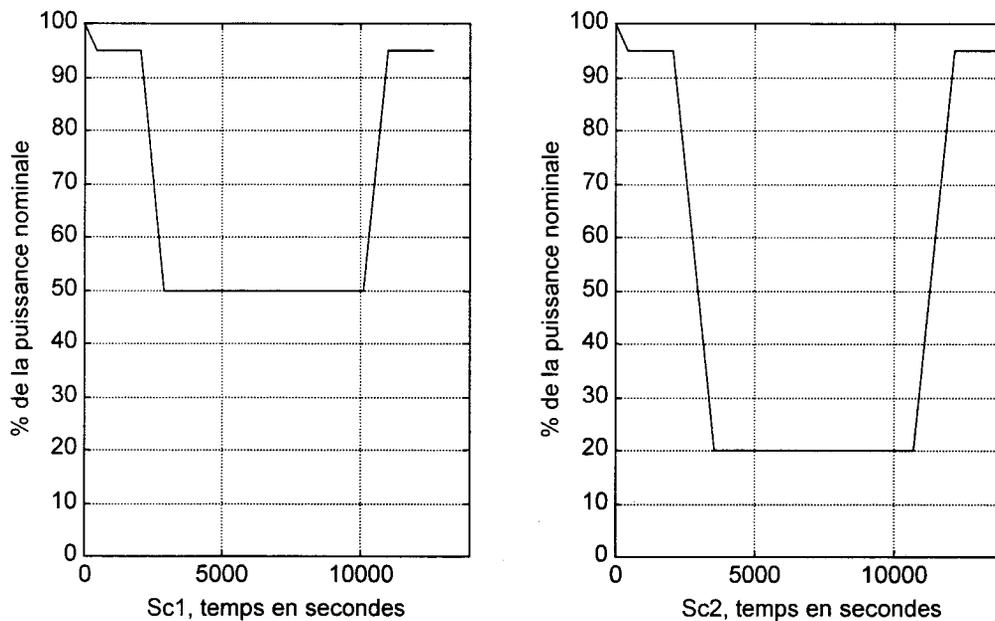


Fig. 2.35 Les scénarios tests Sc1 et Sc2

On compare les résultats obtenus avec le modèle numérique et le code Laura.

<sup>27</sup> cf. 1.5 *Simplification du modèle qualitatif*, p.31.

<sup>28</sup> Tous les nombres en % concernant la puissance s'entendent en % de la puissance nominale.

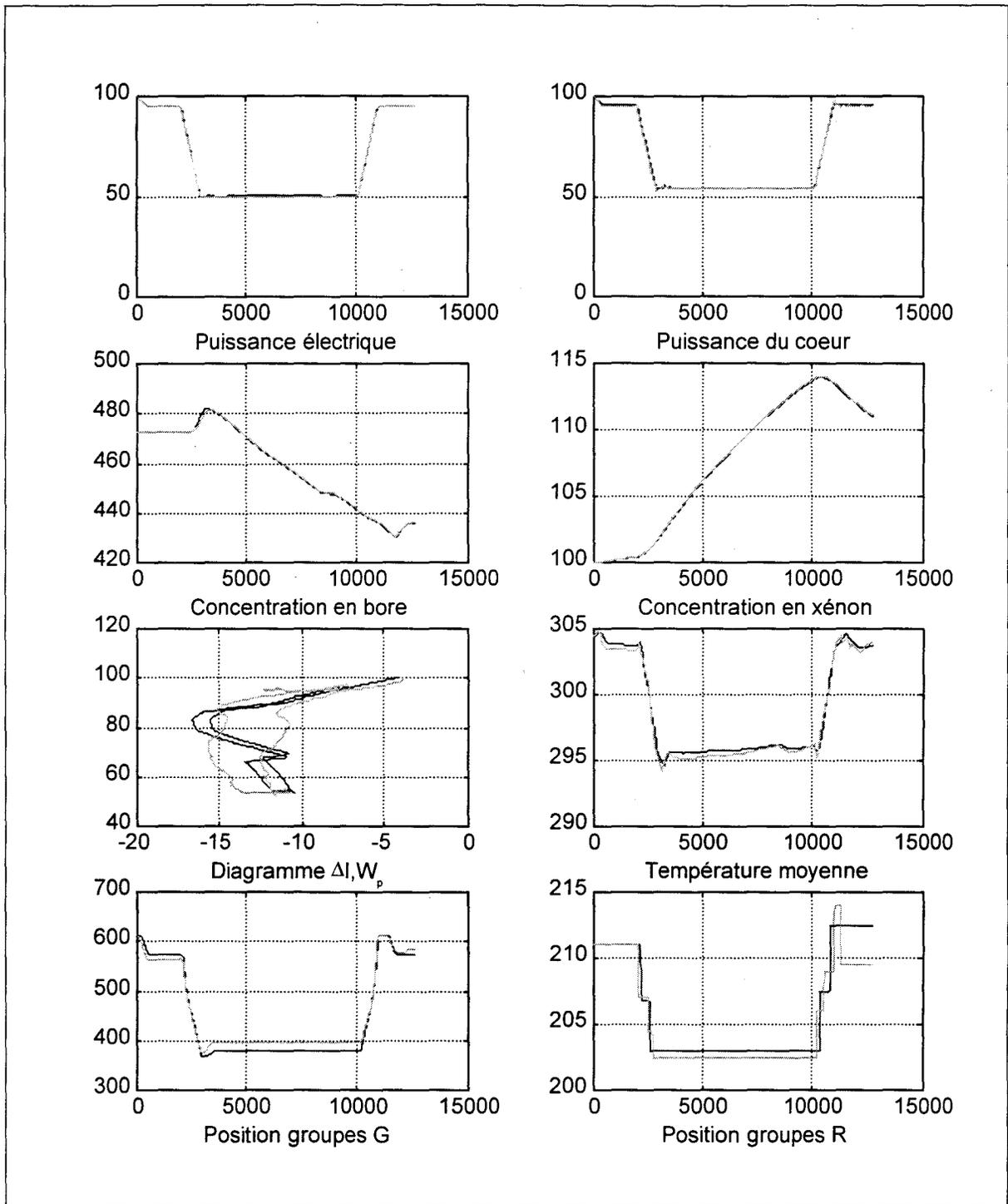


Fig. 2.36 Comparaison des valeurs prises par le modèle numérique (foncé) et le code SIROP (clair) pour le scénario Sc1

Tableau 2-I Comparaison du modèle pour le pilotage et de SIROP pour le scénario 1

Nom de la variable	Description	Erreur Moyenne	Erreur Max.
$C_{\text{bore}}$	Concentration en bore	0.32 ppm	2.2 ppm
$C_{\text{xe}}$	Concentration en xénon	0.068 %	0.11 %
$\Delta I$	Déséquilibre axial de puissance	1.7 %	4.8%
$T_{\text{moy}}$	Température moyenne du circuit primaire	0.3 °C	1.0°C
$P_{\text{osG}}$	Position des groupes G	13 pas	22 pas
$P_{\text{osR}}$	Position des groupes R	0.81 pas	4 pas
$W_p$	Puissance fournie par le cœur	0.63%	2.8%
$W_e$	Puissance électrique	0.078%	0.67%

L'ensemble des valeurs du modèle numérique reste proche de celui des valeurs issues de SIROP. Pour la position des groupes R, on remarque une différence de comportement après 10 000 s (env. 3 heures). Elle s'explique par le fait que les positions prises par les groupes sont discrètes, elles sont régies dans le régulateur par des non linéarités de type seuil, zone morte, hystérésis ; une petite différence en sortie de la partie linéaire du régulateur peut causer des déplacements plus ou moins importants des grappes. Cette différence ne remet donc pas en cause la qualité du modèle.

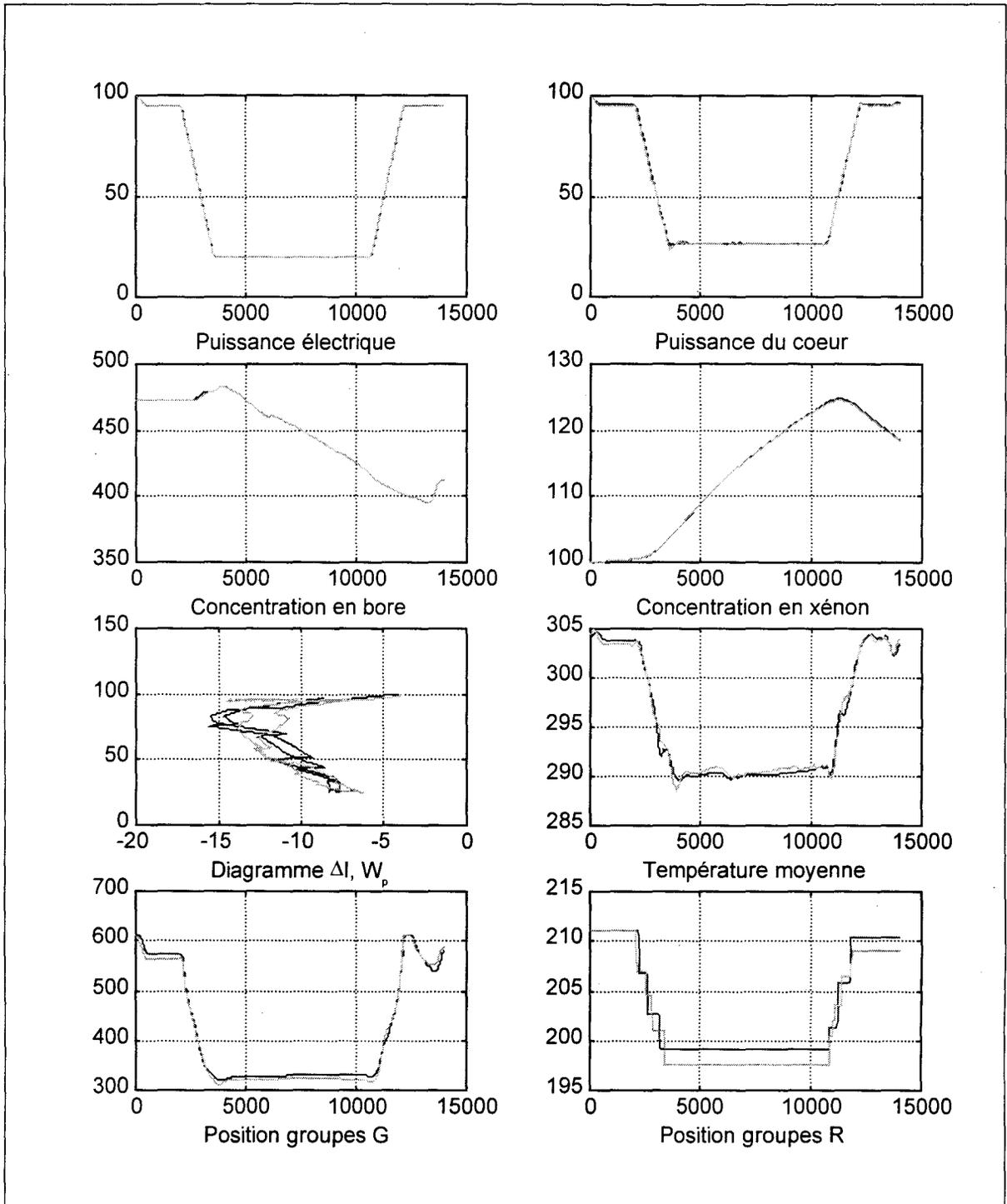


Fig. 2.37 Comparaison des valeurs prises par le modèle numérique (foncé) et le code SIROP (clair) pour le scénario Sc2

Tableau 2-II Comparaison du modèle pour le pilotage et de SIROP pour le scénario deux

Nom de la variable	Description	Erreur Moyenne	Erreur Max.
$C_{\text{bore}}$	Concentration en bore	0.09 ppm	2.5 ppm
$C_{\text{Xe}}$	Concentration en xénon	0.094 %	0.24 %
$\Delta I$	Déséquilibre axial de puissance	1.3 %	5.4%
$T_{\text{moy}}$	Température moyenne du circuit primaire	0.41°C	1.8°C
$P_{\text{osG}}$	Position des groupes G	6.7 pas	23 pas
$P_{\text{osR}}$	Position des groupes R	1.3 pas	4 pas
$W_p$	Puissance fournie par le cœur	0.53%	2.6%
$W_e$	Puissance électrique	0.11%	0.67%

Avec des erreurs moyennes inférieures à un pour cent des valeurs prises par SIROP pour six des huit variables pour le premier scénario, le modèle répond au besoin exprimé. Pour les groupes G une erreur moyenne de 3% n'est pas négligeable mais acceptable.

Dans le cas du deuxième scénario, les résultats sont moins bons. Avec un palier à 20% de puissance, ce scénario approche la limite de validité de SIROP qui, étant un modèle généraliste, ne reproduit pas les phénomènes observables à basse charge. Les écarts qui se produisent en cas de palier bas, tenant compte de l'incertitude de SIROP, restent acceptables.

Malgré une bonne représentation du xénon et de l'enfoncement des barres, le  $\Delta I$  n'est pas bien représenté par le modèle. C'est un phénomène difficile à représenter par un simple modèle "deux cœurs". Une amélioration ne peut être obtenue sans un coût important en calcul et donc en temps de simulation. Malgré l'écart, les deux valeurs évoluent dans une même zone du diagramme.

Le modèle pour le pilotage codé en Simulink permet de simuler depuis Matlab avec l'accélérateur de Simulink un scénario de 14 000 s (env. 4 heures) en 24 s sur une UltraSparc 1 (580 fois plus rapide).

Cette précision et cette rapidité valident le modèle pour le pilotage. En effet, celui-ci rend possible l'obtention de valeurs précises en un temps très court par rapport à la réalité et au code SIROP qui tourne seulement deux fois plus vite que la réalité sur une UltraSparc 1.

## **2.6. Conclusion**

Le modèle numérique correspond au modèle recherché pour cette étude. Il possède de bonnes qualités de représentativité des phénomènes importants pour le pilotage (position des grappes, concentration en bore, concentration en xénon, puissance fournie, température moyenne) malgré une faiblesse dans la représentation du  $\Delta I$ . Sa vitesse est un atout remarquable puisqu'elle permet d'effectuer des optimisations généralement coûteuses en temps de calcul. Son codage sous Simulink en fait un modèle facile à utiliser et aisément modifiable.

## **CONCLUSION**

Afin de déterminer les processus devant faire partie d'un modèle numérique de la centrale, un modèle qualitatif a été réalisé. Celui-ci est composé d'un schéma global décrivant les interrelations des processus et de l'ensemble des processus décrits selon la méthode SCFC. Ce modèle qualitatif a été simplifié afin de mettre en évidence les processus importants pour le pilotage. Un modèle numérique a été réalisé. Une correspondance entre les processus du modèle qualitatif simplifié et les équations du modèle numérique valide qualitativement le modèle numérique. Une comparaison quantitative a été effectuée avec le code SIROP qui sert de référence à notre étude. Le modèle numérique montre de bonnes performances en précision et en rapidité.

## *Chapitre 2*

# **CHAPITRE 3 :**

## **AMELIORATION DES PERFORMANCES**

### **INTRODUCTION**

L'ensemble des actionneurs du cœur (grappes et bore) agit de façon à ce que la centrale produise la puissance qui lui est demandée. Ces actionneurs, bien qu'ils aient un effet semblable sur la réactivité, ont des effets différents les uns des autres sur l'état du cœur. Une des difficultés du pilotage consiste à choisir avec soin l'actionneur à utiliser pour que les variables qui caractérisent l'état du cœur soient proches de leurs valeurs de référence et restent dans leur domaine d'évolution admissible garantissant ainsi la sécurité et la longévité de la centrale. Ces variables sont les variables commandées du cœur. Dans l'état actuel des régulations implantées dans les centrales, ces références sont des fonctions affines ou affines par morceaux de la puissance. Les progrès de l'automatique et de l'informatique industrielle permettent aujourd'hui la conception et l'implantation de lois de commande beaucoup moins rudimentaires. Alors que les régulateurs encore en fonction actuellement sont basés sur une technologie capable de générer des segments de droite et de gérer des systèmes monovariables en boucle fermée ou ouverte, le régulateur robuste conçu par la DER est multivariable. Il prend en compte non seulement la puissance mais aussi les variables commandées et leur référence. La mise en place de nouvelles références coordonnées entre elles peut apporter une amélioration du pilotage. Au cours de ce chapitre, ces variables seront présentées avec leur domaine d'évolution. Puis sera présentée une fonction permettant de déterminer les références. Afin d'optimiser les paramètres de cette fonction, une méthode d'optimisation sera proposée.

### **1. VARIABLES COMMANDEES DE LA CENTRALE**

On peut classer les variables commandées en deux catégories : les variables du circuit primaire et celles du circuit secondaire

## 1.1. Variables commandées du circuit primaire

### 1.1.1. Température moyenne du circuit primaire

On mesure la puissance fournie par le cœur par la mesure de la différence de température de l'eau entre son entrée dans le cœur et sa sortie. La détermination de la moyenne de ces deux valeurs est un élément important pour la sûreté et la longévité de la centrale : une température trop élevée pourrait causer une ébullition du fluide dans le cœur qui pourrait entraîner la fonte des gaines contenant le combustible ; une température trop faible pourrait causer des fatigues du matériel, une mauvaise qualité de vapeur au GV et un pic de puissance dans le bas du cœur à cause de l'effet modérateur. La référence actuelle est une droite contrairement à celle utilisée en Allemagne (Fig. 3.1).

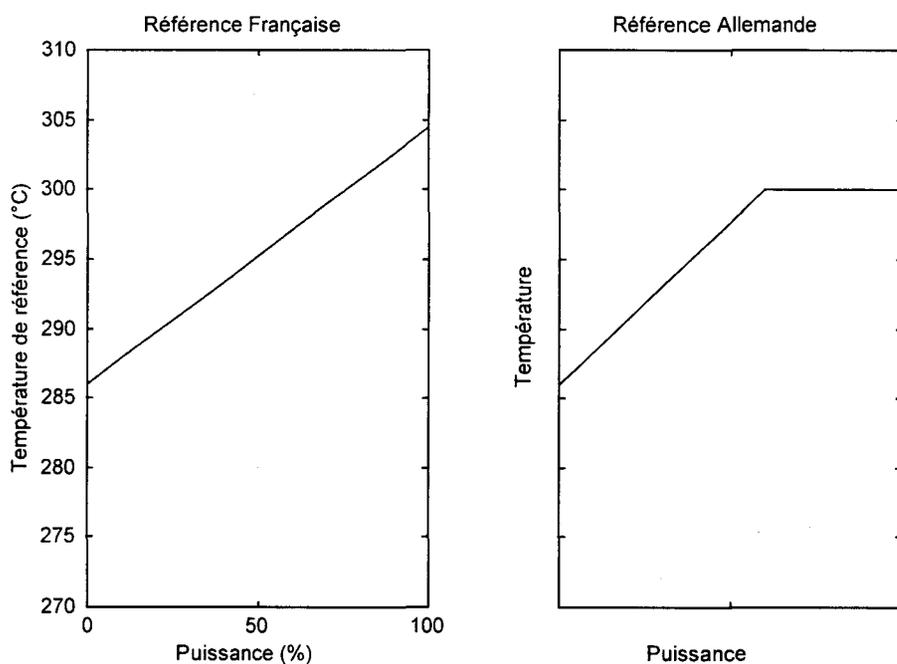


Fig. 3.1 Différents programmes de température

Des études dans le domaine de la température moyenne ([Alexandre 94],[Saillard 96]) ont mené à la considération d'un domaine admissible plus grand qui sera pris comme hypothèse de travail pour cette étude (Fig. 3.2).

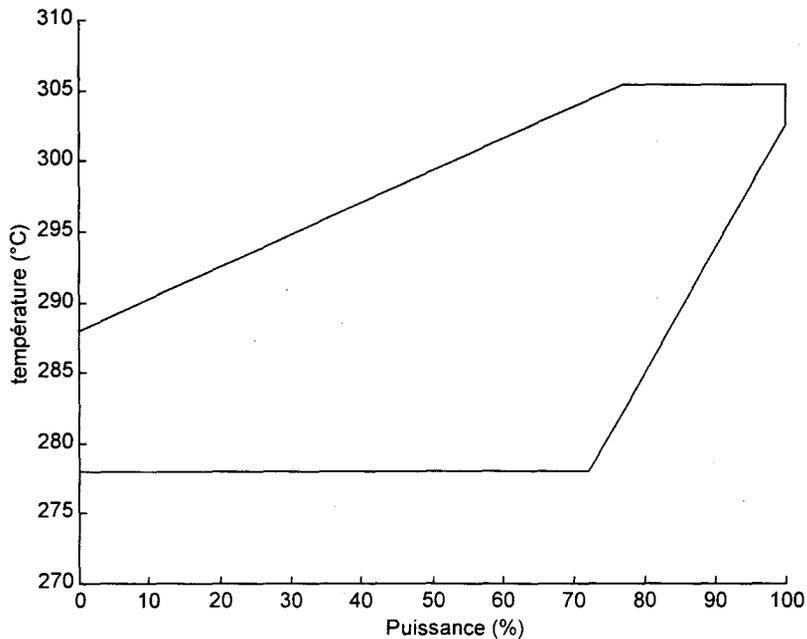


Fig. 3.2 Domaine étendu de température

### 1.1.2. Déséquilibre axial

L'effet non homogène des grappes qui pénètrent dans le cœur par le haut, ainsi que l'effet non homogène du modérateur plus froid à l'entrée qu'à la sortie du cœur, conduit à une production inégale de puissance dans le cœur. Plusieurs critères sont imposés pour la sûreté de la centrale :

- la non ébullition de l'eau ;
- la non fusion du combustible ;
- le respect des critères de sécurité liés à l'accident de référence<sup>29</sup>.

Des études ont montré que ces critères sont respectés quand le déséquilibre axial  $\Delta I$  reste dans le diagramme présenté ci-dessous (Fig. 3.3). Dans ce diagramme, deux références ont été établies, le  $\Delta I_{ref1}$  et le  $\Delta I_{ref2}$  (plus récent), c'est ce dernier qui sera pris comme référence existante.

---

<sup>29</sup> L'accident de référence consiste en la rupture d'une tuyauterie du circuit primaire, privant ainsi le cœur de tout ou partie de son réfrigérant. Voir *Technique de l'ingénieur Génie Nucléaire, Sûreté des réacteurs, Accidents, B 3 820-7*

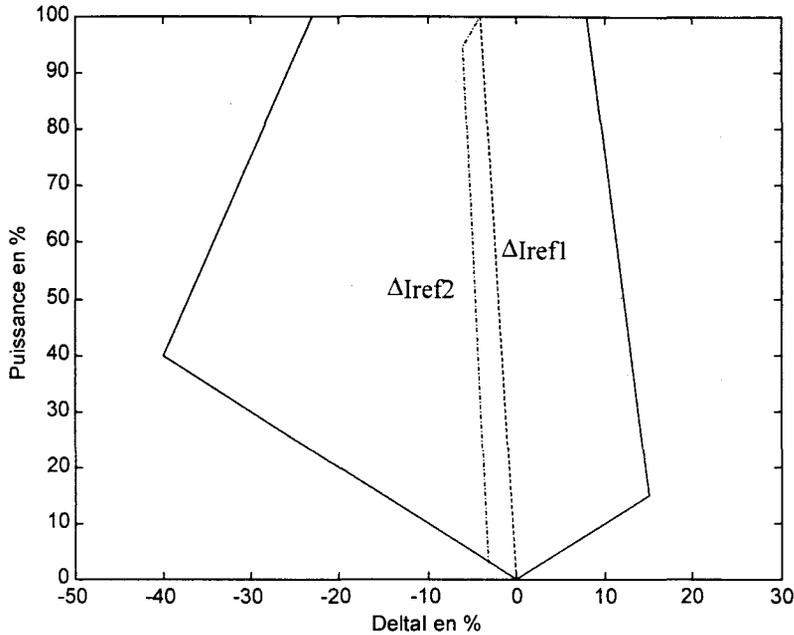


Fig. 3.3 Domaine autorisé du  $\Delta I$

Ce domaine sera repris intégralement pour cette étude.

### 1.1.3. Efficacité des grappes

Afin de disposer d'une réserve d'antiréactivité suffisante pour éteindre le cœur en cas de problème, les grappes doivent rester au-delà de la limite de sûreté (LS). Afin de pouvoir à une brusque augmentation de la puissance de consigne, les grappes doivent rester en deçà de la limite de retour instantané en puissance (RIP). On appellera "efficacité des grappes" l'antiréactivité qu'elles introduisent dans le cœur et on la notera  $\eta$ .

Dans les centrales les groupes R et G ont leurs propres limites. Pour notre étude nous considérons l'efficacité et les limites globales en sommant les efficacités et les limites des groupes R et G. La référence actuelle consiste en la somme des efficacités des positions du groupe G selon la puissance<sup>30</sup> et des positions du groupe R placé au milieu de son domaine d'évolution admissible.

---

<sup>30</sup> Dans le régulateur actuel, les groupes G sont régulés en boucle ouverte sur la puissance.

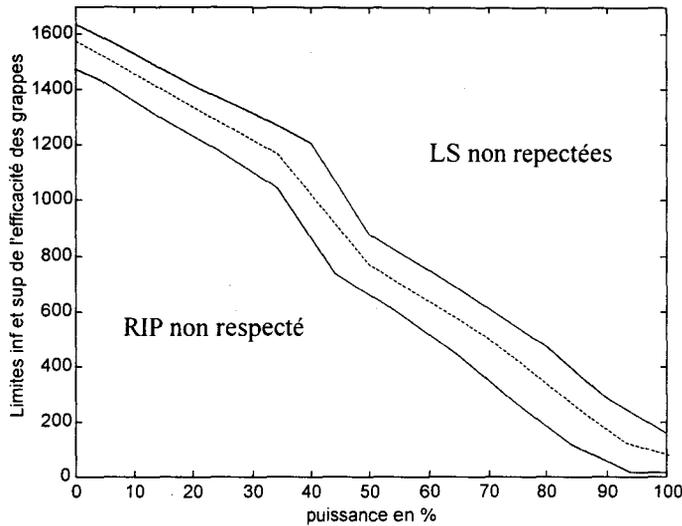


Fig. 3.4 Domaine de l'efficacité cumulée des groupes R et G

#### 1.1.4. Concentration en bore

Contrairement aux autres variables commandées du circuit primaire, il n'existe pas de référence pour la concentration en bore qui soit fonction de la puissance. Les opérateurs de conduite régulent manuellement la concentration en bore selon les procédures de conduite et l'état de la centrale. En dehors de phases d'utilisation particulières (arrêt, démarrage), il n'y a pas de contrainte particulière limitant la concentration en bore. Cette concentration n'est pas prise en compte par le nouveau régulateur.

#### 1.2. Variables commandées du circuit secondaire

Le modèle qualitatif global présente trois réservoirs dans le circuit secondaire (générateur de vapeur, bache alimentaire, condenseur). Bien que leurs niveaux (variables commandées) représentent des quantités d'énergie disponibles et éventuellement utilisables pour contribuer à la poursuite de la consigne de puissance, cette étude ne les a pas prises en compte. En effet cette réserve d'énergie reste minimale et son utilisation peut difficilement être considérée sans changer les régulateurs qui n'ont pas été conçus pour fonctionner en poursuite.

## 2. REGULATION DE LA CONCENTRATION EN BORE<sup>31</sup>

### 2.1. Introduction

Des automates de borication-dilution ont été conçus à la DER<sup>32</sup>. Ces automates sont basés sur une régulation logique selon l'état du cœur et ne sont pas prévus pour poursuivre une consigne de concentration en bore. Prévus pour fonctionner avec le régulateur Framatome, ils n'offrent aucune garantie de fonctionnement avec le nouveau régulateur. On a donc dû faire l'étude d'un régulateur de la concentration en bore qui fonctionne pour les deux régulateurs.

La gestion de la concentration en bore implique l'élaboration d'une consigne et d'un régulateur pour atteindre cette consigne. Ces deux points seront abordés dans cet ordre au cours de ce sous-chapitre.

### 2.2. Elaboration de la concentration en bore de référence

L'équation qui gère la puissance du cœur s'écrit :

$$W_p = \frac{-\rho_G - \rho_R - \rho_{Bo} - \rho_{Xe}}{\alpha_p} - \frac{\alpha_M}{\alpha_p} T_{moy} \quad (3.1)$$

Considérant que le régulateur multivariable est parfait ( $\rho_G + \rho_R = \eta_{ref}$ ,  $T_{moy} = T_{ref}$ ,  $W_p = W_{ref}$ ), on peut écrire :

$$W_{ref} = \frac{-\eta_{ref} - \rho_{Bo} - \rho_{Xe}}{\alpha_p} - \frac{\alpha_M}{\alpha_p} T_{ref} \quad (3.2)$$

Le xénon résulte du flux nucléaire et donc de la puissance de référence. Il est donc imposé par  $P_{ref}(t)$  et est déterminable à l'avance.

Donc toutes ces valeurs sont fixées sauf  $\rho_{Bo}$ . On peut exprimer cette valeur en fonction de toutes les autres :

$$\rho_{Bo} = -\eta_{ref} - \rho_{Xe} - \alpha_p W_{ref} - \alpha_M T_{ref} \quad (3.3)$$

à partir de cette valeur déterminer la concentration en bore de référence.

Cette concentration en bore de référence comporte de nombreux avantages :

---

<sup>31</sup> [Bodini 97],[Bodini 98A]

<sup>32</sup> [Beolet 89],[Tyran 90]

- Même si le régulateur multivariable n'est pas parfait, le bore va fournir le complément de réactivité (ou d'antiréactivité) nécessaire pour que toutes les réactivités partielles correspondant aux références puissent être atteintes.
- Comme  $P_{ref}(t)$  est connu à l'avance, les valeurs de référence le sont aussi. La réactivité partielle du xénon est fonction de  $P_{ref}$ , elle est donc connue à l'avance. A partir de ces valeurs, on détermine à l'avance la concentration en bore de référence. Il est donc possible de faire une régulation prédictive de la concentration en bore.

## 2.3. Différents modèles de bore existants

### 2.3.1. Equation de base

Soit un réservoir contenant un volume  $V_{prim}$  de liquide de concentration en bore  $C_{bore}$ . L'injection d'un volume  $\Delta V$  de liquide de concentration  $C_{borinj}$  provoque le retrait du même volume de liquide et se traduit de façon suivante :

$$V_{prim} \cdot \Delta C_{bore} = -\Delta V \cdot C_{bore} + \Delta V \cdot C_{borinj} \quad (3.4)$$

Soit en variation :

$$V_{prim} \cdot dC_{bore} = -dV \cdot C_{bore} + dV \cdot C_{borinj} \quad (3.5)$$

La modélisation du bore est basée sur cette équation dans la plupart des modèles incluant le circuit primaire (Lilliam, Mistral, Sirop, ...).

### 2.3.2. Modèle de bore dans Laura

Le modèle de bore dans Laura repose sur la formule précédente avec une solution linéarisée.

Soient :  $Q = dV/dt$ , le débit de liquide ajouté,

$C_{bori}$ , la concentration en bore initiale dans le volume  $V_{prim}$ .

$$V_{prim} \frac{dC_{bore}}{dt} = Q \cdot (C_{borinj} - C_{bore}) \quad (3.6)$$

En considérant  $Q$ ,  $V_{prim}$  et  $C_{borinj}$  constants, cette équation a pour solution :

$$C_{bore}(t) = e^{-\frac{Q \cdot t}{V_{prim}}} (C_{bori} - C_{borinj}) + C_{borinj} \quad (3.7)$$

Il faut noter que l'intégration de (3.6) suppose une homogénéisation instantanée de la concentration en bore. Cette hypothèse est justifiable vu les dynamiques du système.

En supposant  $Q \cdot t < V_{prim}$ , (3.7) devient :

$$C_{bore}(t) - C_{bori} = (C_{borinj} - C_{bori}) \frac{Q \cdot t}{V_{prim}} \quad (3.8)$$

En utilisant (3.8) pour traduire l'ajout de liquide de concentration  $C_{borinj}=7\ 000$  ppm dans le circuit primaire, on obtient , en notant  $Q_{bor}$  le débit de bore<sup>33</sup> :

$$C_{bore}(t) = (7000 - C_{bori}) \frac{Q_{bor} \cdot t}{V_{prim}} + C_{bori} \quad (3.9)$$

En utilisant (3.8) pour traduire l'ajout d'eau  $C_{borinj}=0$  ppm dans le circuit primaire, on obtient, en notant  $Q_{dil}$  le débit d'eau :

$$C_{bore}(t) = -C_{bori} \frac{Q_{dil} \cdot t}{V_{prim}} + C_{bori} \quad (3.10)$$

La concentration de bore calculée d'après la (3.10) présente une erreur de 5% après une dilution de 20 m<sup>3</sup> par rapport à l'expression exacte (3.7). Cette dérive peut devenir non négligeable dans le temps. La suite de l'étude se base sur (3.8) puisque cette formule permet de calculer la concentration en bore  $C_{bore}$  dans Laura.

En traduisant (3.9) et (3.10) sous la forme de schémas-blocs (transformée de Laplace), on obtient :

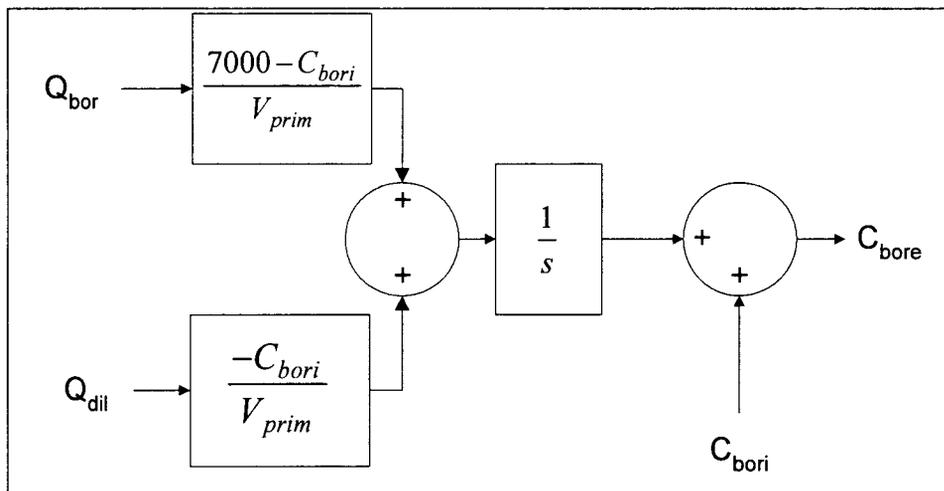


Fig. 3.5 Schéma bloc des opérations de dilution et de borication sous Laura

<sup>33</sup> On emploiera, par abus de langage, le terme *bore* pour désigner le liquide borié à 7000 ppm par opposition au terme *eau* qui désigne le liquide non borié.

Pour tenir compte des retards sur les lignes de borication et de dilution, un retard pur de  $T_{rL}=40$  s est ajouté. Un filtre du premier ordre de constante de temps d'homogénéisation  $\tau_L=200$ s est également rajouté pour tenir compte du délai observé entre l'opération proprement dite et son effet sur le cœur. On obtient alors le schéma Fig. 3.6

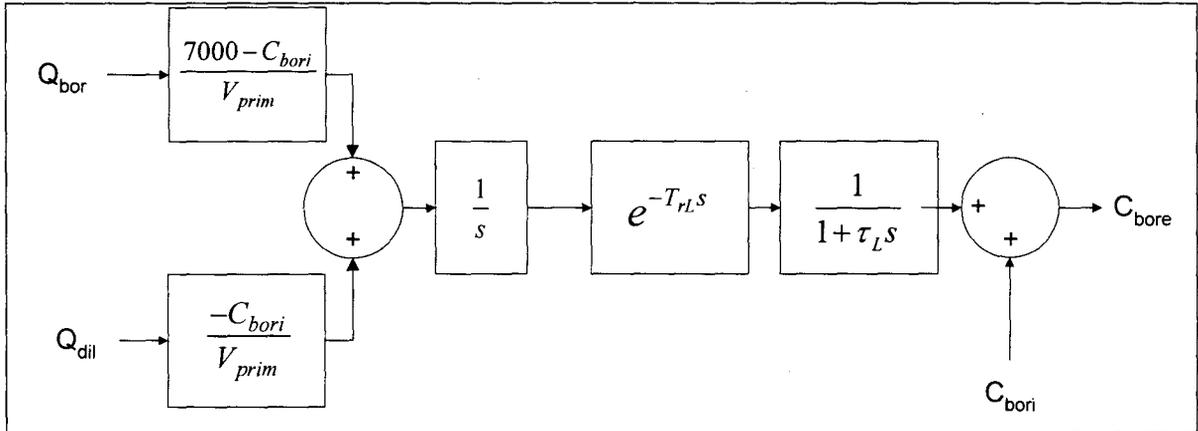


Fig. 3.6 Schéma bloc du codage du bore sous Laura

### 2.3.3. Volume mort

Les circuits de borication et de dilution se rejoignent sur un même tuyau avant la connexion au circuit primaire. Ce tuyau constitue un volume mort handicapant en cas de changement d'opération. Par exemple pour diluer après une borication, le volume mort est rempli de liquide venant de la bache (c'est le "bouchon de bore"). Avant que l'eau ne pénètre dans le circuit primaire, 80 litres d'eau borée y seront injectés. Pour compenser cette action il faut injecter environ 800 litres d'eau supplémentaires. La modélisation du volume mort est faite par un sous-programme équivalent au schéma bloc suivant (le bloc central représente un intégrateur saturé entre une valeur min. et une valeur max.) :

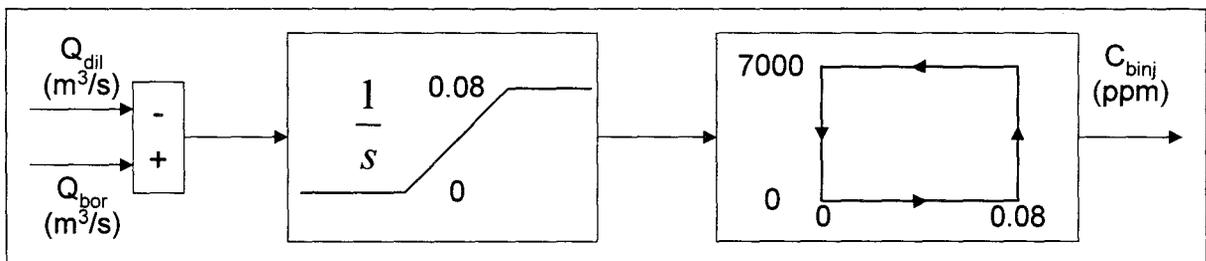


Fig. 3.7 Modélisation du bouchon de bore

L'effet dû au volume mort n'est visible qu'au moment des changements d'opération. Pour simplifier les schémas, la modélisation du volume mort ne sera pas représentée par la suite.

## 2.4. Choix d'une régulation

### 2.4.1. Cahier des charges

Le traitement des effluents étant coûteux, ceux-ci doivent être aussi faibles que possible. Par conséquent les changements d'opération (borication, dilution) entraînant de nombreux effluents dus à l'évacuation et à la compensation du volume mort devront être évités autant que possible.

Les concentrations en xénon et en bore étant connues, la régulation de la concentration en bore devra être capable de compenser l'effet xénon sur un palier à 50%, le cœur étant initialement stabilisé à 100% de puissance en début de simulation.

### 2.4.2. Détermination de la régulation

Par le plan de charge, on connaît au moins 12 heures à l'avance et aux kΔF et NPr près, quelle sera la sollicitation de la centrale. On pourra donc anticiper la consigne et même prévoir la concentration en bore désirée  $C_{borc}$  dont on aura besoin. La formule (3.8) permet de déterminer le volume de bore ou d'eau à injecter pour atteindre une concentration désirée. En fait, on peut utiliser cette formule à chaque pas de calcul en affectant la valeur de la concentration moyenne instantanée  $C_{binst}$  à  $C_{bori}$ . Les volumes de bore ( $V_{bor}$ ) ou d'eau ( $V_{dil}$ ) peuvent être ainsi calculés à chaque pas de calcul. Les débits  $Q_{dil}$  et  $Q_{bor}$  sont déduits de ces valeurs.

- si  $C_{borc} < C_{binst}$ , alors  $V_{dil} = (C_{borc} - C_{binst}) * V_{prim} / (-C_{binst})$ ,  $V_{bor} = 0$ , (3.11)

- si  $C_{borc} > C_{binst}$ , alors  $V_{bor} = (C_{borc} - C_{binst}) * V_{prim} / (C_{bâche} - C_{binst})$ ,  $V_{dil} = 0$ . (3.12)

Ces deux formules sont deux lois non linéaires de commande. Remplacer  $C_{bori}$  par  $C_{binst}$  revient à fermer une boucle de rétroaction sur la commande ; entre  $C_{borc}$  et  $C_{binst}$  apparaît alors une fonction de transfert du premier ordre (à la non-linéarité de la loi de commande près) de constante de temps un pas de calcul. Le volume de liquide à injecter pour obtenir une concentration désirée est définie par la formule (3.8) de façon unique à partir de la connaissance de la concentration instantanée moyenne  $C_{binst}$ . Ce volume est donc le volume minimal. Si  $C_{borc}$  est monotone et si la différence entre  $C_{binst}$  et  $C_{borc}$  est de signe constant alors il n'y a pas de changement de l'opération en cours. Ceci est garanti par la fonction de transfert du premier ordre entre  $C_{borc}$  et  $C_{binst}$ .

A cause du retard pur de 40 s il est impossible d'avoir une bonne observation de  $C_{binst}$  à partir de la concentration en bore du circuit  $C_{bore}$ . Pour estimer cet état, on utilisera un modèle interne.

Le bouclage après l'intégrateur (fig. 3.8 pour obtenir  $C_{binst}$ ) n'est pas classique pour les commandes à modèle interne ([De Larminat]). Celles-ci prennent pour la rétroaction la sortie du modèle (ici  $C_{borem}$ ) et non un état intermédiaire ( $C_{binst}$ ). Ces méthodes à modèle interne, à part la commande par prédicteur de Smith, ne conviennent pas dans notre cas en raison du retard pur important. La particularité de la commande par prédicteur de Smith est de boucler le circuit avant le retard pur du modèle interne ; en assimilant le premier ordre de notre modèle à un retard, il est possible de comparer le régulateur à un prédicteur de Smith.

Le pas de calcul étant d'une seconde, on peut injecter à chaque itération le volume calculé ( $Q_{dil}=V_{dil}/\Delta t=V_{dil} \text{ m}^3/\text{s}=V_{dil} * 3600 \text{ m}^3/\text{h}$ ). On a donc deux lois non linéaires pour déterminer la commande (une pour le bore et une pour la dilution), celles-ci étant exclusives l'une par rapport à l'autre puisque l'utilisation de l'une ou de l'autre dépend du signe de  $C_{borc}-C_{binst}$ . Ces lois de commande sont représentées figure 3.8.

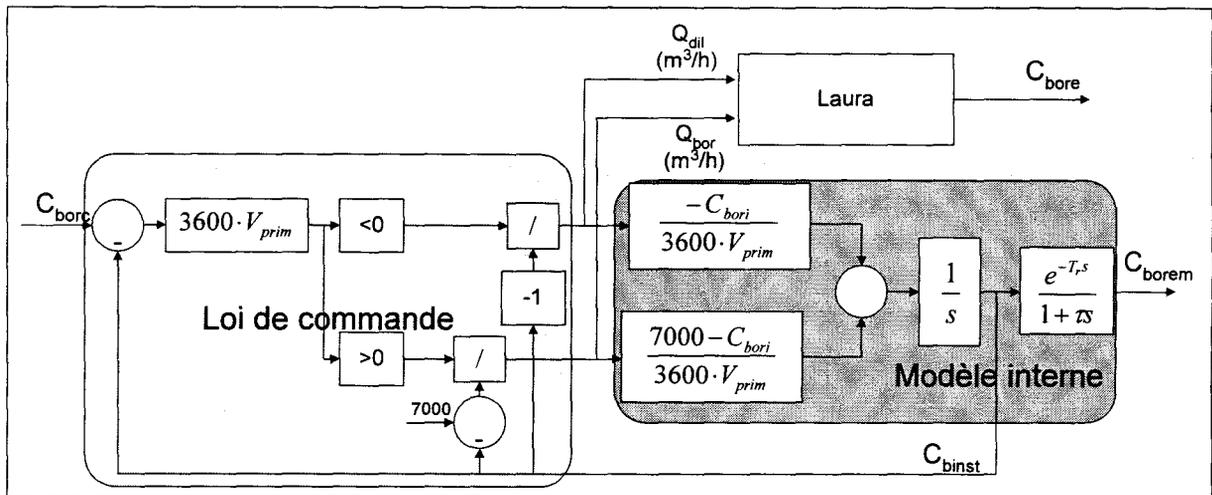


Fig. 3.8 Régulation du bore avec modèle interne

Considérant que la concentration en bore désirée  $C_{borc}$  varie lentement par rapport à la vitesse du système, on peut accepter l'hypothèse qu'elle est à chaque instant équivalente à sa tangente sur un horizon grand par rapport à la dynamique du système. Or la réponse d'un premier ordre à une rampe en régime "permanent" est en retard, par rapport à cette rampe, d'un temps égal à la constante de temps. Ici, après l'intégrateur, il y a un retard pur suivi d'un premier ordre ; le retard de la réponse d'un tel système à une rampe est la somme du retard pur et de la constante de temps, soit 240 s dans notre cas. Avec l'hypothèse d'approximation de  $C_{borc}$  en

tout point par sa tangente, en injectant le juste volume de bore ou d'eau à l'instant  $t$ , la concentration désirée sera atteinte à  $t+240$  s. Ainsi en injectant par avance juste ce qui est nécessaire, on obtiendra plus tard avec précision la concentration désirée en créant le moins possible d'effluents. Les essais ont confirmé ces hypothèses de travail.

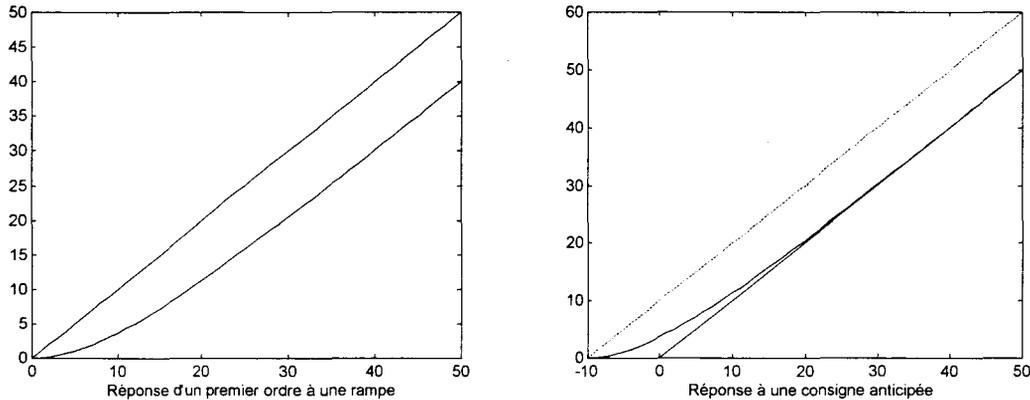


Fig. 3.9 Anticipation de la consigne en rampe pour un système du premier ordre

Pour le volume mort, en cas de changement d'opération (par exemple : passage de la borication à la dilution), tant que le volume mort n'est pas purgé, la concentration en bore instantanée s'éloigne du point de consigne en augmentant et  $Q_{dil}$  croît rapidement jusqu'à saturation ( $9 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Le volume mort est donc évacué au maximum du débit permis. Cependant la compensation du volume mort peut prendre du temps. Considérons les deux cas les plus défavorables :

- A  $C_{\text{bore}}=200$  ppm (valeur faible en fonctionnement normal) : pour compenser le bouchon de bore qui cause un accroissement transitoire de  $C_{\text{bore}}$  de 2,7 ppm, il faut injecter 2,7 m<sup>3</sup> d'eau. Au total, l'évacuation du volume mort et sa compensation prendront 370 s.
- A  $C_{\text{bore}}=1\ 200$  ppm (valeur élevée en fonctionnement normal) : pour compenser le bouchon d'eau qui provoque une diminution transitoire de  $C_{\text{bore}}$  de 0,47 ppm, il faut injecter 16 litres d'eau. Au total, l'évacuation du volume mort et sa compensation prendront 12,8 s.

Le bouchon de bore est beaucoup plus gênant que le bouchon d'eau par le volume d'effluents générés et par la durée de compensation.

La gestion du bouchon de bore peut se faire selon deux méthodes au moins.

La première méthode est la plus difficile à mettre en pratique. Connaissant la concentration en bore à un instant donné, on sait quelle concentration on atteindra si on injecte le volume mort dans le circuit. Si celle-ci correspond au futur extremum local de la concentration en bore de

consigne, alors il suffit de "pousser" le volume mort avec de l'eau ou du bore selon l'état de la ligne. Ainsi le phénomène de bouchon disparaît. La difficulté de cette méthode est de connaître le futur extremum de  $C_{borc}$ . Pour une compensation du xénon par le bore, il est difficile de situer l'extremum, car la dynamique du xénon et donc celle de la concentration en bore est très lente. Dans un scénario où tous les points de consigne et en particulier  $C_{borc}(t)$  sont connus à l'avance, cette méthode est applicable. Elle est toutefois très contraignante et peu réalisable en pratique. Elle est testée à titre d'exemple sur un scénario (cf. Fig. 3.13, p.69 ; Tableau 4-II Résultats du scénario 2, p.103, Pilotage *Mult fra Bor auto bb*).

La deuxième méthode consiste à "pousser" par de l'eau chaque action de borication (borication ponctuelle). Ainsi il n'y a jamais de bouchon de bore, mais des bouchons d'eau peu gênants. Cette méthode n'étant pas compatible avec une borication continue, nous ne l'appliquerons pas.

La première méthode ne pouvant être facilement mise en pratique, la seconde étant incompatible avec notre mode de borication, l'optimisation se fera sans gestion du bouchon de bore. Cependant, pour voir quel est l'apport de la gestion du bouchon de bore, la première méthode sera mise en œuvre sur un scénario optimisé.

Il faut noter que Laura tient compte des imperfections des actionneurs (pertes de charge, non-linéarité des vannes ...) ; celles-ci peuvent être considérées comme des perturbations sur la commande. A cause de ces perturbations, le modèle interne de la commande dérive. Il est donc nécessaire de placer une deuxième boucle de rétroaction.

Nous avons tenté dans un premier temps de recalibrer l'intégrateur du modèle interne. Cette approche a l'inconvénient de créer des couplages déstabilisants puisque l'intégrateur intervient dans le calcul de la commande. Ainsi le recalage de  $C_{binst}$  peut faire changer le signe de la différence entre  $C_{borc}$  et  $C_{binst}$  et ainsi provoquer un changement d'opération générateur de nombreux effluents. Cette solution est donc à proscrire. Il est préférable d'effectuer une action correctrice sur les débits  $Q_{dil}$  et  $Q_{bor}$  en cours, de façon à ce que le système suive le modèle (Fig. 3.10) En corrigeant le débit et au pire en l'annulant, on exerce une action correctrice sur le système sans changer l'opération en cours et donc sans problème de perturbation dû au volume mort. Ces actions correctrices sont modélisées par les gains  $K_{bd}$  pour la dilution et  $K_{bb}$  pour la borication. Ces gains sont automatiquement annulés si le débit qu'ils corrigent n'est pas positif. Ainsi la deuxième boucle de rétroaction n'a d'effet que sur l'opération en cours.

Il est nécessaire de s'assurer que les gains  $K_{bb}$  et  $K_{bd}$  dans les boucles de rétroaction sur la commande ne déstabilisent pas le système.

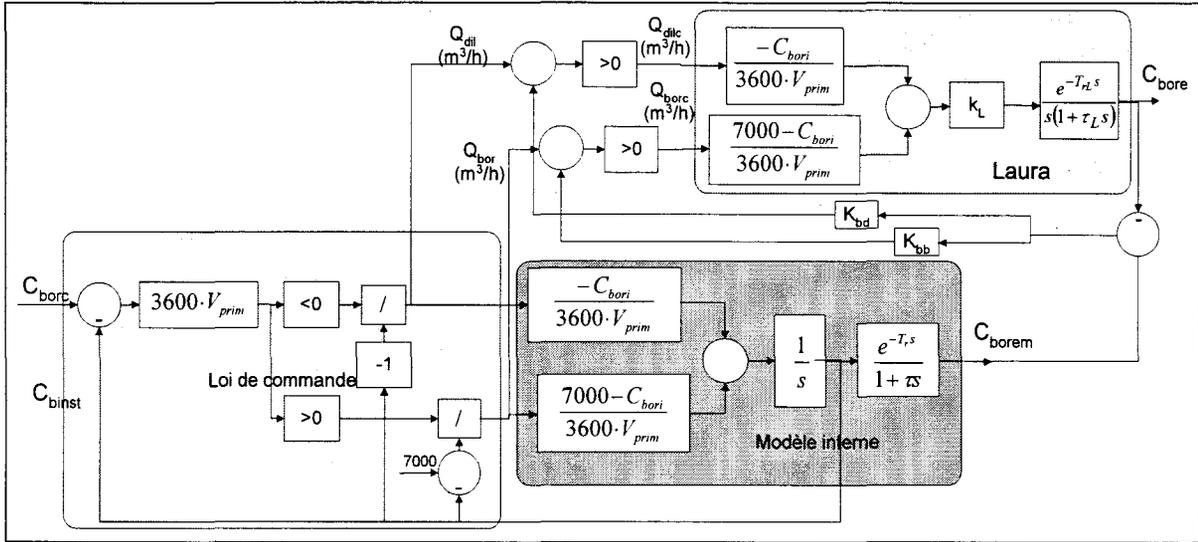


Fig. 3.10 Boucle de rétroaction sur les commandes de dilution et de borication

De façon à étudier la stabilité de ce régulateur, on linéarise<sup>34</sup> l'ensemble en représentant les non-linéarités par des gains dans la loi de commande ( $K_{sb}$  pour la borication,  $K_{sd}$  pour la dilution) et on vérifie que la stabilité est assurée pour l'ensemble des valeurs qui peuvent être prises par ces gains.

$$K_{sb} = \frac{7000 - C_{bori}}{7000 - C_{binst}}, K_{sd} = \frac{-C_{bori}}{-C_{binst}} \quad (3.13)$$

Avec  $C_{bori}$  et  $C_{binst}$  compris entre 200 et 1200 ppm, on obtient :

$$\begin{aligned} 0.96 &\leq K_{sb} \leq 1.3 \\ 0.4 &\leq K_{sd} \leq 2.4 \end{aligned} \quad (3.14)$$

La perturbation sur les actionneurs est représentée par un gain  $k_L$  proche de 1. Les lois de commande sont simplifiées en une seule loi de commande avec un gain unique  $K_s$  qui représente les gains  $K_{sb}$  et  $K_{sd}$ . De même, la deuxième boucle de rétroaction est représentée de façon simplifiée avec un gain unique  $K_b$  qui représente les gains  $K_{bb}$  et  $K_{bd}$ .

34 Cf. Annexe 3

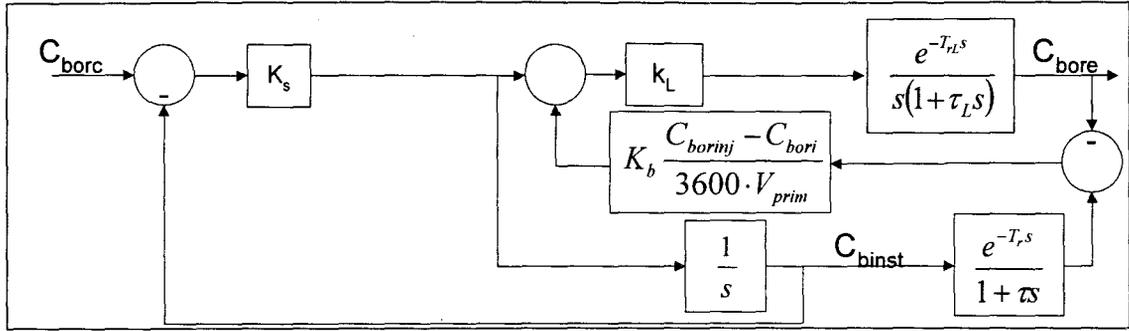


Fig. 3.11 Etude de stabilité : Modèle linéarisé

La fonction de transfert de ce modèle linéarisé est :

$$\frac{C_{bore}(s)}{C_{borc}(s)} = \frac{e^{-T_L s} \cdot k_L \cdot \left( s + \tau \cdot s^2 + K_b \cdot \frac{C_{borinj} - C_{bori}}{3600 \cdot V_{prim}} \cdot e^{-T_r s} \right)}{\left( 1 + \frac{s}{K_s} \right) (1 + \tau \cdot s) \left( s + \tau_L s^2 + k_L \cdot K_b \cdot \frac{C_{borinj} - C_{bori}}{3600 \cdot V_{prim}} \cdot e^{-T_r s} \right)} \quad (3.15)$$

Soit, si le modèle est exact :

$$\frac{C_{bore}(s)}{C_{borc}(s)} = \frac{e^{-T_L s}}{\left( 1 + \frac{s}{K_s} \right) (1 + \tau \cdot s)} \quad (3.16)$$

Dans cette dernière équation, la constante de temps  $1/K_s$  est très petite devant  $\tau$ . Le numérateur de (3.15) comporte deux termes stables et un terme comprenant un retard pur. Pour s'assurer de sa stabilité, on emploiera la méthode directe de Walton et Marshall ([Walton 87]).

Cette méthode consiste à associer à l'équation caractéristique d'un système à retard un polynôme monovarié obtenu après élimination des termes exponentiels entre l'équation caractéristique et sa relation conjuguée. Le comportement du lieu des racines au voisinage des pôles critiques du système peut être déduit de ce polynôme.

On ne considérera ici que l'application de cette méthode aux systèmes admettant une équation caractéristique de la forme :

$$p(s, T) = n(s) + c \cdot e^{-Ts} \quad (3.17)$$

où  $n(s)$  est un polynôme à coefficients réels et  $c$  une constante réelle. Pour déterminer la limite de stabilité, il faut chercher les racines de (3.17) qui sont sur l'axe imaginaire. L'équation caractéristique est à coefficients réels. Donc si  $s$  est une racine de (3.17), alors son conjugué  $\text{conj}(s)$  l'est aussi. Puisque pour les nombres imaginaires purs  $\text{conj}(s) = -s$ , s'il existe des racines caractéristiques situées sur l'axe imaginaire, alors elles vérifient le système :

### Chapitre 3

$$\begin{cases} n(s) + c \cdot e^{-T \cdot s} = 0 \\ n(-s) + c \cdot e^{T \cdot s} = 0 \end{cases} \quad (3.18)$$

et par élimination de  $e^{Ts}$ , elles sont aussi solutions de l'équation

$$n(s)n(-s) - c^2 = 0 \quad (3.19)$$

Réciproquement, si  $\omega_0$  vérifie  $w(\omega_0^2)=0$  où  $w$  est le polynôme en  $\omega^2$  défini par :

$$w(\omega^2) = n(j\omega)n(-j\omega) - c^2 \quad (3.20)$$

alors  $s=j\omega_0$  et  $s=-j\omega_0$  sont des racines caractéristiques du système (3.17) pour des retards  $T$  vérifiant l'égalité :

$$e^{-j\omega_0 T} = -\frac{n(j\omega_0)}{c} \quad (3.21)$$

Connaissant  $T$ , on trouve  $\omega_0$  qui amène le système en limite de stabilité. On déduit alors le gain de retour critique pour la stabilité.

Pour  $\tau s^2 + s + Ke^{-Trs}$ , on trouve la limite de stabilité pour les valeurs suivantes

$$\begin{cases} \arctan\left(-\frac{1}{\tau \cdot \omega_0}\right) + \omega_0 \cdot T_r = 0 \\ K = \frac{\sqrt{(2\tau^2 \omega_0^2 + 1)^2 - 1}}{2\tau} \end{cases} \quad (3.22)$$

Connaissant  $T_r$  et  $\tau$  on déduit  $\omega$  de la première équation de (3.22) et  $K$  de la deuxième. Pour  $\tau=200$  et  $T_r=40$  on trouve  $w_0=0.01081$  et  $K=0.02579$ . En reportant ces valeurs au modèle

linéarisé ( $K = k_L \cdot K_b \cdot \frac{C_{borinj} - C_{bori}}{3600 \cdot V_{prim}}$ ), on obtient :

- pour la borication (avec  $C_{bori}=200$ ):  $K_{bb} k_L=2.75$
- pour la dilution (avec  $C_{bori}=1200$ ):  $K_{bd} k_L=15.6$

Les simulations montrent que  $K_{bb}=0.8$ ,  $K_{bd}=8$  sont de bonnes valeurs.  $k_L$  étant proche de 1, on est sûr de rester dans le domaine de stabilité. Le système linéaire est donc stable. La stabilité du système non linéaire est renforcée par rapport à celle du système linéaire à cause de la nature de la contre-réaction pondérée par  $K_b$ . En effet, l'action de cette boucle intervient en correction sur l'opération en cours et en cas de début d'oscillations divergentes (impossibles avec les valeurs choisies), l'effet de la boucle de rétroaction vient annuler le débit en cours

quand celui-ci change de sens. Privé d'actionneur, le système évolue naturellement. Il a tendance à se stabiliser jusqu'à la prochaine demi-oscillation. La divergence n'est entretenue qu'une partie du temps et un cycle demi-oscillant stable apparaît alors. Cependant, avec les coefficients choisis, le système reste dans son domaine de stabilité.

Le volume mort étant représenté dans le modèle de commande, il ne déstabilise pas le régulateur.

## **2.5. Mise en œuvre et résultats**

### **2.5.1. Mise en œuvre**

La régulation de la concentration en bore est stable, car on fait une correction sur l'opération en cours, en évitant ainsi les bouchons inutiles. Cependant en cas d'extremum, l'évolution lente des valeurs et le bruit numérique peuvent engendrer des oscillations du signe du gradient de  $C_{\text{bore}}$ . Il apparaît alors des oscillations dues au volume mort. Pour se préserver d'un tel comportement du régulateur, on a rajouté une bande morte de 0.2 ppm juste après la différence entre  $C_{\text{borc}}$  et  $C_{\text{binst}}$ . On se met ainsi à l'écart du bruit numérique avec une dégradation insignifiante du suivi de  $C_{\text{bore}}$ .

Pour régler le problème du bouchon de bore, il faut qu'après le passage forcé de la ligne en eau, l'augmentation de  $C_{\text{borc}}$  soit telle qu'il ne faille pas boriquer, sous peine de voir la ligne repasser en bore. Pour que la ligne reste en eau, si  $C_{\text{borc}}(t)$  est croissant, on va imposer  $C_{\text{borc}}'(t)$  en entrée au régulateur, tel que  $C_{\text{borc}}'(t)$  rejoindra linéairement l'extrapolation de  $C_{\text{borc}}$  à l'instant de la remontée de charge.

### **2.5.2. Résultats**

Le premier cas test réalisé sous Matlab (fig. 3.12) consiste en un suivi de consigne en rampe (trait plein). Le modèle non perturbé (tirets) suit précisément la consigne, le modèle perturbé la rejoint (pointillés ; caractéristiques du modèle perturbé:  $k_L=1.1$ ,  $\tau_L=45$  s. et intégrateur initialisé<sup>35</sup> à  $C_{\text{bori}}+1$ ).

---

<sup>35</sup>  $C_{\text{bori}}$  est initialisé pour notre étude à 473 ppm.

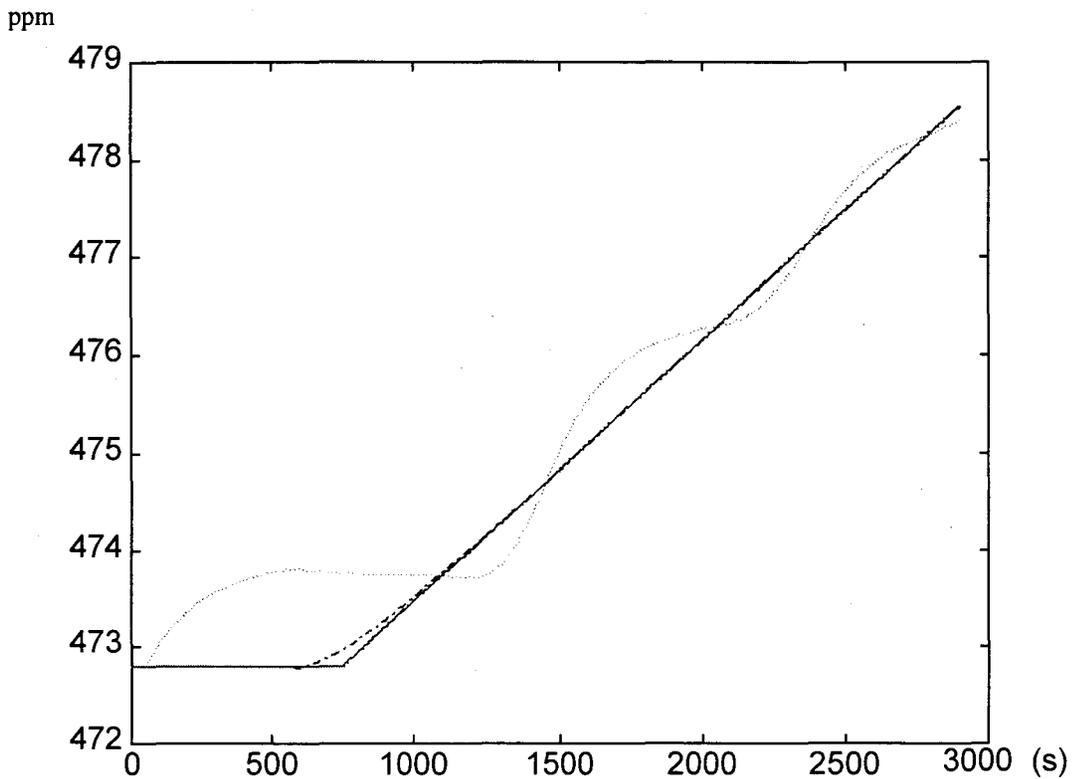


Fig. 3.12 Suivi de consigne en rampe

La mise en œuvre du régulateur sur le scénario Sc2 (Fig. 3.13) en utilisant les références actuelles montre que la concentration en bore suit globalement bien la concentration de référence sauf quand celle-ci évolue rapidement. Ce manque de performance est dû aux saturations sur les actionneurs (borication max :  $9 \text{ m}^3/\text{h}$ , dilution max :  $27 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Sur cette figure, apparaissent la concentration en bore de référence (trait tireté) qui a une avance de 240 s, la concentration en bore (trait plein clair) et la concentration en bore avec gestion du bouchon de bore (trait plein foncé). La gestion du bouchon de bore ne change pas grand chose pour la plus grande partie du scénario. A partir de 10 000 s, la référence augmente et baisse très rapidement après avoir dépassé la concentration réelle ; une légère borication intervient et crée un bouchon de bore qui retarde la baisse de la concentration. Comme cette baisse est forte, les actionneurs sont saturés et le retard ne peut être comblé avant une remontée de la référence 1 000 s plus tard. D'où l'utilité de gérer le bouchon de bore.

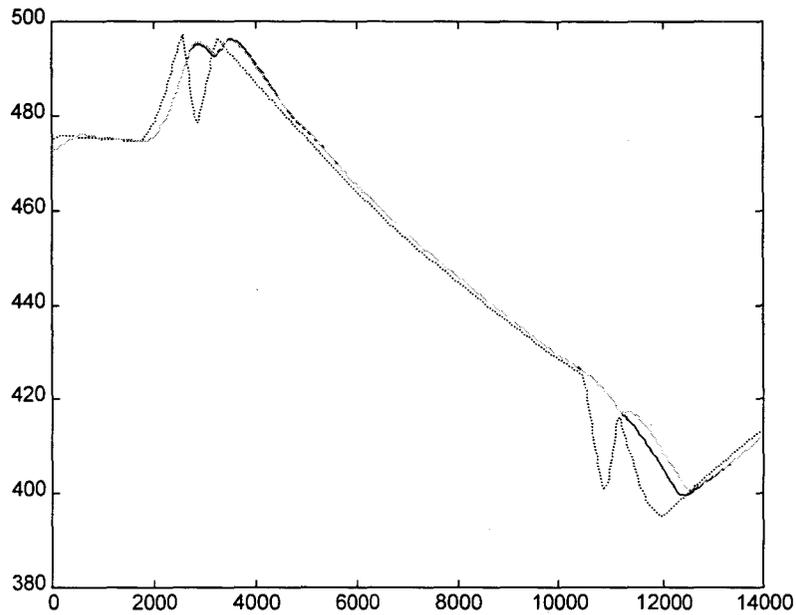


Fig. 3.13 Performances du régulateur de la concentration en bore

### 3. ELABORATION DES NOUVELLES REFERENCES ( $T_{REF}$ , $\Delta I_{REF}$ , $\eta_{REF}$ )<sup>36</sup>

#### 3.1. Objectif

Il s'agit de substituer aux références actuelles, d'autres références qui permettent de minimiser le déplacement des grappes ainsi que le volume des effluents. Ces nouvelles références ne doivent pas faire sortir les grandeurs  $T_{moy}$ ,  $\Delta I$  et  $\eta$  de leurs domaines admissibles respectifs.

---

<sup>36</sup> [Le Grand 97]

Le premier objectif de cette étude est de donner une forme adéquate à la fonction  $F$  entre la puissance de référence et les consignes  $T_{ref}$ ,  $\Delta I_{ref}$  et  $\eta_{ref}$  (Fig. 3.14). Cette fonction  $F$  dépendra de paramètres sur lesquels nous agirons pour l'optimisation. On peut donner *a priori* n'importe quelle forme à cette fonction. Il peut cependant paraître judicieux de chercher une fonction  $F$  ayant un lien avec la centrale, représentant un compromis entre le comportement "naturel" du système et l'influence du régulateur.

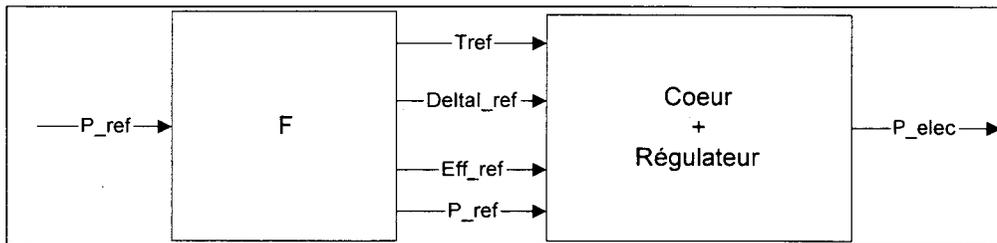


Fig. 3.14 Schéma de principe

Le deuxième objectif que nous nous fixons est de sélectionner puis d'appliquer une méthode d'optimisation pour trouver une combinaison de paramètres définissant la fonction  $F$  et minimiser un critère évaluant la sollicitation des actionneurs du cœur et le respect des domaines admissibles des grandeurs de référence.

### 3.2. Construction de la fonction F

#### 3.2.1. Forme de la fonction F

Des travaux ([Bendotti 96]) ont établi un modèle du cœur de la centrale par identification multivariable autour de points de fonctionnement particuliers (21%, 60%, 90%, 99%) à partir des réponses du système à des stimuli donnés. La période d'échantillonnage est de 1 seconde. Les entrées sont  $u_R(t)$ ,  $u'_G(t)$ <sup>37</sup> (positions des groupes R et G) et  $Q_{V_{gv}}(t)$  (débit vapeur au générateur de vapeur). Les sorties sont  $T_{moy}(t)$  et  $\Delta I(t)$ . Le processus a été modélisé par une forme d'état d'ordre 6, réduite ensuite à une forme d'état d'ordre 1 pour chaque point de fonctionnement. L'identification donne un modèle aux petites variations:

$$\left\{ \begin{array}{l} x(t+1) = ax(t) + [b_1 \quad b_2 \quad b_3] \begin{bmatrix} u_R(t) \\ u'_G(t) \\ Q_{V_{gv}}(t) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} T_{moy}(t) \\ \Delta I(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_R(t) \\ u'_G(t) \\ Q_{V_{gv}}(t) \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (3.23)$$

Soit en schéma entrée-sortie :

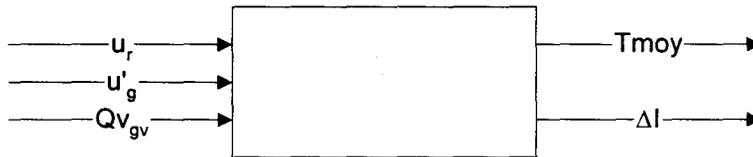


Fig. 3.15 Schéma entrée-sortie 1

Les coefficients  $a$ ,  $b_i$ ,  $c_j$  et  $d_{ki}$  dépendent de la puissance nominale  $P$ , les valeurs numériques étant connues aux quatre points de fonctionnement.

Ce modèle nous permet de comprendre les couplages physiques entre les différentes grandeurs. Cependant, il n'est pas utilisable tel quel, puisque la fonction F ne doit admettre que  $P_{ref}$  en entrée, et doit donner  $T_{ref}$ ,  $\Delta I_{ref}$  et  $\eta_{ref}$  en sortie. Il nous faut donc faire une hypothèse : en négligeant la dynamique de la turbine et en exprimant le résultat en % du débit ou de la puissance nominale, on peut considérer que :  $P_{elec}(t) = Q_{V_{gv}}(t)$ .

De plus, l'efficacité est la somme pondérée des positions des grappes :

$$\eta = g_r(P)u_R + g_G(P)u_G \quad (3.24)$$

On peut donc augmenter la dimension du système pour inclure  $\eta$  sans en augmenter l'état. On obtient alors un deuxième diagramme entrée-sortie (Fig. 3.16).

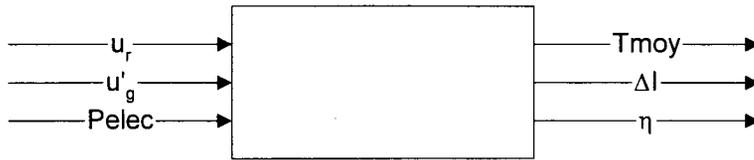


Fig. 3.16 Schéma entrée-sortie 2

L'idée pour construire le générateur de référence est de proposer au système des valeurs qui peuvent être naturellement atteintes par le cœur. En mettant en entrée les références sur la puissance demandée et les positions des grappes, on obtient en sortie des valeurs qui peuvent servir de référence pour le cœur. Ce qui se traduit sur le schéma suivant :

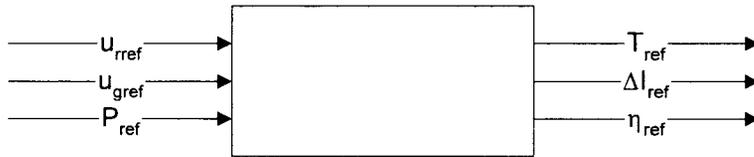


Fig. 3.17 Schéma entrée-sortie 3

Pour être en accord avec le schéma (Fig. 3.14), on désire que seul  $P_{ref}$  soit en entrée de la fonction  $F$ . En reprenant et en détaillant le schéma (Fig. 3.14), la solution choisie est :

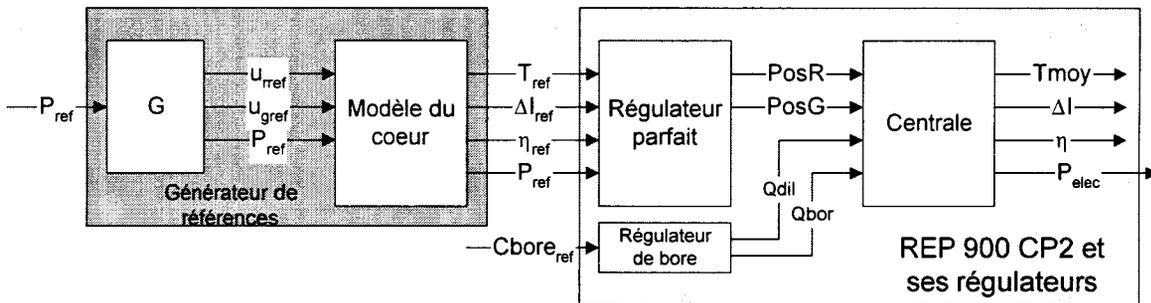


Fig. 3.18 Schéma global générateur de références et centrale

Sur ce schéma, dans le bloc gris clair, l'appellation régulateur parfait<sup>38</sup> sous-entend que pour des références données, le régulateur saura amener la centrale à ces références. A première vue, la référence de la concentration en bore peut être vue comme une perturbation par le

<sup>37</sup> La notation  $u'_G$  est expliquée au paragraphe Chapitre 3 : 3.2.3 Prise en compte de la courbe de calibrage des groupes gris

<sup>38</sup> Sur le schéma les boucles de rétroaction entre le régulateur et la centrale ont été omises par souci de clarté.

régulateur parfait. Cependant, avec deux actionneurs agissant dans un domaine limité et quatre consignes distinctes, le régulateur est surcontraint et le bore peut lui apporter une aide non négligeable. De plus, comme la concentration en bore de référence, de par sa conception, apporte au régulateur toute la réactivité nécessaire pour qu'il puisse atteindre ses différentes références, c'est la différence entre la concentration de référence et la concentration réelle qui est une perturbation pour le régulateur.

Pour déterminer la fonction G, on fait l'hypothèse qu'une petite variation de puissance peut être compensée indifféremment par les groupes R ou G. Cette hypothèse permet le raisonnement suivant :

si l'on extrait les groupes ( $u_R > 0$  ou  $u_G > 0$ ), la température augmente de T, puisque l'on a favorisé la réaction nucléaire dans le cœur (donc la production d'énergie) en diminuant l'efficacité des groupes neutrophages.

Par ailleurs, si l'on augmente le débit vapeur vers la turbine ( $Q_V > 0$ ), cette perte d'énergie dans le circuit va se traduire par un refroidissement dans le circuit primaire ( $T' < 0$ ). Si une variation de la position des grappes ou du débit vapeur est compensée de telle façon que la température ne change pas ( $T_{moy} = 0$ ) et si nous appelons:

- $T_{moy}$  la variation totale de la température moyenne ;
- $T_{Q_V}$  la variation de  $T_{moy}$  due à une variation de  $Q_{V_{gv}}$  ;
- $\eta_G$  et  $\eta_R$  les variations d'efficacité des groupes G et R ;
- $T_R$  la variation de  $T_{moy}$  due uniquement à un déplacement des grappes R ;
- $T_G$  la variation de  $T_{moy}$  due uniquement à un déplacement des grappes G ;
- $Q_{VR}$  la variation de  $Q_{V_{gv}}$  qui crée un  $T_{Q_V}$  uniquement compensé par  $T_R$  ;
- $Q_{VG}$  la variation de  $Q_{V_{gv}}$  qui crée un  $T_{Q_V}$  uniquement compensé par  $T_G$  ;
- $Q_V$  la variation de  $Q_{V_{gv}}$

alors en considérant qu'il est possible d'appliquer le théorème de superposition, nous pouvons écrire:  $T_{moy} = T_R + T_G + T_{Q_V}$

Par ailleurs,  $Q_V = Q_{VR} + Q_{VG}$ , car les groupes R et G sont les seuls actionneurs.

### Chapitre 3

Nous posons:

$$u_R = a_R T_R \quad (\text{avec } a_R > 0) \qquad u_G = a_G T_G \quad (\text{avec } a_G > 0)$$

$$u_R = -c_R \eta_R \quad (\text{avec } c_R > 0) \qquad u_G = -c_G \eta_G \quad (\text{avec } c_G > 0)$$

$$Q_V = -e T_{Q_V} \quad (\text{avec } e > 0)$$

Les coefficients  $a_R$ ,  $a_G$ ,  $c_R$ ,  $c_G$ , et  $e$  dépendent de la charge  $P$ .

Si  $G$  est fixe,  $T_G = 0$ . Donc  $T_{\text{moy}} = T_R + T_{Q_V}$ . Or, selon l'hypothèse faite précédemment  $T_{\text{moy}} = 0$ . On en déduit une relation du type  $u_R = \alpha(P) Q_{V_R}$  en utilisant les égalités vues précédemment ( $G$  étant fixe, on a bien sûr  $Q_{V_R} = Q_V$ ).

En suivant le même raisonnement avec les groupes  $G$ , on aboutit à  $u_G = \beta(P) Q_{V_G}$ . La prise en compte de façon découplée des actionneurs (groupe  $G$  et groupe  $R$ ) nous permet de leur affecter un comportement différent selon la puissance demandée : pour traduire ce fait, il suffit d'imposer  $Q_{V_R} = \nu(P) Q_{V_G}$ . Comme on désire utiliser surtout les groupes  $R$  à haute charge (ils y sont plus antiréactifs), on choisit :

$$\nu(P) = 5 * \tanh \left( 6 * \left( \frac{P}{100} \right)^x - 3 \right) + 5 \qquad (3.25)$$

Cette fonction a pour forme (Fig. 3.19):

---

Titre:  
Créé par:  
Date de création:

Fig. 3.19 Représentation de la fonction  $\nu(P)$

Nous obtenons alors, en combinant les égalités  $dQ_{VR} = \nu(P)Q_{VG}$  et  $Q_V = Q_{VR} + Q_{VG}$

$$\begin{cases} Q_{VR} = \frac{\nu(P)}{1+\nu(P)} Q_V \\ Q_{VG} = \frac{1}{1+\nu(P)} Q_V \end{cases} \quad (3.26)$$

Nous pouvons déduire de tout ce qui précède l'égalité:

$$\begin{bmatrix} u_R \\ u_G \\ Q_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha(P)Q_{VR} \\ \beta(P)Q_{VG} \\ Q_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha(P)\nu(P)}{1+\nu(P)} \\ \frac{\beta(P)}{1+\nu(P)} \\ 1 \end{bmatrix} Q_V \quad (3.27)$$

On peut aussi construire de la même manière des coefficients  $\gamma(P)$  et  $\xi(P)$  satisfaisant les égalités:  $\eta_R = \gamma(P)Q_{VR}$  et  $\eta_G = \xi(P)Q_{VG}$ .

### 3.2.2. Détermination des coefficients $\alpha(P), \beta(P), \gamma(P), \xi(P)$

La démarche pour déterminer numériquement ces coefficients aux quatre points de fonctionnement ( $P=21\%, 60\%, 90\%$  et  $99\%$ ) est la suivante :

On impose un échelon sur  $u_R$  (+3 ou -3 pas selon les cas), le débit vapeur et  $u_G$  étant dans chaque cas gardés constants à leur valeur d'équilibre pour la puissance à laquelle on travaille. On mesure  $T_R$  et  $\eta_R$ . On suit la même procédure en inversant  $u_R$  et  $u_G$  (échelons de +10 ou -10 pas cette fois-ci). Enfin, on impose un échelon à  $Q_V$  ( $u_R$  et  $u_G$  constants à leur valeur d'équilibre) et on mesure  $dT_{Q_V}$ . On obtient ainsi les coefficients  $a_R, a_G, c_R, c_G$  et  $e$  introduits précédemment, dont on peut déduire numériquement les valeurs<sup>39</sup> de  $\alpha(P), \beta(P), \gamma(P)$  et  $\xi(P)$  aux points de fonctionnement qui nous intéressent.

Remarque: les simulations ont été réalisées tous régulateurs désactivés

### 3.2.3. Prise en compte de la courbe de calibrage des groupes gris

L'antiréactivité des groupes G dépend de façon non-linéaire de la puissance thermique du cœur. Pour tenir compte de cette non-linéarité<sup>40</sup>, les auteurs des travaux d'identification que nous allons utiliser pour construire F n'ont pas utilisé les positions mesurées des groupes gris

---

<sup>39</sup> Ces valeurs sont données en Annexe 4.1

( $u_G$ ), mais leur projection ( $u'_G$ ) sur une droite. La relation entre  $u_G$  et  $Q_{VG}$  a été établie à partir des positions réelles des groupes (valeurs données par le simulateur). Il faut donc tenir compte de cette différence pour établir nos résultats définitifs. Nous appelons  $u_G$  la variation réelle de la position de G et  $u'_G$  la variation de la projection de la position de G. Nous pouvons écrire  $u'_G = \mu(P)u_G$  (avec  $\mu(P)$  déduite de la courbe de non-linéarité et de la projection de cette courbe). Or  $u_G = \beta(P)Q_{VG}$ . Donc  $u'_G = \mu(P)\beta(P)Q_{VG} = \beta'(P)Q_{VG}$ .

### 3.2.4. Synthèse des relations

Nous avons obtenu les relations:

$$\begin{cases} u_R = \alpha(P)Q_{VR} \\ u'_G = \beta'(P)Q_{VG} \\ \eta_R = \gamma(P)Q_{VR} \\ \eta_G = \xi(P)Q_{VG} \end{cases} \quad (3.28)$$

Le modèle identifié était:

$$\begin{cases} x(t+1) = ax(t) + [b_1 \quad b_2 \quad b_3] \begin{bmatrix} u_R(t) \\ u'_G(t) \\ Q_V(t) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} T_{moy}(t) \\ \Delta I(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_R(t) \\ u'_G(t) \\ Q_V(t) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3.29)$$

Avec les hypothèses faites précédemment, et en posant  $\eta(t) = \eta_R(t) + \eta_G(t)$ , on peut écrire :

$$\begin{cases} x(t+1) = ax(t) + [\alpha b_1 \quad \beta' b_2 \quad b_3] \begin{bmatrix} \frac{\nu}{1+\nu} \\ 1 \\ \frac{1}{1+\nu} \\ 1 \end{bmatrix} P_{elec}(t) \\ \begin{bmatrix} T_{moy}(t) \\ \Delta I(t) \\ \eta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} \alpha d_{11} & \beta' d_{12} & d_{13} \\ \alpha d_{21} & \beta' d_{22} & d_{23} \\ \gamma & \xi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\nu}{1+\nu} \\ 1 \\ \frac{1}{1+\nu} \\ 1 \end{bmatrix} P_{elec}(t) \end{cases} \quad (3.30)$$

---

<sup>40</sup> voir courbe donnée en Annexe 4.2

Les coefficients dépendent tous de la puissance P. Il ne nous reste qu'à renommer les coefficients des matrices de la représentation d'état donnant la forme choisie pour F, ainsi que les entrées et les sorties en fonction de ce que nous voulons obtenir:

$$\left\{ \begin{array}{l} x(t+1) = a_1 x(t) + \begin{bmatrix} a_2 & a_3 & a_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\nu}{1+\nu} \\ 1 \\ \frac{1}{1+\nu} \\ 1 \end{bmatrix} P_{ref}(t) \\ \left[ \begin{array}{l} T_{ref}(t) \\ \Delta I_{ref}(t) \\ \eta_{ref}(t) \end{array} \right] = \begin{bmatrix} a_5 \\ a_6 \\ 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} a_7 & a_8 & a_9 \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ a_{13} & a_{14} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\nu}{1+\nu} \\ 1 \\ \frac{1}{1+\nu} \\ 1 \end{bmatrix} P_{ref}(t) \end{array} \right. \quad (3.31)$$

C'est la forme que nous décidons de donner à la fonction F. Celle-ci dépend de 14 paramètres  $a_i(P)$  dont des valeurs sont connues aux quatre points de fonctionnement (P=21%, 60%, 90% et 99%). Ces valeurs<sup>41</sup> constitueront un point de départ pour trouver une expression analytique à donner aux paramètres  $a_i$  en fonction de la charge P.

Remarque: la forme de cette fonction F a été obtenue à partir d'une représentation d'état discrète. Par homogénéité avec le reste du modèle, F sera codée sous forme continue. Pour

passer du discret au continu, on utilise l'opérateur différence première  $\delta = \frac{z-1}{T_e}$  où z est

l'opérateur avance ( $z(u_k)=u_{k+1}$ ) et  $T_e$  la période d'échantillonnage (ici 1 seconde). On a la

propriété remarquable suivante<sup>42</sup>:  $\lim_{T_e \rightarrow 0} \delta = \frac{d}{dt}$ . Comme  $T_e$  est très petite devant les constantes

de temps du système, on peut faire l'approximation  $\delta \approx \frac{d}{dt}$ , ce qui se traduit pour le système

par :

$$\dot{x}(t) \approx (a_1 - 1)x(t) + \begin{bmatrix} a_2 & a_3 & a_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\nu}{1+\nu} \\ 1 \\ \frac{1}{1+\nu} \\ 1 \end{bmatrix} P_{ref}(t) \quad (3.32)$$

<sup>41</sup> cf. Annexe 4.3

<sup>42</sup> cf. [Borne et al. 92a]

### 3.3. Forme analytique des paramètres de la fonction F

#### 3.3.1. Forme à donner aux coefficients $a_i$

Vu la forme de la fonction F, l'idée la plus immédiate est d'écrire cette fonction sous la forme:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(P)x(t) + B(P)P_{ref} \\ \begin{bmatrix} T_{ref} \\ \Delta I_{ref} \\ \eta_{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1(P) \\ C_2(P) \\ 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} D_1(P) \\ D_2(P) \\ D_3(P) \end{bmatrix} P_{ref} \end{cases} \quad (3.33)$$

avec:

$$\begin{cases} A(P) = a_1(P) \\ B(P) = \frac{a_2(P)\nu(P)}{1+\nu(P)} + \frac{a_3(P)}{1+\nu(P)} + a_4(P) \\ C_1(P) = a_5(P) \\ C_2(P) = a_6(P) \\ D_1(P) = \frac{a_7(P)\nu(P)}{1+\nu(P)} + \frac{a_8(P)}{1+\nu(P)} + a_9(P) \\ D_2(P) = \frac{a_{10}(P)\nu(P)}{1+\nu(P)} + \frac{a_{11}(P)}{1+\nu(P)} + a_{12}(P) \\ D_3(P) = \frac{a_{13}(P)\nu(P)}{1+\nu(P)} + \frac{a_{14}(P)}{1+\nu(P)} \end{cases} \quad (3.34)$$

Chacun de ces termes en lettres majuscules est défini par 4 points (à partir des valeurs  $a_i$  connues à  $P=21\%$ ,  $60\%$ ,  $90\%$  et  $99\%$  et de  $\nu(P)$ ). Une identification par des polynômes ou autres fonctions de ces sept séries de quatre points pourrait être une façon d'interpoler les valeurs de ces termes en majuscules. Mais une telle approche obligerait à reconsidérer toutes les identifications si on désire changer  $\nu(P)$ .

Pour garder cette liberté, il faut chercher des fonctions qui vont permettre d'interpoler ces 14 coefficients en fonction de la charge P. Cette étape est très importante pour la suite de notre travail, car la qualité et surtout la richesse de ces fonctions de P influenceront grandement sur les résultats de l'optimisation.

Notre point de départ est l'ensemble des quatre valeurs que prennent les coefficients  $a_i$  aux points d'identification. La première idée avait été d'approcher les  $a_i$  par des polynômes de degrés 1 à 3. Les résultats n'étaient pas satisfaisants dans la mesure où les courbes des  $a_i$  montrent clairement, pour la plupart des coefficients, un comportement particulier aux environs de 100% de charge (tangente verticale). En fait, les coefficients  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_5$ ,  $a_6$ ,  $-a_7$ , -

$a_8, a_{12}$  semblent se comporter de manière identique en fonction de la charge. La forme générale serait la suivante:

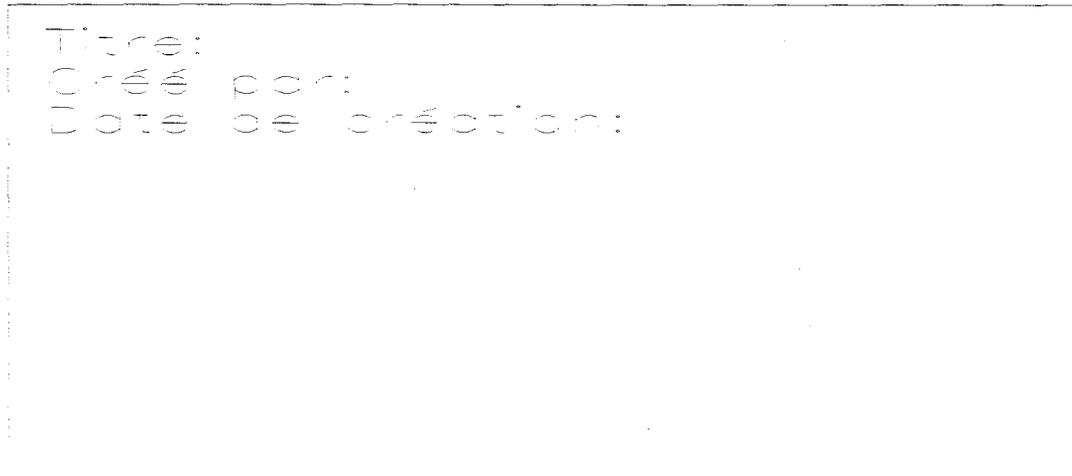


Fig. 3.20 Forme générale de  $a_2, a_3, a_5, a_6, -a_7, -a_8, a_{12}$

Pour interpoler les coefficients  $a_i$ , on cherche une fonction  $C_\infty$  sur  $]0 ; 100[$  :

- croissante puis décroissante ;
- présentant une tangente verticale en  $P=100\%$  ;
- présentant une tangente horizontale en  $P=0\%$  ;
- nulle en  $0\%$  et en  $100\%$ .

La fonction  $g(x) = \gamma \left( -\ln\left(\frac{x}{100}\right) \right)^\alpha \left( \frac{x}{100} \right)^\beta$  vérifie ces conditions si  $0 < \alpha < 1$  et  $\beta > 1$ .

On conserve cette forme pour effectuer les interpolations. Pour tenir compte du fait que  $a_i(0)=a_i(100)=0$  n'est pas nécessairement réalisé, nous ajoutons à  $g(x)$  un polynôme  $P_3(x)$  de degré 3 tel que :

$$\begin{cases} P_3(0) \text{ et } P_3(100) \text{ connus} \\ P_3'(0) = P_3'(100) = 0 \end{cases} \quad (3.35)$$

Le calcul donne :

$$P_3(x) = P_3(0) - 2(P_3(100) - P_3(0)) \left( -\frac{3}{2} \left( \frac{x}{100} \right)^2 + \left( \frac{x}{100} \right)^3 \right) \quad (3.36)$$

Il s'est avéré par la suite que la même forme de fonction  $f(x)=g(x) + P_3(x)$  pouvait être utilisée pour interpoler  $a_1, a_4$  et  $a_9$ , ce qui était plus satisfaisant qu'une simple droite pour  $a_1$  et  $a_4$  ou

qu'un polynôme de degré 3 pour  $a_9$  (choix initiaux). Par convention, on appelle les fonctions s'écrivant  $g(x) + P_3(x)$  des **fonctions de "type f"**.

$a_{10}$ ,  $a_{13}$  et  $a_{14}$  seront interpolés par des droites,  $a_{11}$  par un polynôme de degré 3. Les courbes d'interpolation ainsi que les valeurs des paramètres des fonctions sont données en annexe<sup>43</sup>.

On écrira, pour  $i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12$ :

$$a_i^0(x) = \gamma_i^0 \left( -\ln\left(\frac{x}{100}\right) \right)^{\alpha_i^0} \left( \frac{x}{100} \right)^{\beta_i^0} + e_i^0 + d_i^0 Q(x) \quad (3.37)$$

où

$$Q(x) = \left( -\frac{3}{2} \left( \frac{x}{100} \right)^2 + \left( \frac{x}{100} \right)^3 \right) \quad (3.38)$$

(Par convention, dans la suite de cette étude, l'indice <sup>0</sup> associé à un paramètre indiquera que ce paramètre est constant et égal à sa valeur initiale; le même indice pour une fonction  $a_i(P)$  indiquera que les réels paramétrant cette fonction sont pris à leur valeur initiale).

Cette fonction dépend de cinq paramètres :  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$ ,  $e_i$ ,  $d_i$ .

Pour la fonction  $v(P)$ , on garde un degré de liberté en choisissant de laisser libre l'exposant  $\chi$ .

$$v(P) = 5 * \tanh \left( 6 * \left( \frac{P}{100} \right)^\chi - 3 \right) + 5 \quad (3.39)$$

### 3.3.2. Nombre de paramètres

Sans faire aucune simplification, on obtient :

- 3 droites soit 6 paramètres ;
- 1 polynôme de degré 3 soit 4 paramètres ;
- 10 fonctions de "type f" soit 50 paramètres ;
- 1 fonction  $v(P)$  à 1 paramètre.

---

<sup>43</sup> cf. Annexe 4.3

Soit, au total, 61 paramètres. A moins de faire des simplifications supplémentaires, l'optimisation se fera dans un espace à 61 dimensions. Il faut donc simplifier au maximum le modèle pour pouvoir ensuite travailler sur un nombre de paramètres plus acceptable.

a) Passage à 51 paramètres

On réécrit les coefficients  $a_i$  interpolés par des fonctions de "type f" sous la forme:

$$a_i(x) = \gamma_i \left( -\ln\left(\frac{x}{100}\right) \right)^{\alpha_i} \left( \frac{x}{100} \right)^{\beta_i} + \lambda_i (e_i^0 + d_i^0 Q(x)) \quad (3.40)$$

Le nombre de paramètres est réduit à 5 (les fonctions de "type f" ne dépendent plus que de 4 paramètres chacune :  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \lambda_i$ ).

b) Passage à 42 paramètres

Le tableau de valeurs donné en Annexe 1 montre que  $\beta_i^0$  reste proche de 2 pour les  $a_i^0$  de "type f". L'idée est de fixer  $\forall i \beta_i = \beta$  constant, ce qui remplace les 10 paramètres  $\beta_i$  par un seul paramètre  $\beta$ . Le nombre de paramètres est alors descendu à 42. Nous donnons en annexe les nouvelles valeurs de  $\gamma_i^0, \alpha_i^0, e_i^0$  et  $d_i^0$  obtenues après interpolation, sachant que cette fois-ci  $\beta_i^0 = 2$  (sauf  $\beta_1^0 = 6$ ).

c) Passage à 21 et 12 paramètres

Cette étape va réduire le nombre de paramètres à 21. Connaissant la forme à donner aux coefficients  $a_i$ , on peut à présent travailler sur les coefficients suivants:

$$\begin{cases} B(P) = \frac{a_2 v}{v+1} + \frac{a_3}{v+1} + a_4 \\ D_1(P) = \frac{a_7 v}{v+1} + \frac{a_8}{v+1} + a_9 \\ D_2(P) = \frac{a_{10} v}{v+1} + \frac{a_{11}}{v+1} + a_{12} \\ D_3(P) = \frac{a_{13} v}{v+1} + \frac{a_{14}}{v+1} \end{cases} \quad (3.41)$$

Nous allons expliquer la méthode pour réduire le nombre de paramètres dans l'expression de  $B(P)$ ; celle-ci s'adapte facilement aux autres coefficients. L'idée est d'exprimer le coefficient  $a_i$  (pour  $i=2, 3$  et  $4$ ) sous la forme:

$$a_i = \gamma \left( -\ln\left(\frac{P}{100}\right) \right)^\epsilon \left( \frac{P}{100} \right)^\beta f_i(P) + \lambda g_i(P) \quad (3.42)$$

Avec :

$$\begin{cases} f_i(P) = \gamma_i^0 \left( -\ln\left(\frac{P}{100}\right) \right)^{\alpha_i^0 - \varepsilon^0} \\ g_i(P) = e_i^0 + d_i^0 Q(P) \end{cases} \quad (3.43)$$

Pour  $i=2, 3$  et  $4$ , il n'existe qu'un triplet  $\gamma, \varepsilon$  et  $\lambda$  ;  $\beta$  étant commun à toutes les fonctions de "type f".

On constate que les fonctions  $f_i$  et  $g_i$  ne dépendent d'aucun paramètre; par ailleurs, si  $\gamma = \lambda = 1$  et  $\varepsilon = \varepsilon^0$  et  $\beta = 2$ , alors on retrouve les valeurs "d'initialisation" des coefficients  $a_i$ .

L'intérêt de cette écriture est que le coefficient B peut maintenant s'exprimer sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} B(P) = & \gamma \left( -\ln\left(\frac{P}{100}\right) \right)^\varepsilon \left( \frac{P}{100} \right)^\beta \left( \frac{\nu(P)}{\nu(P)+1} f_2(P) + \frac{1}{\nu(P)+1} f_3(P) + f_4(P) \right) \\ & + \lambda \left( \frac{\nu(P)}{\nu(P)+1} g_2(P) + \frac{1}{\nu(P)+1} g_3(P) + g_4(P) \right) \end{aligned} \quad (3.44)$$

Il n'y a plus que 3 paramètres à déterminer pour  $a_2, a_3$ , et  $a_4$  et 1 paramètre pour l'ensemble des fonctions de "type f". En appliquant le même type de simplification aux coefficients  $D_1$  et  $D_2$ , après avoir exprimé les paramètres de  $a_6$  en fonction de ceux de  $a_5^{44}$ , et avoir réduit les 4 paramètres de  $D_3$  à 3 paramètres, la taille du problème d'optimisation est réduite à 21 paramètres.

Enfin, si on décide de travailler en statique ( $A(P)=B(P)=C_1(P)=C_2(P)=0$ ), il ne reste que 12 paramètres dans l'expression de la fonction F en fonction de la charge P.

On trouve en annexe<sup>45</sup> les conventions prises pour la notation des paramètres, dans les différentes versions (42, 21 et 12 paramètres). Ces notations sont celles utilisées dans les différents programmes MATLAB écrits pour la recherche :

- $\alpha_j$  pour j compris entre 1 et 40,  $\chi$  et  $\lambda$  ;

---

<sup>44</sup> formule empirique déduite de la superposition des courbes pour les valeurs "d'initialisation"

<sup>45</sup> cf. Annexes 4.3

- $\alpha'_k$  pour  $k$  compris entre 1 et 19,  $\chi$  et  $\lambda'$  ;
- $\beta_n$  pour  $n$  compris entre 1 et 12.

### 3.3.3. Bornes sur les paramètres

On a déjà imposé des domaines d'évolution à certains paramètres pour conserver la forme des fonctions de "type f" (voir dans la définition de ces fonctions). L'objectif est de définir pour chaque paramètre une borne supérieure et une borne inférieure. Le choix de ces bornes est en partie arbitraire. La démarche se décompose en trois étapes majeures :

- On commence par étudier directement le comportement de chaque coefficient  $a_i$ : nous limitons les domaines d'évolution des paramètres  $\alpha_j$  du coefficient  $a_i$  en définissant *a priori* un domaine autorisé pour ce dernier.
- La deuxième étape est de vérifier sur quelques scénarios que ces bornes ne sont pas trop larges. Une diminution des domaines d'évolution de certains  $\alpha_j$  est nécessaire, car les comportements des grandeurs  $T_{moy}$ ,  $\Delta I$  et  $\eta$  se révèlent trop aberrants (évolution quasi-entière hors des domaines autorisés...).
- Enfin, les bornes sur les  $\alpha_j$  ont été converties en bornes sur les  $\alpha'_k$  puis sur les  $\beta_n$  pour les versions simplifiées. Les bornes définitives sont données en Annexe 5.3. Il est important de remarquer que les différents choix effectués pour passer de 42 à 21 paramètres ont contraint à restreindre encore les domaines d'évolution des paramètres.

### 3.3.4. Conclusion

On dispose d'une fonction  $F$  donnant  $T_{ref}$ ,  $\Delta I_{ref}$  et  $\eta_{ref}$  en fonction de  $P_{ref}$ . Cette fonction dépend de 21 (ou 12 si l'on utilise la version la plus simplifiée) paramètres évoluant dans des domaines bornés connus. La démarche de la partie suivante sera d'optimiser l'utilisation des actionneurs à partir de la consigne de puissance  $P_{ref}$ , tout en imposant aux grandeurs  $T_{moy}$ ,  $\Delta I$  et  $\eta$  de rester dans des domaines précis. Pour cela, on optimise les valeurs des paramètres de la fonction  $F$  en fonction d'un critère qui traduit toutes les spécifications recherchées pour la solution.

## 4. PRESENTATION DU CRITERE

### 4.1. Travail préliminaire à l'optimisation

#### 4.1.1. Choix du scénario de puissance à suivre

Les scénarios seront ceux qui ont servi à la validation du modèle numérique (Fig. 2.35), ils correspondent à des plans de charge habituels pour les centrales nucléaires. La durée réelle du premier scénario est de 12 700 secondes (env. 3h30), soit environ 24 secondes de simulation<sup>46</sup>.

La puissance de référence du régulateur sera la puissance réduite au plan de charge (connu dans la réalité à l'avance par les opérateurs) sans les perturbations  $k\Delta F$  et  $NPr$ .

La référence et le régulateur de la concentration en bore seront ceux qui ont été présentés dans le mémoire.

Les références pour le régulateur seront celles qui seront calculées à partir des paramètres d'optimisation.

#### 4.1.2. Choix de la fonction à optimiser

Le but premier est la minimisation de l'utilisation des actionneurs (le nombre de pas des groupes R et G et le volume des effluents dus à la régulation de la concentration en bore) avec comme contrainte de maintenir  $T_{moy}$ ,  $\Delta I$  et  $\eta$  dans leurs domaines autorisés. Cependant il est vite apparu qu'on ne peut s'affranchir de la présence d'un critère dans cette fonction de coût renseignant sur la qualité de la solution vis-à-vis des domaines d'évolution (distance moyenne et minimale par rapport aux frontières). En effet, dans une baisse de charge par exemple, le comportement *a priori* le plus économique pour les grappes est de laisser la température moyenne augmenter "naturellement" jusqu'à atteindre la borne supérieure autorisée, puis de faire en sorte de diminuer cette température "le long" de cette borne supérieure. Ceci ne laisse aucune marge de sécurité pendant un temps assez long. Un tel comportement n'est pas admissible.

De par sa conception, le régulateur est très contraint par le respect de  $T_{ref}$  et de  $\eta_{ref}$ , et il accorde moins d'importance au respect de  $\Delta I_{ref}$ . Sans prendre de précaution supplémentaire, le

résultat de l'optimisation présente pour  $\Delta I_{ref}$  des valeurs très exagérées sortant du domaine autorisé pour  $\Delta I$  et que le régulateur ne peut atteindre. Cette consigne inaccessible fait réagir le régulateur mais sort du cadre fixé pour notre étude qui précise qu'on ne doit pas compenser le régulateur. Pour régler le problème du manque d'efficacité sur la commande du  $\Delta I$ , il a été rajouté un terme supplémentaire dans la fonction de coût tenant compte de la coordination des valeurs de référence. En effet  $T_{ref}$  et  $\eta_{ref}$  peuvent être coordonnés avec  $\Delta I_{ref}$  de façon à ce que le régulateur puisse mieux atteindre ces valeurs de référence. La coordination de ces valeurs traduit une demande plus "saine" correspondant à ce que le réacteur peut fournir. La mesure de l'écart entre les valeurs de référence et les valeurs pilotées est la mesure de cette coordination : on demande au régulateur d'atteindre un ensemble de références dont l'optimisation montre qu'il est possible de les approcher. De cette partie du critère découle une diminution de l'erreur entre la référence et la valeur commandée, sans qu'il soit facile de déterminer si l'optimisation consiste principalement à rapprocher la référence d'une valeur sur laquelle le régulateur a peu d'effet, ou à coordonner les autres références de façon à permettre au régulateur d'atteindre cette référence.

La fonction de coût  $C$  sera une norme<sup>47</sup> du vecteur dont les composantes seront quatre éléments pondérés :

- $\xi$  le déplacement des grappes,
- $\zeta$  le volume des effluents,
- $\varphi$  une mesure de la coordination de ces références entre elles,
- $\psi$  une mesure du centrage des variables dans leur domaine autorisé.

$$C = \sqrt{\frac{q_1 \zeta^2 + q_2 \xi^2 + q_3 \varphi^2 + q_4 \psi^2}{q_1 + q_2 + q_3 + q_4}} \quad (3.45)$$

Chacun de ces éléments est calculé de façon à ce qu'il prenne pour valeur 1 pour une solution de qualité moyenne.

---

<sup>46</sup> La machine de travail utilisée est une UltraSparc 1, 24 s est la durée nécessaire pour lancer Matlab, charger le modèle et faire la simulation. C'est ce temps qui comptera puisqu'au cours de l'optimisation Matlab sera appelé à chaque évaluation de la fonction de coût.

<sup>47</sup> Cette norme possède l'avantage de ne pas dépendre du nombre de composantes du vecteur à mesurer contrairement aux normes de Hölder classiques d'ordre 1 et 2 [Borne et al. 95]. Cette norme sera également utilisée par la suite et a permis au cours de cette étude de comparer des simulations de longueurs différentes (dont le nombre d'échantillons est par conséquent différent).

La pondération des éléments du critère reflète le choix d'un compromis entre plusieurs qualités. Arbitrairement nous prendrons pour notre étude les valeurs suivantes :  $q_1=1$ ,  $q_2=0.5$ ,  $q_3=0.5$ ,  $q_4=1$  afin de mettre l'accent sur la diminution de la sollicitation des barres et sur la non-compensation du régulateur. Ce choix peut être remis en cause selon le type de loi de commande recherchée (économique, sûre ou autre).

a) Partie déplacement des grappes

On note  $dep\_actuel$  le déplacement des grappes (en nombre de pas) sur le scénario choisi avec le régulateur Framatome et  $dep$  le déplacement obtenu avec les nouvelles références. On choisit de tolérer pour  $dep$  jusque  $p\%$  en plus de  $dep\_actuel$ ; en deçà,  $\xi$  augmente linéairement avec  $dep$  jusqu'à la valeur 1 obtenue pour  $dep=(1+p/100)dep\_actuel$ .

Au-delà,  $\xi$  augmente comme  $\frac{4}{\sqrt{1-p/100}} \sqrt{\frac{dep}{dep\_actuel} - (1+p/100)}$  : le dépassement est immédiatement pénalisé. Si  $dep$  dépasse deux fois le déplacement actuel, la valeur de  $\xi$  est saturée à 5 (valeur arbitraire).

Nous nous efforçons de construire une fonction continue. Si nous tenons compte de toutes les remarques effectuées auparavant, nous pouvons écrire la fonction de coût choisie pour le déplacement de la façon suivante:

$$\xi = \begin{cases} \frac{dep}{(1+p/100)dep\_actuel} & \text{si } \frac{dep}{dep\_actuel} \leq (1+p/100) \\ 1 + \frac{4}{\sqrt{1-p/100}} \sqrt{\frac{dep}{dep\_actuel} - (1+p/100)} & \text{si } (1+p/100) \leq \frac{dep}{dep\_actuel} \leq 2 \\ 5 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.46)$$

La fonction ainsi définie est continue et dérivable par morceaux<sup>48</sup>. Nous prenons  $p=5\%$ .

b) Volume d'effluents

La partie  $\zeta$  du critère caractérisant le volume d'effluents est le rapport entre le volume d'effluents du scénario et le volume d'effluents d'un fichier de borication-dilution établi manuellement pour chaque scénario test.

---

<sup>48</sup> cf. Annexe 4 Forme de la fonction  $\xi$

c) Coordination des références

On s'appuiera pour cette mesure sur la différence entre les variables et leurs références au cours du temps. Soit  $U_k$  le vecteur dont les composantes  $u_{ki}$  sont les écarts à chaque pas de calcul entre une variable et sa référence, on mesure :

$$\varphi_k = \frac{\left( \frac{\sum_{i=1}^n (u_{ki})^2}{n} \right)^{1/2} + \frac{\max_i(u_{ki})}{3}}{2} \quad (3.47)$$

Cette mesure prend à la fois en compte la distance moyenne et la distance maximum. Le facteur 1/3 correspond à l'observation faite au cours de cette étude que la distance maximum est approximativement trois fois plus grande que la distance moyenne. Cette valeur est calculée pour  $T_{moy}$ ,  $\eta$  et  $\Delta I$ . Afin de donner à chacun des  $\varphi_k$  un ordre de grandeur semblable et une dimension nulle, chacun est pondéré par une valeur correspondant à un écart toléré entre la référence et la valeur qui lui correspond.

$$\varphi = \frac{\frac{\varphi_{\Delta I} (\%) }{5(\%)} + \frac{\varphi_{T_{moy}} (^\circ C) }{1(^\circ C)} + \frac{\varphi_{\eta} (pcm) }{20(pcm)}}{3} \quad (3.48)$$

d) Partie qualité de  $T_{moy}$ ,  $\Delta I$ ,  $\eta$  et  $\eta_{ref}$

Le simulateur fonctionne sous SIMULINK. Le calcul des fonctions de coût se fait dans l'environnement MATLAB après simulation, à partir des grandeurs envoyées dans le *workspace*. La période d'échantillonnage est de 25 secondes (il a fallu trouver un compromis entre un échantillonnage trop serré qui imposerait une surcharge de calculs et un échantillonnage trop lâche qui fausserait les résultats); le critère est donné sous sa forme discrète (celle effectivement utilisée pour le calcul). Le domaine de l'efficacité de référence est assez réduit et il existe un écart entre l'efficacité et sa référence. L'expérience montre que si on prend seulement une mesure du centrage de  $\eta$ ,  $\eta_{ref}$  peut être très proche des limites de son domaine, voire en sortir, ce qui n'est pas acceptable. Ceci a amené à prendre également en compte  $\eta_{ref}$  dans cette partie du critère.

La fonction  $\psi$  de qualité des grandeurs  $T_{moy}$ ,  $\Delta I$ ,  $\eta$  et  $\eta_{ref}$  se décompose alors *a priori* comme la somme de quatre fonctions  $\psi_j$ , une pour la qualité de chaque grandeur.

Nous allons expliquer en détail le choix de la fonction  $\psi_{T_{\text{moy}}}$ . Nous posons :

- $T_{\text{moysup}}(t)$  = borne supérieure du domaine à  $P(t)$  donné
- $T_{\text{moyinf}}(t)$  = borne inférieure du domaine à  $P(t)$  donné
- $\text{milieu}(t)$  = milieu du segment  $[T_{\text{moyinf}}(t), T_{\text{moysup}}(t)]$

Soit  $N$  le nombre d'échantillons à l'issue de la simulation. Nous définissons :

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{\text{moy}} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|T_{\text{moy}}(t) - \text{milieu}(t)|}{(T_{\text{moysup}}(t) - T_{\text{moyinf}}(t))} \\ d_{\text{pic}} = \begin{cases} \min_{1 \leq t \leq N} \left( \frac{|T_{\text{moy}}(t) - T_{\text{moysup}}(t)|}{(T_{\text{moysup}}(t) - T_{\text{moyinf}}(t))}, \frac{|T_{\text{moy}}(t) - T_{\text{moyinf}}(t)|}{(T_{\text{moysup}}(t) - T_{\text{moyinf}}(t))} \right) & \text{si la trajectoire reste dans le domaine} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \end{array} \right. \quad (3.49)$$

$d_{\text{moy}}$  représente la moyenne temporelle de l'écart normalisé entre la valeur de  $T_{\text{moy}}$  et le milieu du domaine considéré comme la meilleure valeur pour la température (ce choix est arbitraire).

$d_{\text{pic}}$  représente la plus petite distance normalisée entre les bornes du domaine et la trajectoire suivie par  $T_{\text{moy}}$  si celle-ci reste admissible (sinon  $d_{\text{pic}}$  est nulle ; nota : cette grandeur est continue).

$$\text{Nous avons: } \begin{cases} 0 \leq d_{\text{moy}} \leq \frac{1}{2} \\ 0 \leq d_{\text{pic}} \leq \frac{1}{2} \end{cases} \quad \text{si la trajectoire reste dans le domaine}$$

En cas de sortie du domaine admissible, nous définissons  $t_{\text{sortie}}$  comme le temps total pendant lequel la valeur était à l'extérieur de son domaine et  $d_{\text{picsortie}}$  comme la somme des plus grandes distances aux bornes atteintes au cours de chaque sortie. Les valeurs  $d_{\text{picmax}}$  et  $t_{\text{lim}}$  seront des coefficients de normalisation arbitraires connus.

Nous définissons alors la qualité de  $T_{\text{moy}}$  de la manière suivante:

$$\psi_{T_{\text{moy}}} = [p_1(2d_{\text{moy}}) + p_2(1 - \sqrt{2d_{\text{pic}}})] + \underbrace{K \left( \frac{d_{\text{picsortie}}}{d_{\text{picmax}}} + \frac{t_{\text{sortie}}}{t_{\text{lim}}} \right)}_{\text{pénalisation si sortie}} \quad \text{avec } p_1 + p_2 = 1 \quad (3.50)$$

En effet, si la trajectoire reste dans le domaine, le terme de pénalisation de sortie est nul. Or  $d_{\text{moy}}$  et  $d_{\text{pic}}$  sont compris entre 0 et 1/2, donc  $2d_{\text{moy}}$  et  $1 - \sqrt{2d_{\text{pic}}}$  restent entre 0 et 1. Comme  $p_1 + p_2 = 1$ ,  $\psi_{T_{\text{moy}}}$  est comprise entre 0 et 1. Les termes  $p_1$  et  $p_2$  servent à privilégier la minimisation de  $d_{\text{moy}}$  ou la maximisation de  $d_{\text{pic}}$  (nous prenons  $p_1=1/3$  et  $p_2=2/3$ ). Le terme en racine carrée se justifie numériquement par le fait que  $d_{\text{moy}}$  est du même ordre de grandeur que  $\sqrt{d_{\text{pic}}}$ .

En revanche, si la trajectoire sort du domaine,  $d_{\text{pic}} = 0$  par convention et  $d_{\text{moy}}$  reste défini comme auparavant. Le terme de pénalisation de sortie prend des valeurs strictement positives ; pour éviter le cas où  $T_{\text{moy}}$  est médiocre et le déplacement très petit (d'où un coût global  $C$  éventuellement plus petit que 1), la pénalisation de sortie est multipliée par un coefficient  $K$  arbitrairement grand ( $K = 45$ ).

Le terme de pénalisation est la somme de deux termes afin de pénaliser autant une sortie brève mais éloignée du domaine qu'une sortie longue mais proche du domaine.

Nous définissons  $\psi_{\Delta l}$ ,  $\psi_{\eta}$  et  $\psi_{\eta_{\text{ref}}}$  exactement de la même manière. Comme les sorties des domaines ne sont pas autorisées lors du passage sur le code SIROP, la fonction  $\psi$  sera également la norme du maximum des composantes  $\psi_{\Delta l}$ ,  $\psi_{\eta}$ ,  $\psi_{\eta_{\text{ref}}}$  et  $\psi_{T_{\text{moy}}}$ .

Finalement, la fonction  $\psi$  s'écrit:

$$\psi = \max(\psi_{T_{\text{moy}}}, \psi_{\Delta l}, \psi_{\eta}, \psi_{\eta_{\text{ref}}}) \quad (3.51)$$

$\psi$  est donc comprise entre 0 et 1 pour les "bonnes solutions".

#### e) Remarques concernant la fonction de coût $C$

La fonction de coût  $C$  est positive ; elle est continue et dérivable par morceaux. Nous chercherons à la minimiser. Elle est a priori plus petite que 1 pour une solution acceptable où les grandeurs de référence restent dans leurs domaines respectifs et où le déplacement est plus petit que le déplacement actuel augmenté de  $p\%$ . Si l'une de ces contraintes est violée, la fonction  $C$  va très vite dépasser 1.

Malgré sa complexité, le temps de calcul de la fonction de coût sera négligeable comparativement au temps nécessaire à la simulation du scénario d'optimisation.

### 4.1.3. Choix de la méthode d'optimisation

Nous avons défini dans le chapitre précédent le critère que nous désirions minimiser. Il nous reste à déterminer la technique d'optimisation la mieux adaptée au contexte.

Le modèle numérique est celui décrit en *Chapitre 2 : 2 Modèle numérique*. Le régulateur utilisé a 9 états. Par ailleurs, vu la complexité de ce système, il apparaît illusoire d'obtenir une forme analytique du déplacement par exemple, ou de  $T_{\text{moy}}$ ,  $\Delta I$  ou  $\eta$  en fonction des coefficients  $a_i$  (et donc des paramètres  $\alpha_j$  d'optimisation). Toute évaluation du critère, quel qu'il soit, ne pourra par conséquent se faire qu'en réalisant une expérience simulée, coûteuse en temps de calcul (rappelons qu'une seule simulation sur le scénario choisi dure 24 secondes). Cela rend très difficile l'emploi des algorithmes classiques basés sur l'analyse fonctionnelle.

A ce stade, nous avons le choix entre tenter de simplifier au maximum le système, au risque d'arriver à un problème d'optimisation trop éloigné du problème réel, ou adopter une logique plus industrielle et nous tourner vers des algorithmes plus robustes (recuit simulé, méthode tabou ou algorithme génétique) n'exigeant pas une connaissance exacte du système. C'est la voie finalement choisie ici. L'avantage de cette approche est que nous pouvons modifier le modèle utilisé et la fonction de coût sans pour autant toucher à l'algorithme lui-même.

La durée nécessaire pour l'évaluation de n'importe quelle fonction de coût  $C(x)$  exclut le recuit simulé (pour lequel, si  $x_1$  et  $x_2$  sont deux points admissibles, et si  $C(x_1)$  est connu, il est intéressant d'avoir une évaluation de  $C(x_2)-C(x_1)$  en un temps  $O(1)$ ) de même que la méthode tabou (connaissance d'un gradient nécessaire). Il nous reste l'algorithme génétique. C'est finalement cette méthode que nous allons utiliser.

## 4.2. Optimisation par algorithme génétique

### 4.2.1. Algorithme génétique : description, mise en œuvre

Les algorithmes génétiques<sup>49</sup> forment une famille d'algorithmes d'optimisation stochastique inspirés par les théories de l'évolution biologique. Ces algorithmes codent une solution potentielle à un problème spécifique en une structure de données apparentée à un "chromosome". Ils appliquent des opérateurs de recombinaison (croisement, mutation) à une population de ces structures de manière à sélectionner et préserver l'information intéressante

---

<sup>49</sup> [Goldberg 89]

en la transmettant aux générations suivantes. La fonction à minimiser qui permet d'évaluer chaque individu (alors appelée *fitness*) n'a besoin d'être ni continue ni dérivable.

Nous cherchons à savoir dans quelle mesure un tel algorithme est applicable à notre problème. C'est pourquoi il nous semble important d'insister sur les choix effectués pour déterminer les paramètres de l'algorithme et de garder un regard critique sur le résultat numérique trouvé. Ne perdons pas de vue que le scénario d'évolution de consigne de puissance choisi pour l'optimisation est arbitraire. Rien ne garantit que la qualité de la solution sera préservée dans d'autres conditions. Néanmoins il sera intéressant d'analyser les résultats obtenus sur ce scénario précis, d'évaluer ce qui a été gagné par rapport à l'existant, et d'utiliser par la suite la fonction  $F$  optimale sur d'autres évolutions de la consigne de puissance pour tester la robustesse de notre solution.

Le vocabulaire que nous emploierons dans la suite de ce mémoire découle naturellement du domaine biologique de la génétique. Nous ne préciserons ces termes que quand cela sera nécessaire.

#### **4.2.2. Différents choix effectués**

##### a) Codage des individus

Chaque individu (ensemble de paramètres caractérisant une solution potentielle) est codé sous forme d'un tableau de  $n$  entiers  $g_i$  ( $1 \leq i \leq n$  ;  $n$  étant le nombre de paramètres de la fonction à optimiser). Un domaine de recherche pour chaque paramètre  $\beta_i$  est défini : une borne supérieure  $L_i$  et une borne inférieure  $l_i$ . Chaque entier  $g_i$  est compris entre 0 et  $2^m - 1$ . Le choix de  $m$  qui caractérise la précision souhaitée sur les paramètres résulte d'un compromis entre la détermination de domaines de recherche petits (localisation de la solution) et le temps de calcul. Chaque gène est codé sur  $m$  bits, chaque bit étant un "allèle" du gène. La formule de passage des gènes  $g_i$  aux paramètres  $\beta_i$  est :

$$\beta_n = l_n + g_n \frac{L_n - l_n}{2^m - 1} \quad (3.52)$$

##### b) Choix de la population initiale

L'idéal serait de trouver une méthode garantissant que la population initiale choisie aléatoirement recouvre uniformément le domaine de recherche. En coupant en deux le domaine de recherche de chaque gène, on définit  $2^n$  hypercubes. La population est générée aléatoirement telle que chaque hypercube contient au plus 2 individus. Cette répartition, même si elle n'est pas parfaite, a donné de bons résultats.

L'algorithme laisse aussi la possibilité d'incorporer à la population initiale des individus déjà connus et donnant de bons résultats (attention quand même à ne pas favoriser artificiellement une zone du territoire, car on risque de se retrouver cantonné dans un minimum local)<sup>50</sup>.

Dans la suite, les noms en italique sont les noms donnés aux variables dans les programmes C.

*c) Politique de croisement*

Chaque individu a une probabilité d'être sélectionné en vue d'une reproduction qui est inversement proportionnelle à la fonction à minimiser. Afin de ne pas prendre le risque de favoriser un "super-individu" au détriment de l'exploration d'autres secteurs (surtout dans notre cas, la fonction de pénalisation étant arbitrairement grande à cause du coefficient  $K^{51}$ ), on procède à un rééquilibrage. On pose  $F=1/\text{coût}$  (le coût n'est jamais nul). On cherche donc à maximiser  $F$ . L'idée est de construire par transformation linéaire de  $F$  une fonction  $F'$  dont la moyenne sur la population courante sera celle de  $F$  et dont le maximum vaudra  $\text{press\_select} * F_{\text{moyen}}$ ,  $\text{press\_select}$  étant une constante appelée pression sélective ( $\text{press\_select} > 1$ ). La probabilité de chaque individu  $k$  de se reproduire sera prise proportionnelle à  $F'(k)$  : les meilleurs individus sont alors « raisonnablement » favorisés.

Au total,  $\text{nb\_crois}$  individus sont sélectionnés en couples<sup>52</sup> et donnent naissance à deux enfants qui sont des croisements des chromosomes des parents. Le croisement est aléatoirement choisi entre les deux croisements suivants:

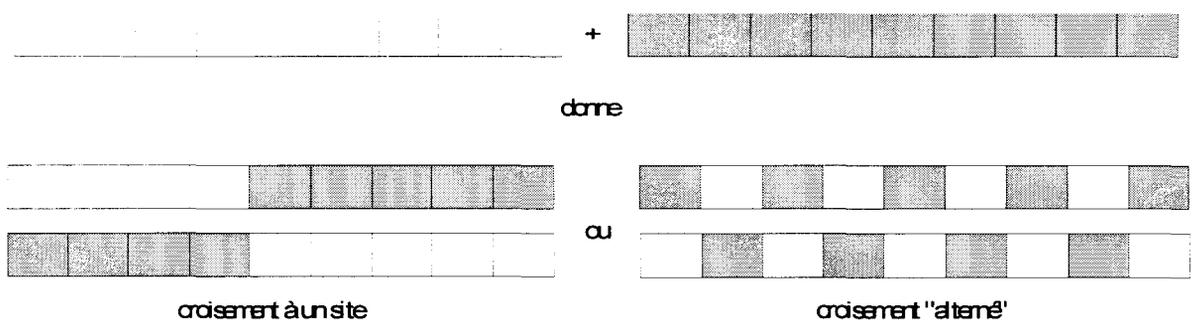


Fig. 3.21 Description des croisements possibles

<sup>50</sup> Cette possibilité n'est pas utilisée pour l'optimisation. Si on cherche, dans l'avenir, à optimiser un scénario proche d'un autre pour lequel on a déjà une solution, on pourra inclure cette dernière dans la population initiale pour accélérer l'optimisation.

<sup>51</sup> Cf. Chapitre 3 : 4.1.2.d) Partie qualité de  $T_{\text{moy}}$ ,  $\Delta I \eta$  et  $\eta_{\text{ref}}$ , p.87

<sup>52</sup> On interdit deux fois le même individu dans un couple et deux fois le même couple.

Il est important de noter que le croisement se fait au niveau du gène  $g_n$  et non au niveau de l'allèle. En pratique, nous travaillons au niveau des tableaux d'entiers représentant les chromosomes.

La stratégie de croisement est choisie au hasard (équiprobabilité entre les deux possibilités décrites ci-dessus), ainsi que le site de croisement si la première stratégie est sélectionnée. On construit ainsi  $nb\_crois$  enfants.

d) Politique de mutation

La mutation s'effectue au niveau du bit sur la population *enfants* construite après croisement. Chaque bit constituant chaque individu de la population *enfants* a une probabilité  $pm$  de subir une mutation. Comme chaque bit a la possibilité de muter, il est possible qu'un individu mutant ait subi plus qu'une mutation.

e) Politique de renouvellement de population

La sélection des individus pour la nouvelle population se fait parmi tous les individus de l'ancienne génération (enfants et parents) selon la fonction de coût. Les meilleurs individus sont sélectionnés.

f) Test d'arrêt de l'algorithme

Comme il est difficile d'évaluer la convergence de l'algorithme (optimum global ou local). On choisit de laisser évoluer l'algorithme jusque  $Nb\_generations$  itérations ce qui garantit le temps de calcul.

### **4.2.3. Influence des paramètres**

Cinq paramètres apparaissent:

- la taille de la population parents (*population*) ;
- la taille de la population enfants (*nb\_crois*) ;
- le nombre de générations (*Nb\_generations*) ;
- la probabilité de mutation ( $pm$ ) ;
- la pression sélective (*press\_select*).

Nous avons tenté d'évaluer sur des exemples l'influence de ces paramètres sur les résultats de l'optimisation.

Il est d'abord évident que les paramètres *population*, *nb\_crois* et *Nb\_generations* doivent être les plus grands possibles. Cependant, vu les temps de simulation, il faut trouver un

compromis. Il n'existe pas de règles bien définies permettant de fixer ces paramètres. Afin de permettre une évolution significative, nous choisirons *Nb\_generations* supérieur ou égal à 30. Nous choisissons arbitrairement d'avoir *nb\_crois* légèrement supérieur à *population* ce qui permet un bon mélange des individus entre chaque génération.

Il reste à regarder l'influence des paramètres *pm* et *press\_select*. Si le taux de mutation *pm* est trop fort, on se rapproche d'une recherche purement stochastique de l'optimum ; par contre s'il est trop faible, on prend le risque de tomber dans un optimum local. La fonction à optimiser étant très non-linéaire, nous avons choisi d'opter pour une probabilité de mutation assez forte, telle qu'en moyenne un individu sur cinq mute<sup>53</sup>. De cette façon, on espère ne pas tomber dans un optimum local, la mutation apportant une diversité génétique suffisamment forte.

L'influence du paramètre *press\_select* est, elle aussi, importante. On a tenté de l'illustrer sur deux exemples (avec *population=nb\_crois=80*):

- dans un premier calcul, nous fixons sa valeur à 1.1. Nous obtenons au bout de 15 générations, 58 individus différents dans la population.
- dans un second calcul d'optimisation, avec la même population initiale que dans le premier cas, nous fixons sa valeur à 2.0. Au bout du même nombre de générations, nous n'avons que 41 individus différents dans la population.

Les calculs d'optimisation ont donc été effectués avec *press\_select* fixé à 1.2.

## 5. RESULTATS DE L'OPTIMISATION

Les paramètres suivants sont communs à toutes les optimisations :

- 8 bits par gène,
- probabilité de mutation par individu : 0.2,
- croisement des chromosomes choisi équiprobablement entre alterné ou à un site,
- pression sélective : 1.2.

Les autres paramètres sont fonction du générateur de référence.

---

<sup>53</sup> Ici le test de mutation est fait pour chaque bit. La probabilité de mutation d'un individu étant déterminée, la probabilité de mutation d'un bit dépend du nombre de bits par individu. Elle variera en fonction du nombre de paramètres à optimiser.

Tableau 3-I Paramètres d'optimisation

	<i>Générateur de réf. statique</i>	<i>Générateur de réf. Dynamique</i>
<b>Nb gènes par individu</b>	12	22
<b>Taille de la population</b>	100	120
<b>Nombre d'enfants</b>	120	140
<b>Nombre de générations</b>	37	60
<b>Prob. de mutation par bit</b>	0.0021	0.0013

Au cours de l'optimisation pour le générateur de référence dynamique, 4540 évaluations ont été faites, contre 8520 pour le générateur dynamique. Cela correspond respectivement à 2 et 4 jours de calcul.

### 5.1. Scénario 1

**NOTA : l'optimisation du générateur de référence dynamique est représenté en clair, l'optimisation du générateur de référence statique en foncé**

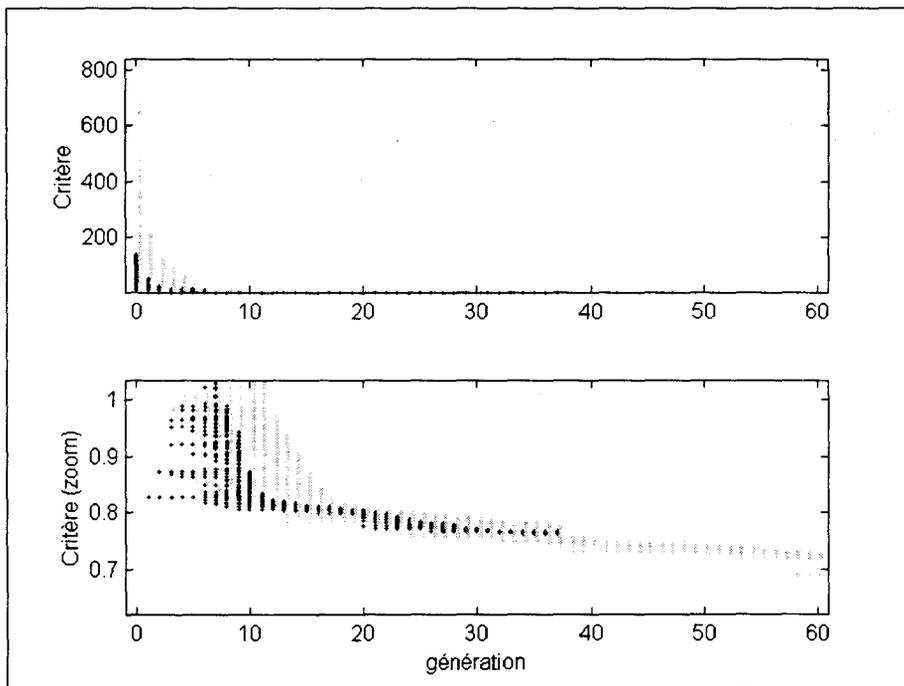


Fig. 3.22 Evolution du critère, scénario 1

Partant d'une population choisie aléatoirement, l'algorithme génétique fait évoluer les individus pour faire baisser le critère. Il rejette rapidement tous les individus mauvais et progresse avec une population d'individus dont le critère est semblable.

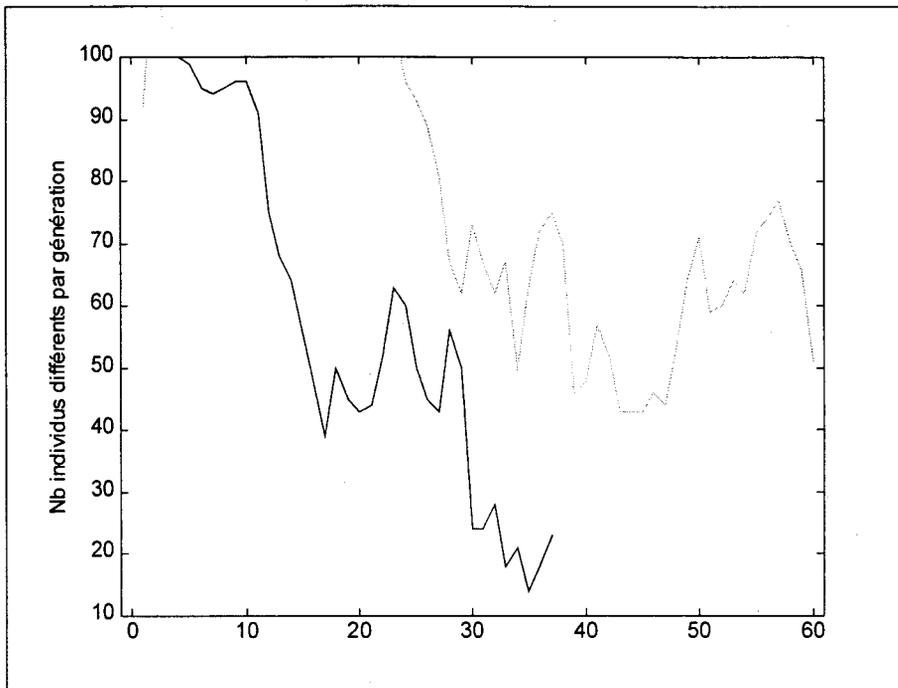


Fig. 3.23 Evolution du nombre d'individus différents au cours de l'optimisation

Avec un nombre d'individus différents inférieur à 20, l'algorithme génétique est proche du blocage vers la 35<sup>ème</sup> génération pour le générateur statique.

### 5.2. Scénario 2

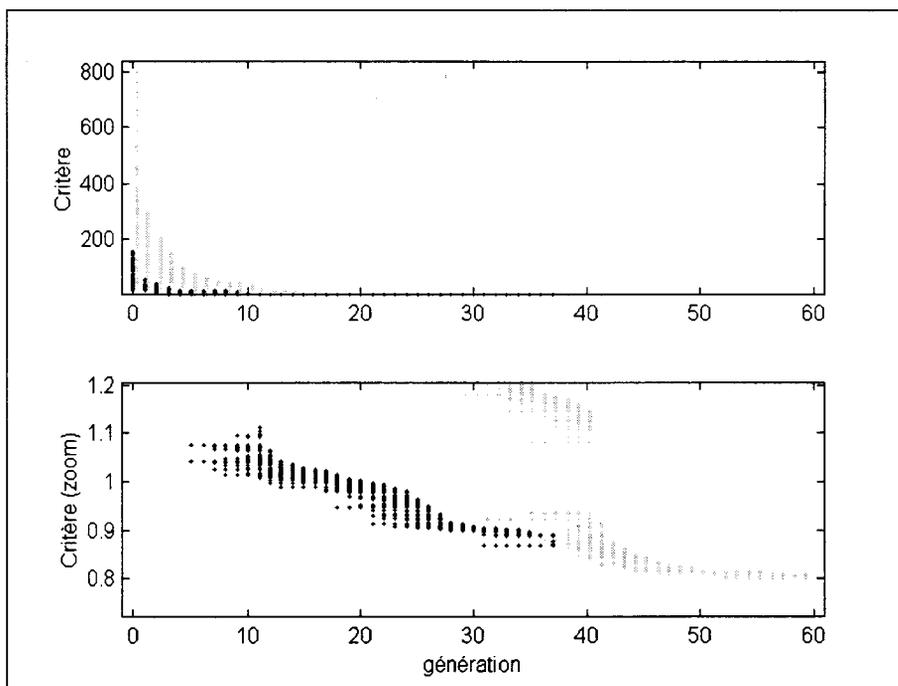


Fig. 3.24 Evolution de la population (critère)

On remarque une progression « continue » et par sauts très visibles.

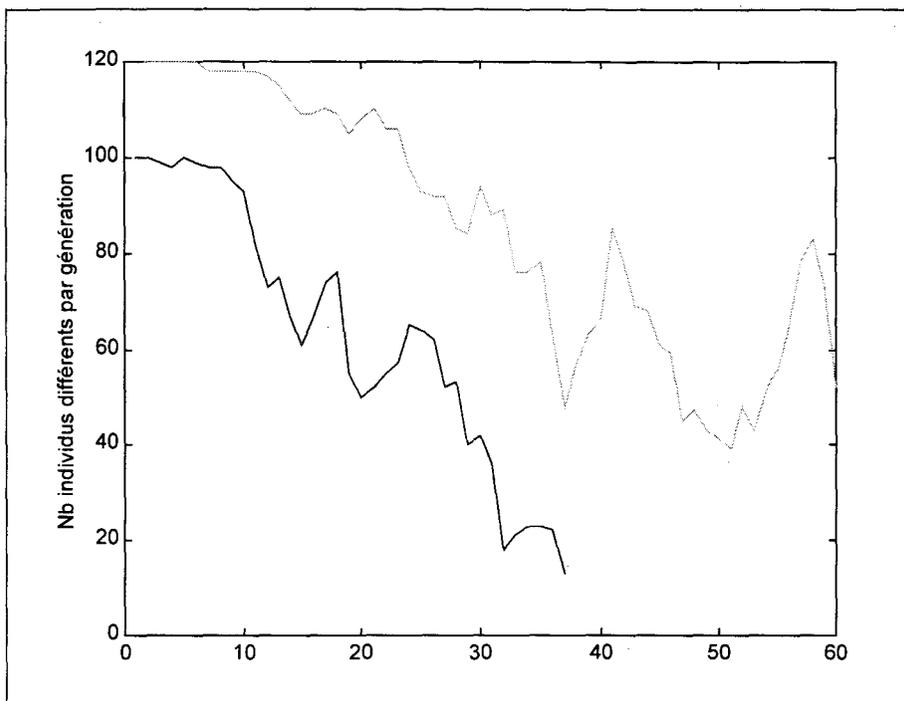


Fig. 3.25 Evolution du nombre d'individus différents par génération

Le nombre d'individus différents par génération reflète la diversité génétique. Plus le nombre d'individus est grand plus il est possible de combiner des solutions différentes pour faire évoluer le critère. Quand il n'y a plus qu'un type d'individu, l'algorithme ne peut progresser que grâce à la mutation. Dans un cas général, on ne peut savoir si le résultat de l'algorithme est un optimum local ou global. Lorsque le critère n'évolue plus pendant de nombreuses générations, les présomptions d'optimum global sont renforcées si la population est constituée d'un grand nombre d'individus différents. Avec une sélection des meilleurs individus et la possibilité d'avoir plusieurs individus identiques, il est normal que l'algorithme converge vers une population constituée d'un seul type d'individu.

Pour le générateur de références statique, le nombre d'individus différents est largement réduit à la fin de l'optimisation ce qui laisse présumer d'un optimum. Il baisse principalement après la 10<sup>ème</sup> génération (après le "saut"). Les deux générateurs ont un critère semblable quand l'optimisation du générateur statique s'arrête. Comme le nombre d'individus est relativement bas et que l'optimisation semble progresser relativement lentement, on peut penser que le critère n'aurait pas continué à baisser beaucoup<sup>54</sup>.

<sup>54</sup> Une optimisation plus longue a été lancée qui confirme cette supposition. Au bout de 70 générations, la progression du critère depuis la 37<sup>ème</sup> génération est de 0.14 % ce qui est négligeable.

Pour le générateur dynamique, le nombre d'individus différents baisse globalement jusqu'à la trentième génération. Après chaque progression du critère, le nombre d'individus différents augmente tandis qu'il baisse si le critère ne progresse plus. Le plus grand nombre de gènes du générateur dynamique est sans doute la cause de la plus grande diversité.

#### 5.3. Amélioration de l'optimisation

En dehors des paramètres *nb\_generation*, *nb\_crois* et *population*, qui sont très demandeurs en temps de calcul, il est possible d'améliorer l'algorithme de deux façons.

La première façon consiste en l'élaboration d'une probabilité de mutation variant selon le nombre d'individus différents. On voit que, pour l'optimisation du générateur statique, le nombre d'individus différents passe sous 20 et qu'on s'approche d'une situation bloquée. Si le nombre d'individus différents vient à trop baisser on peut augmenter la mutation pour augmenter la diversité et débloquer ainsi l'algorithme.

La deuxième façon consiste à faire un zoom ([Sellami 98]). L'algorithme a été mis en œuvre dans le principe : à partir d'une solution précédemment trouvée, on a rétréci le domaine de recherche et lancé l'optimisation sur ce domaine réduit avec un petit nombre de générations, ce qui correspond à une étape de l'algorithme. De cet essai deux remarques peuvent être faites :

- le critère a progressé de façon insignifiante au cours des huit générations. On est donc en mesure de penser que le domaine de recherche établi précédemment et le nombre d'octets pour définir chaque paramètre ont été choisis judicieusement ;
- certains paramètres ont évolué vers les frontières de leur domaine au cours de l'optimisation. Une simple démarche de réduction des frontières n'est donc pas suffisante, il faut faire des études de sensibilité des solutions par rapport aux paramètres ce qui est un surcroît de temps de calcul puisque l'algorithme génétique ne le demande pas.

### CONCLUSION

La détermination de références pour les variables commandées a mené à la conception d'un régulateur de la concentration en bore et à l'élaboration d'un générateur de références pour les autres variables commandées.

Le régulateur de la concentration en bore prend en compte une référence calculée à partir des autres valeurs de référence et indépendamment du régulateur de la centrale ; ce régulateur, à référence donnée, minimise les effluents.

### *Amélioration des performances*

Faisant l'hypothèse d'un régulateur parfait, un générateur de références a été conçu d'après un modèle de la centrale réduit à un état. Pour en optimiser les paramètres, on a proposé un critère prenant en compte les diverses qualités souhaitées de la solution (faible sollicitation des actionneurs, non-compensation du régulateur, coordination des valeurs de référence, respect des domaines). Un algorithme génétique a été mis en place ; l'analyse de son comportement lors de l'optimisation montre que celui-ci est acceptable.



# CHAPITRE 4 :

## RESULTATS ET INTERPRETATION

### INTRODUCTION

De nouvelles références pour les variables commandées du cœur ont été élaborées puis optimisées. Ces nouvelles références sont testées sur le code SIROP. Les résultats sont présentés puis analysés dans la première partie de ce chapitre.

La deuxième partie concerne la vérification de la robustesse des nouvelles références aux perturbations de la consigne de puissance ainsi qu'aux changements de palier et de pente.

### 1. RESULTATS ET INTERPRETATION SUR LES SCENARIOS TESTS

Nous introduisons d'abord quelques notations et rappels puis les résultats des optimisations.

Puis les résultats issus de Laura sont comparés à ceux du modèle numérique.

Le rôle et l'influence des différentes valeurs composant le critère sont ensuite examinés.

Enfin le comportement des variables commandées avec leurs valeurs de référence est étudié.

#### 1.1. Notations, Rappels et Résultats

##### 1.1.1. Différentes borications-dilutions et différents régulateurs

On caractérise les types de pilotages par deux éléments : le style de borication-dilution et le régulateur.

Il existe trois types de borication-dilution :

- la borication-dilution dite idéale (*Bor id*) car compensant idéalement la variation d'antiréactivité due au xénon ;
- la borication-dilution établie manuellement (*Bor man*). Nous choisissons celles qui ont été établies par les personnes ayant conçu le régulateur multivariable pour les scénarios d'optimisation. Ce sont des borications-dilutions approximatives qui respectent les contraintes de sûreté ;

- la borication-dilution automatique (*Bor auto*) résultant de la mise en œuvre de la régulation présentée au *Chapitre 3 : 2 « Régulation de la concentration en bore »*, p. 56.

Les différents régulateurs sont :

- le régulateur d'origine conçu par Framatome (*Fra*) ;
- le régulateur multivariable de la DER avec les références identiques à celles de Framatome (*Mult fra*) ;
- le régulateur multivariable avec les références résultant d'une optimisation du générateur de référence statique (12 paramètres) (*Mult opt stat*) ;
- le régulateur multivariable avec les références résultant d'une optimisation du générateur de référence dynamique (21 paramètres) (*Mult opt dyn*).

Le régulateur multivariable optimisé ne sera testé qu'avec la borication-dilution automatique, car c'est avec elle qu'il a été optimisé. Les autres régulateurs seront testés avec les trois types de borication-dilution.

Afin d'établir des comparaisons, nous prendrons comme référence le régulateur *Mult fra* avec la régulation qui a servi à sa conception : la borication-dilution manuelle (*Bor man*). La rangée du scénario de référence est légèrement grisée.

### 1.1.2. Scénarios de test

L'optimisation est faite sur les deux scénarios définis en Fig. 2.35 (p. 44).

### 1.1.3. Rappel des termes constituant le critère d'optimisation

Le critère d'optimisation  $C$  est une fonction (3.45) de 4 termes<sup>55</sup> :

- $\xi$ , une mesure du déplacement des grappes.  $\xi$  de référence vaut 1/1.05 ;
- $\zeta$ , le rapport du volume des effluents du scénario considéré sur celui du scénario de référence ;
- $\varphi$ , une mesure de la coordination et de la non-compensation du régulateur ;
- $\psi$ , une mesure du centrage des variables commandées dans leur domaine admissible.

---

<sup>55</sup> cf. équation (3.45), p. 85

1.1.4. Tableaux de résultats des scénarios tests

Tableau 4-I Résultats du scénario 1

	$\xi$	$\zeta$	$\varphi$	$\psi$	C	Gain grappes	Gain bore
Fra Bor id	0.84	0.83	1.58		21.41	-12.12	-17.12
Mult fra Bor id	0.91	0.83	2.75		33.45	-4.19	-17.42
Fra Bor man	0.80	1.00	0.94	0.51	0.79	-15.49	0.00
Mult fra Bor man	0.95	1.00	1.07	0.62	0.89	0.00	0.00
Fra Bor auto	0.75	1.34	1.08	0.46	0.87	-21.14	33.70
Mult fra Bor auto	0.82	1.34	1.30	0.71	0.99	-14.30	33.81
Mult opt stat Bor auto	0.75	1.05	1.32	0.59	0.88	-21.14	5.10
Mult opt dyn Bor auto	0.73	0.93	1.43	0.46	0.86	-23.59	-7.32

Tableau 4-II Résultats du scénario 2

	$\xi$	$\zeta$	$\varphi$	$\psi$	C	Gain grappes	Gain bore
Fra Bor id	0.94	0.81	5.87		97.05	-1.16	-18.77
Mult fra Bor id	0.82	0.80	3.58		50.13	-13.67	-19.41
Fra Bor man	0.81	0.99	0.76		2.48	16.04	-11.46
Mult fra Bor man	0.95	1.00	1.18		3.26	0.00	0.00
Fra Bor auto	0.70	1.11	0.92	0.58	0.79	-26.88	11.01
Mult fra Bor auto	0.77	1.11	1.57		14.15	-19.02	11.16
Mult fra Bor auto bb	0.77	1.08	4.84		11.82	-19.21	8.00
Mult opt stat Bor auto	0.77	1.01	1.16	0.66	0.86	-19.66	1.03
Mult opt dyn Bor auto	0.76	0.99	1.17	0.60	0.84	-20.57	-0.50

Le critère traduit un compromis entre différentes exigences. Il a été conçu pour permettre de comparer automatiquement des solutions et pour que l'algorithme converge vers une solution acceptable. Pour comparer les divers types de pilotage, il n'est pas suffisant de comparer seulement le critère. Plusieurs pilotages peuvent avoir des critères semblables mais un examen des parties du critère révèle des résultats tout à fait différents.

1.2. Comparaison avec le modèle numérique

Il est intéressant de comparer les résultats du modèle numérique avec lequel on a fait les optimisations avec les résultats obtenus sur SIROP. Pour le scénario 2 les résultats sont bons,

en revanche pour le scénario 1, l'optimisation fait baisser le critère sensiblement et les résultats sur SIROP font baisser également le critère mais dans une bien moindre mesure.

Tableau 4-III Comparaison des résultats suite aux optimisations

	Sc1			Sc2		
	Fra	Stat	Dyn	Fra	Stat	Dyn
Modèle numérique	0.87	0.76	0.69	3.56	0.87	0.80
SIROP	0.89	0.88	0.86	3.26	0.86	0.84

En limitant l'étude des parties du critère au scénario 1, on obtient le taux d'erreur moyen sur les trois pilotages :

- $\xi$  : 3 % ;
- $\zeta$  : 0.6 % ;
- $\varphi$  : 27 %
- $\psi$  : 6.7 %

L'erreur due à la non-compensation et à la coordination est la plus forte avec 27 % en moyenne mais les autres sont relativement précises. Cela est dû au  $\Delta I$  qui n'est pas bien représenté dans le modèle numérique.

### 1.3. Centrage $\psi$

La valeur de  $\psi$  joue un rôle capital car si elle est supérieure à 1 une des variables commandées sort de son domaine admissible. Le pilotage doit donc être rejeté. La case correspondante est grisée.

Pour le scénario 1, la borication dite idéale se trouve écartée à cause de  $\psi$  pour les deux régulateurs.

Pour le scénario 2, seuls quelques types de pilotage maintiennent  $\psi$  inférieur à 1. Les borications-dilutions idéale et manuelle sont rejetées. Le régulateur *Mult fra* est aussi écarté quelle que soit la borication-dilution utilisée.

### 1.4. Rôle de $\varphi$

$\varphi$  offre peu d'intérêt après l'optimisation. C'est un artifice pour permettre d'atteindre lors de l'optimisation deux qualités recherchées pour les références :

- la non-compensation du régulateur,
- la coordination.

On remarque que parmi les solutions acceptables, plus le pilotage est sophistiqué (borication automatique, régulateur optimisé), plus cette partie du critère est mauvaise. En comparant (scénario 1) *Fra Bor man* (le critère le plus faible et le meilleur  $\varphi$ ) et *Mult dyn Bor auto* (les meilleurs gains sur les actionneurs et le moins bon  $\varphi$ ) il apparaît que pour gagner sur les actionneurs, il faut "forcer" le régulateur : lui donner des références qu'il a du mal à suivre<sup>56</sup>.

Dans le cas de l'optimisation dynamique au scénario 1, la valeur de 1.43 signifie que les qualités recherchées sont approchées mais pas tout à fait atteintes : le régulateur a du mal à atteindre les valeurs de référence. Cette valeur de 1.43 pénalise lourdement le critère ce qui justifie le rôle de  $\varphi$ .

Une valeur  $\varphi$  nulle serait la preuve d'un régulateur parfait ; un gain maximum sur les actionneurs serait la preuve de références optimales. La présence simultanée du meilleur gain sur les actionneurs et du plus mauvais  $\varphi$  montre que ce sont les références qui font réagir le régulateur dans le bon sens<sup>57</sup>. En effet, l'hypothèse d'un excellent régulateur prenant le meilleur parti de références même mauvaises implique qu'avec de meilleures références il donnerait des résultats encore meilleurs. Comme l'optimisation n'a pas su trouver ces meilleures références, cette hypothèse ne peut être faite.

Le faible poids de  $\Delta I_{ref}$  sur le régulateur est à l'origine de l'idée de coordination des variables (le deuxième rôle de  $\varphi$ ). Sans  $\varphi$ , il résulte de l'optimisation un  $\Delta I_{ref}$  très largement hors du domaine admissible. Ceci a pour effet de solliciter beaucoup le régulateur pour le faire réagir afin de maintenir  $\Delta I$  dans son domaine, ce qui n'est pas acceptable. D'où l'idée de coordonner les autres valeurs de référence ( $T_{ref}$  et  $\eta_{ref}$ ) pour permettre au régulateur d'atteindre  $\Delta I_{ref}$ . Il est malheureusement difficile de déterminer dans quelle mesure  $\varphi$  a incité ces valeurs à se coordonner.

---

<sup>56</sup> Ceci est moins flagrant sur le scénario 2 pour lequel toutes les valeurs acceptables semblent plus regroupées.

<sup>57</sup> Elles compensent donc légèrement le régulateur, mais de façon acceptable au sens du critère : malgré cette valeur élevée, celui-ci reste bon.

1.5. Gains sur les actionneurs

Tableau 4-IV Scénario 1, gains sur les actionneurs

Scénario 1		Fra	fra	Hinf opt stat	opt dyn
Bor id	Gain bore		17%		
	Gain grappes		4%		
Bor man	Gain bore	0%	0%		
	Gain grappes	-15%	0%		
Bor auto	Gain bore	34%	34%	5%	-7%
	Gain grappes	-21%	-14%	-21%	-24%

Tableau 4-V Scénario 2, gains sur les actionneurs

Scénario 2		Fra	fra	Hinf opt stat	opt dyn
Bor id	Gain bore	19%	20%		
	Gain grappes	1%	14%		
Bor man	Gain bore	1%	0%		
	Gain grappes	15%	0%		
Bor auto	Gain bore	11%	11%	1%	-1%
	Gain grappes	-27%	19%	-20%	-21%

Dans le tableau ci-dessus, les valeurs sont les écarts rapportés en pour-cent par rapport au scénario de référence. Une valeur négative signifie un gain.

Pour le bore, la borication-dilution idéale est rejetée<sup>58</sup>. La borication-dilution automatique comparée à la borication manuelle (à références identiques) génère plus d'effluents mais économise les grappes. Il est difficile d'obtenir les coûts réels d'utilisation des actionneurs et donc de départager les deux borications-dilutions sur un plan économique. Pour le critère d'optimisation, le choix arbitraire a été fait de privilégier un gain sur les grappes, mais ici on ne peut pas dire quelle borication-dilution est la plus économique.

L'optimisation des références permet de diminuer notablement le volume des effluents dans les deux scénarios. Dans les deux scénarios, *Mult dyn* est le meilleur des régulateurs multivariable, ce qui semble normal puisque l'optimisation est faite avec un plus grand nombre de degrés de liberté. Le régulateur est largement supérieur à tous les autres pilotages pour le scénario 1. Les trois pilotages du scénario 2 satisfaisant les domaines admissibles sont globalement équivalents.

<sup>58</sup> cf. Chapitre 4 : 1.1 , p. 101

Le régulateur multivariable sollicite plus les actionneurs que le régulateur Framatome à références identiques, mais il est à son avantage en cas de références optimisées.

#### **1.6. Explication des performances réduites du régulateur multivariable par rapport au régulateur Framatome à références identiques**

Les références Framatome sont conçues pour le régulateur Framatome. Elles ne sont pas initialement prévues pour le régulateur multivariable. Il n'est donc pas étonnant que le régulateur multivariable se comporte moins bien que le régulateur Framatome avec ces références. En revanche, avec des références élaborées pour lui, le régulateur multivariable est au moins aussi performant que le régulateur Framatome. Comme il a été conçu sans prendre en compte l'action du bore, une nouvelle synthèse prenant en compte cet élément améliorerait certainement ses performances.

#### **1.7. Comparaison des variables commandées du cœur**

Il est intéressant d'aller au delà des résultats numériques et analyser les différences de comportement des variables commandées du cœur et des actionneurs entre le pilotage de référence (*Mult fra Bor man*) et le pilotage obtenu après optimisation du générateur de référence (*Mult dyn Bor auto*).

**NOTA : Dans tous les schémas qui suivent, les valeurs actuelles (fra) sont en clair, les valeurs après optimisation en foncé; en trait tireté les références, en trait plein les variables commandées.**

1.7.1. Scénario 1

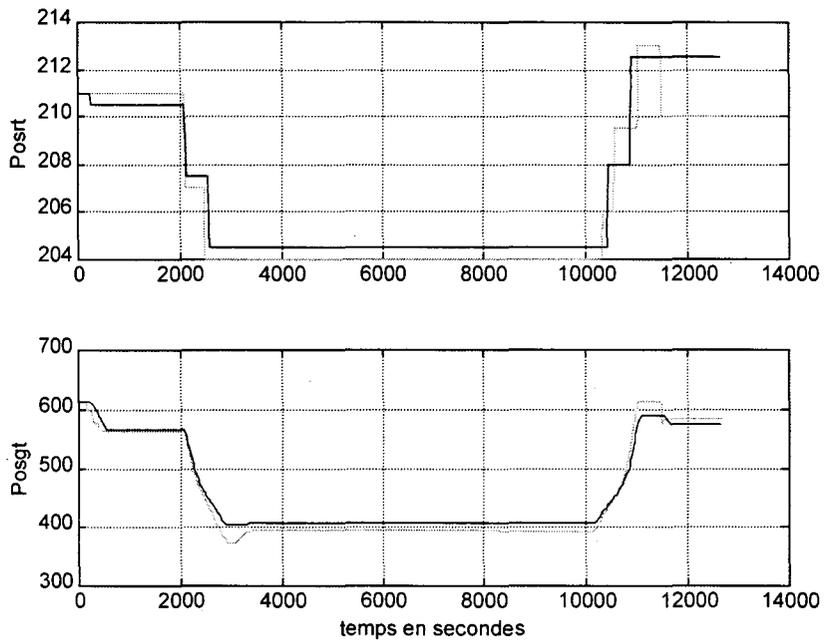


Fig. 4.1 Positions des groupes R et G

Le chemin parcouru par les groupes est moindre parce que les dépassements dus aux transitions (3 000 s et 11 000 s) sont gommés et que les groupes descendent moins.

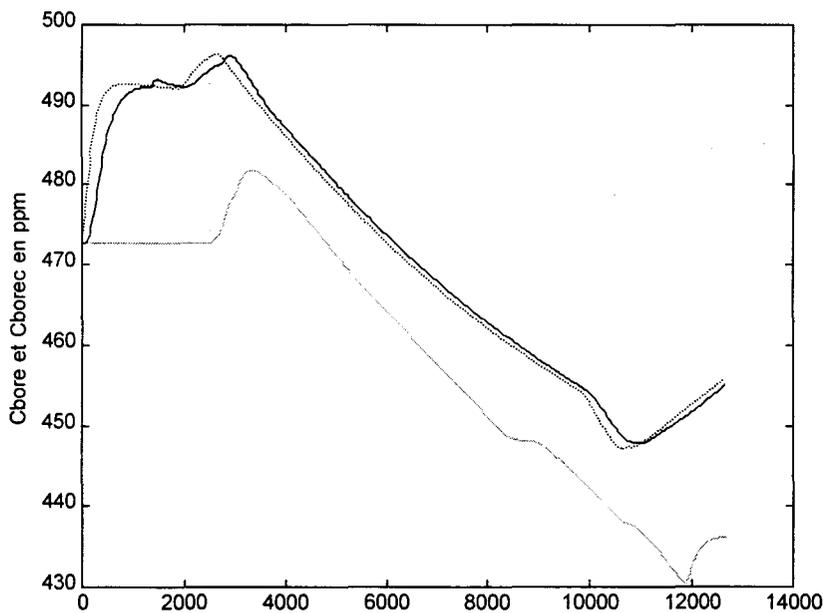


Fig. 4.2 Concentrations en bore

NOTA : Pour la borication-dilution manuelle, il n'y a pas de concentration de référence.

### Résultats et interprétation

La concentration en bore suit la nouvelle référence fournie avec 240 s d'avance. Les changements de pente se font plus tôt pour les nouvelles références. L'augmentation du volume des effluents est due à la hausse de la concentration en bore résultant de la baisse de la température de référence. La baisse entre 4 000 s et 10 000 s est due à la compensation du xénon dont la concentration augmente au cours du palier bas.

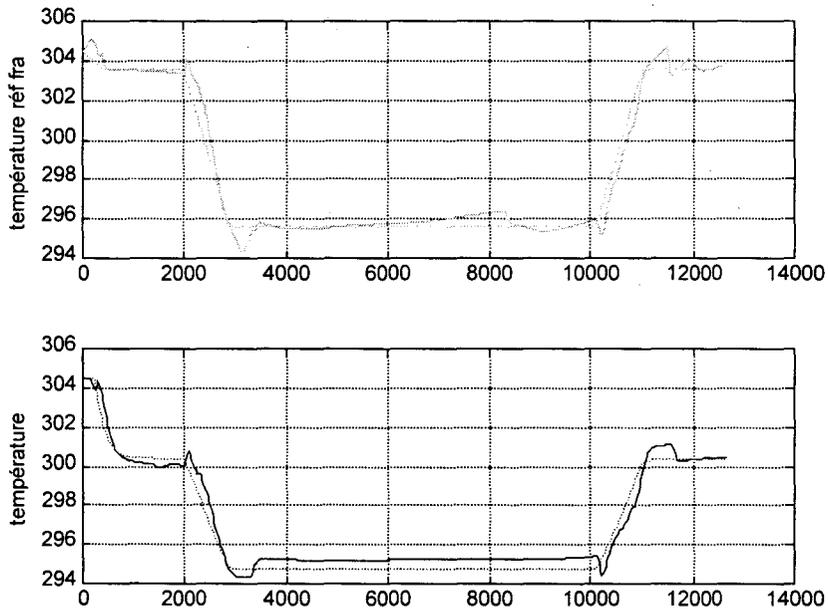


Fig. 4.3 Evolution des températures de référence et moyenne au cours du temps

Avec la borication manuelle, pendant le palier à 50 % de puissance, la compensation de la variation d'antiréactivité due au xénon est moins bonne qu'avec la borication automatique. Cela cause l'augmentation de la température moyenne, celle-ci baisse vers 8 000 s quand les groupes G s'enfoncent.

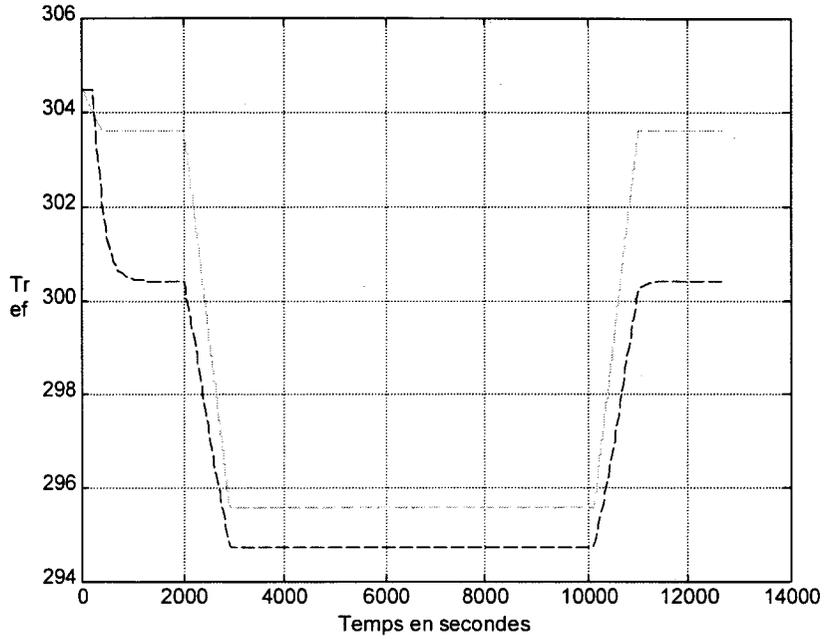


Fig. 4.4 Comparaison des températures de référence en fonction du temps

Il existe un net décalage de la température à 95 % de puissance. De ceci résulte une variation moins rapide de la température pour atteindre le palier de 50 %. La nouvelle référence est plus "arrondie".

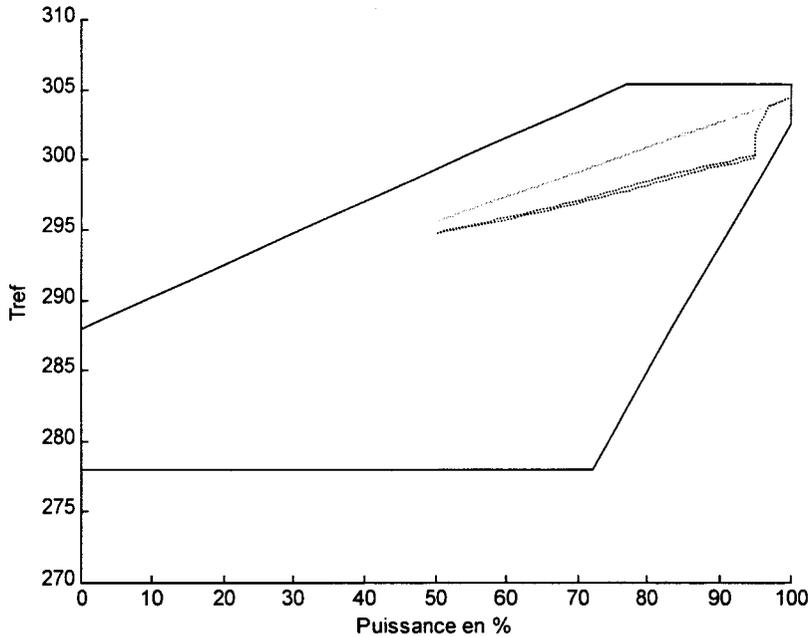


Fig. 4.5 Températures de référence selon la puissance

## Résultats et interprétation

La principale différence consiste en la baisse de la température à 95 % de puissance qui rejoint la température actuelle vers les faibles puissances.

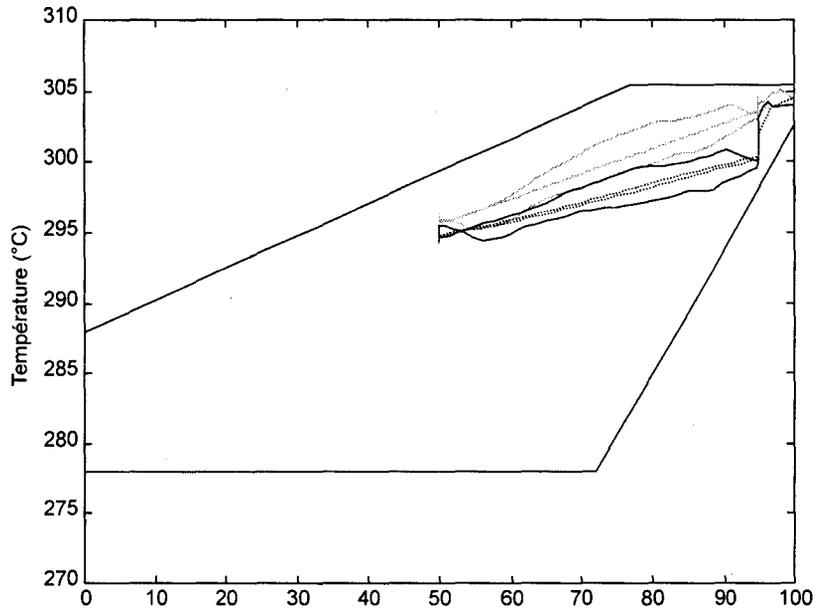


Fig. 4.6 Evolution des températures selon la puissance

Cette figure donne peu d'indication sur le comportement des températures pendant les paliers. Pendant les transitoires, la température est bien tenue par le régulateur.

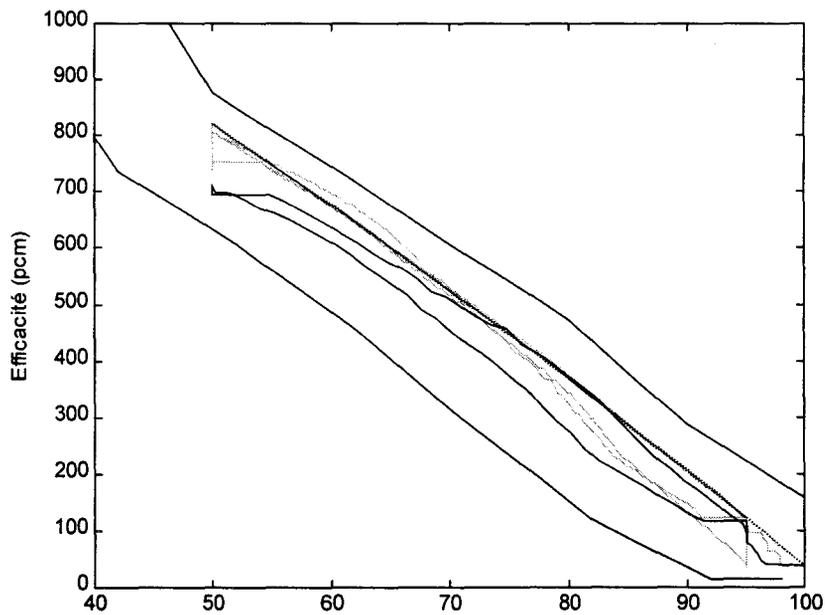


Fig. 4.7 Efficacités selon la puissance

Bien que les deux efficacités de références soient presque confondues, la nouvelle efficacité s'éloigne de la référence à basse charge mais varie beaucoup moins pendant le palier.

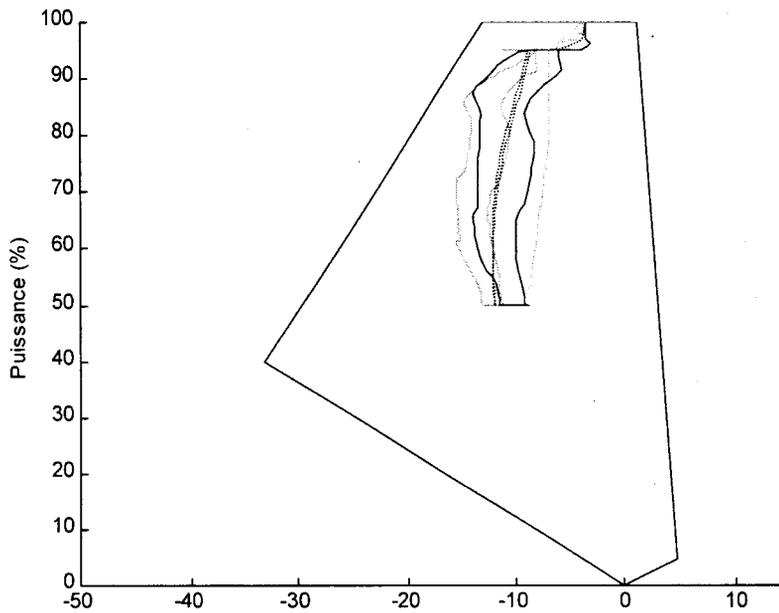


Fig. 4.8 Diagramme Puissance- $\Delta I$

Le nouveau  $\Delta I_{ref}$  est décalé vers la gauche du diagramme, mais le nouveau  $\Delta I$  est plus au centre du diagramme que l'ancien. Cela est sans doute dû à la coordination des références. En fin de remontée de charge, alors que l'ancien  $\Delta I$  part vers la gauche vers la frontière du domaine, le nouveau  $\Delta I$  revient vers le centre ce qui est très positif.

1.7.2. Scénario 2

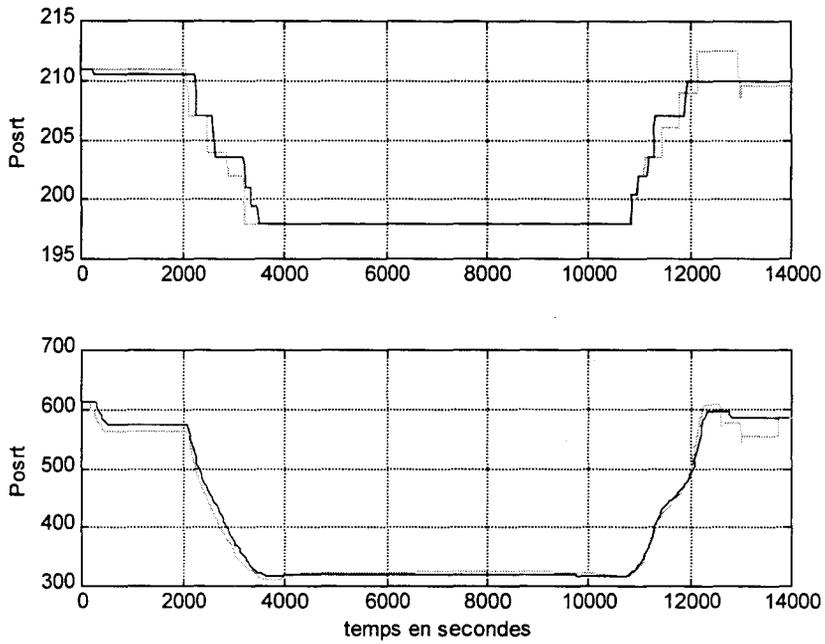


Fig. 4.9 Positions des groupes noirs et gris

Les dépassements et oscillations des groupes R et G ont été gommées comme pour le scénario 1. De même les groupes G bougent pendant le palier pour compenser une variation de la température due à une mauvaise compensation du xénon par le bore.

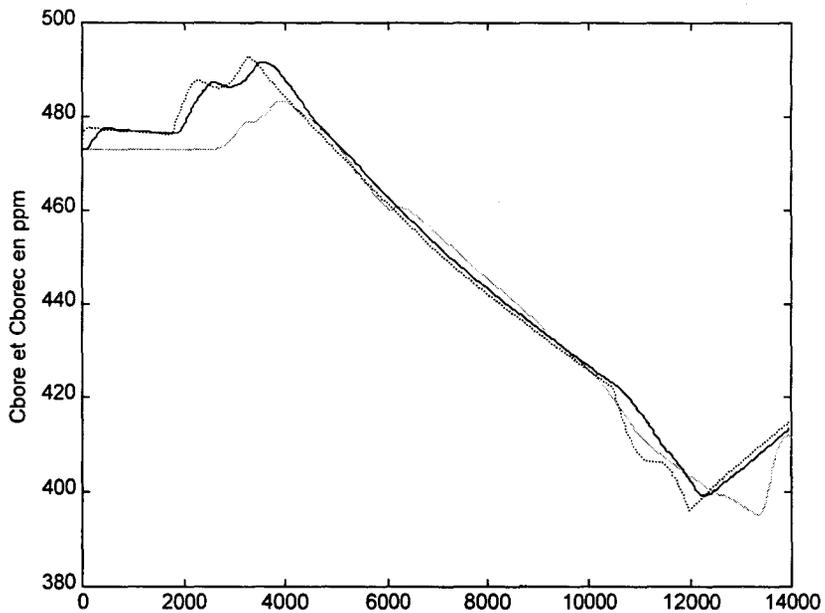


Fig. 4.10 Concentrations en bore

Comme pour le scénario 1, les changements de pente de la concentration en bore ont lieu plus tôt avec les nouvelles références. Contrairement au scénario 1, la nouvelle concentration en bore n'est pas plus élevée que l'actuelle, cela est dû à un décalage moins important de  $T_{ref}$ .

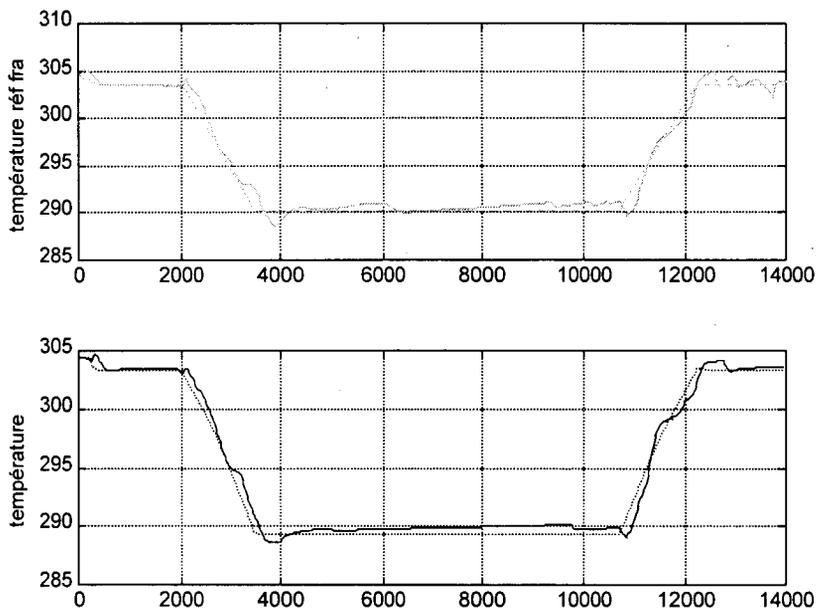


Fig. 4.11 Evolution des températures au cours du temps

Avec les nouvelles références, la température est beaucoup plus stable après la remontée de charge.

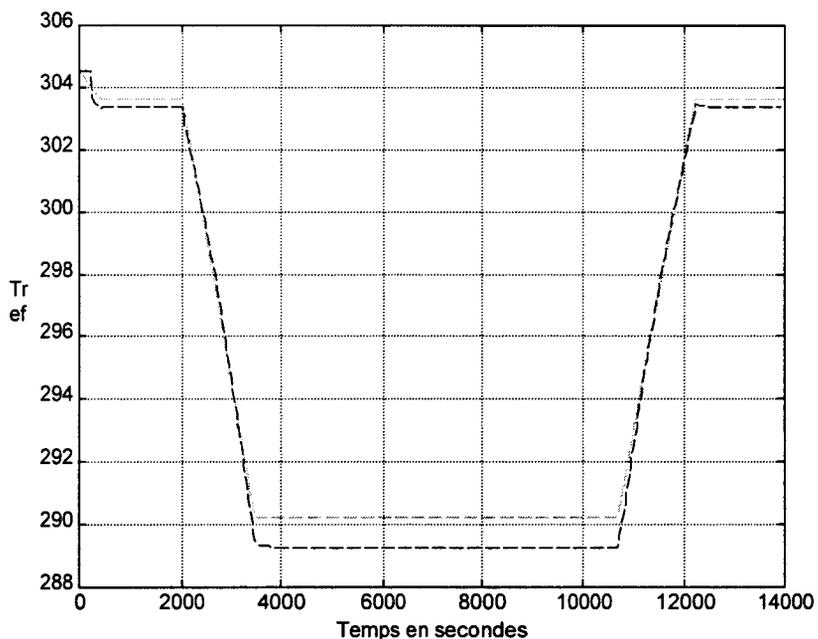


Fig. 4.12 Comparaison des températures de références en fonction du temps

## Résultats et interprétation

Contrairement au scénario 1, les références sont presque semblables malgré un léger décalage s'accroissant avec la baisse de la puissance.

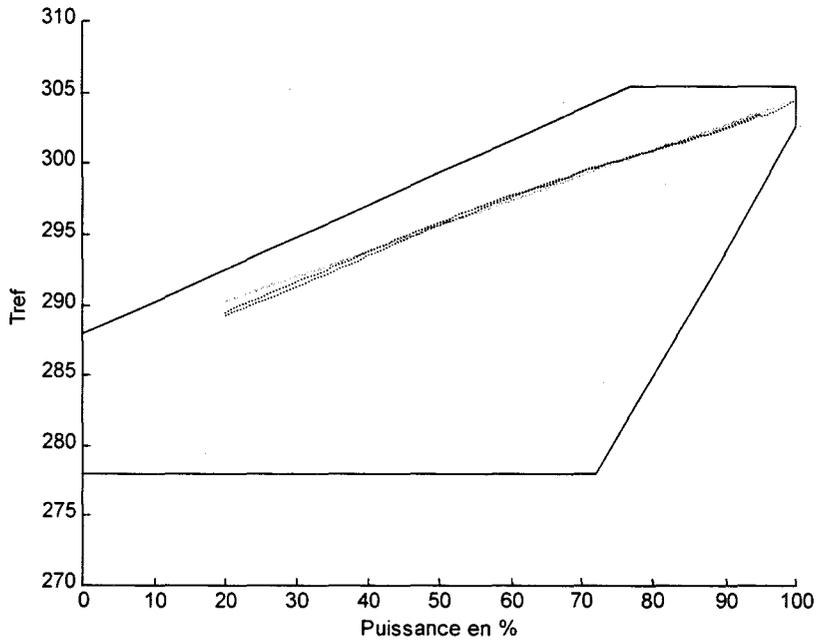


Fig. 4.13 Températures de référence selon la puissance

Cette figure confirme les commentaires de la figure précédente.

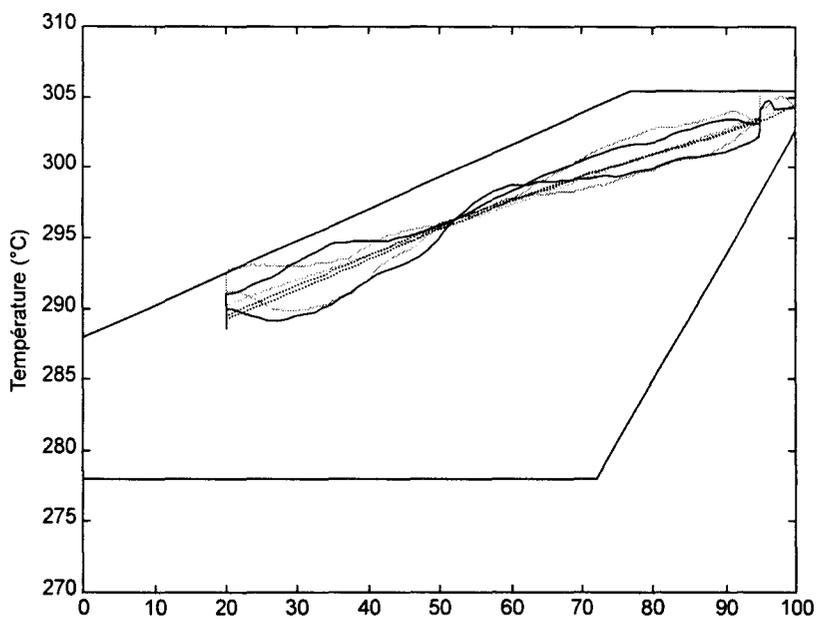


Fig. 4.14 Evolution des températures selon la puissance

Lors du palier bas, la température sort du domaine avec les anciennes références. Cette sortie a lieu à la fin de la baisse de charge vers 4 000 s (Fig. 4.11). En dehors des paliers, les températures sont tenues de façon semblable.

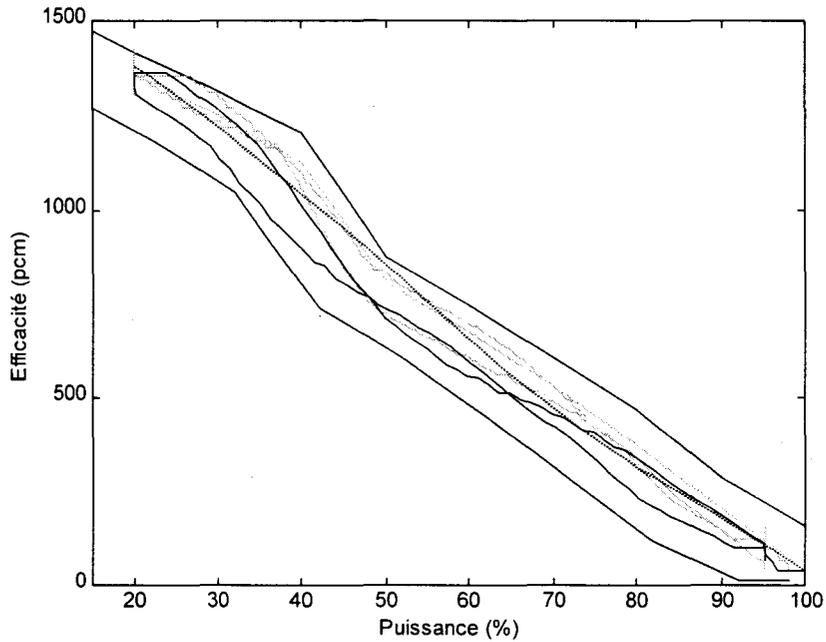


Fig. 4.15 Evolution de l'efficacité selon la puissance

On voit les deux petits pics de sortie de l'efficacité avec les références *Fra*. Le domaine est relativement petit, mais avec les nouvelles références, l'efficacité reste bien dans son domaine.

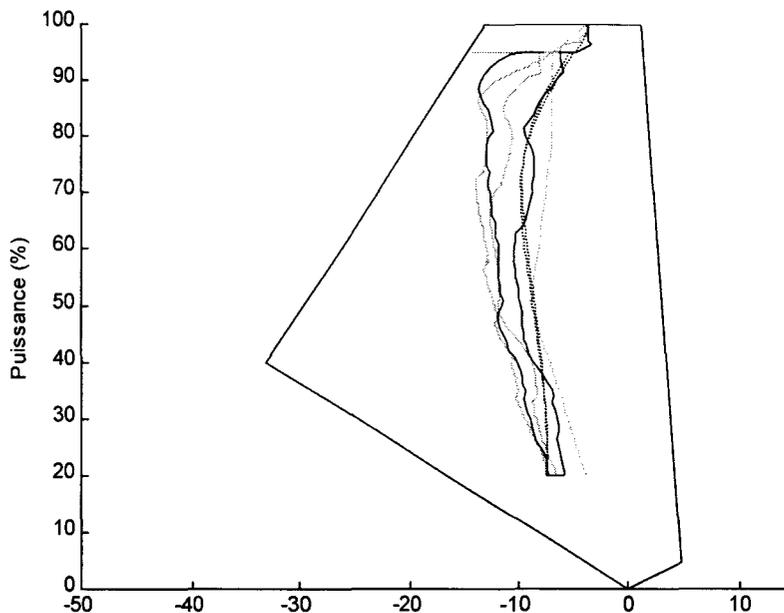


Fig. 4.16 Diagramme Puissance- $\Delta I$

Comme pour le scénario 1, on remarque qu'au retour au palier à 95 %, le  $\Delta I$  obtenu avec les anciennes références commence à sortir du diagramme ; en continuant la simulation, il en serait vraisemblablement sorti. Avec les nouvelles références, il reste à l'intérieur et évolue vers la consigne ce qui est très positif mais n'apparaît pas dans le critère.

## **2. ROBUSTESSE DES NOUVELLES REFERENCES**

Les nouvelles références ont été calculées sur des scénarios précis et sans perturbations. Deux simulations sont faites afin de tester la robustesse de ces nouvelles références aux signaux  $k\Delta F$  et  $NPr$ . Les références issues du scénario 2 seront testées sur le scénario 1<sup>59</sup>. Les références optimisées sur le scénario 1 sont appliquées à un scénario avec des pentes et un palier différents.

### **2.1. Robustesse aux perturbations $k\Delta F$ et $NPr$**

Comme les perturbations  $k\Delta F$  et  $NPr$  ne sont pas connues à l'avance, la référence de la concentration en bore est établie d'après le plan de charge mais les autres références prises en compte par le régulateur sont calculées en temps réel.

---

<sup>59</sup> Tester les références obtenues à partir du scénario 1 n'a pas de sens. En effet, les paramètres obtenus lors de l'optimisation du scénario 1 permettent de calculer les nouvelles valeurs de références jusque 50%. Sous 50%, on est hors du domaine optimisé.

2.1.1. Scénario 1

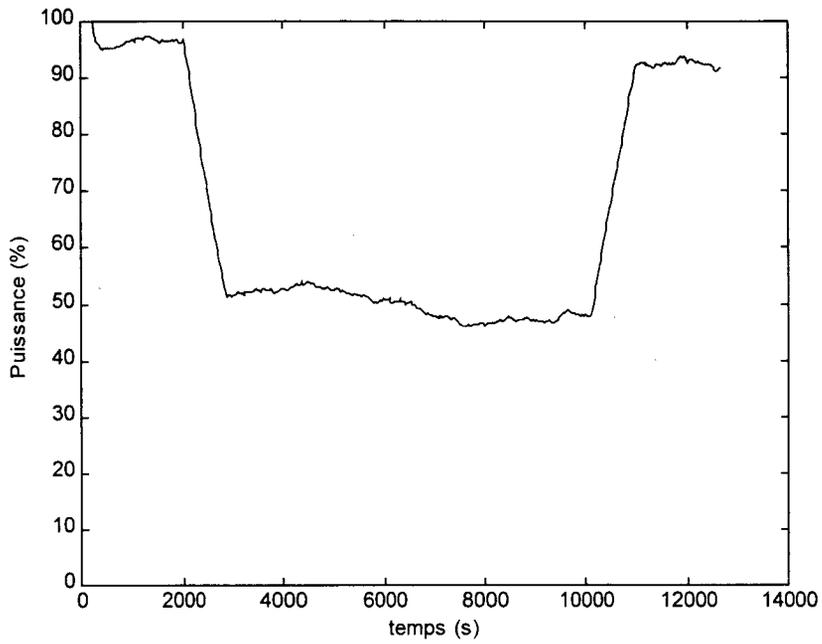


Fig. 4.17 Consigne de puissance avec les perturbations

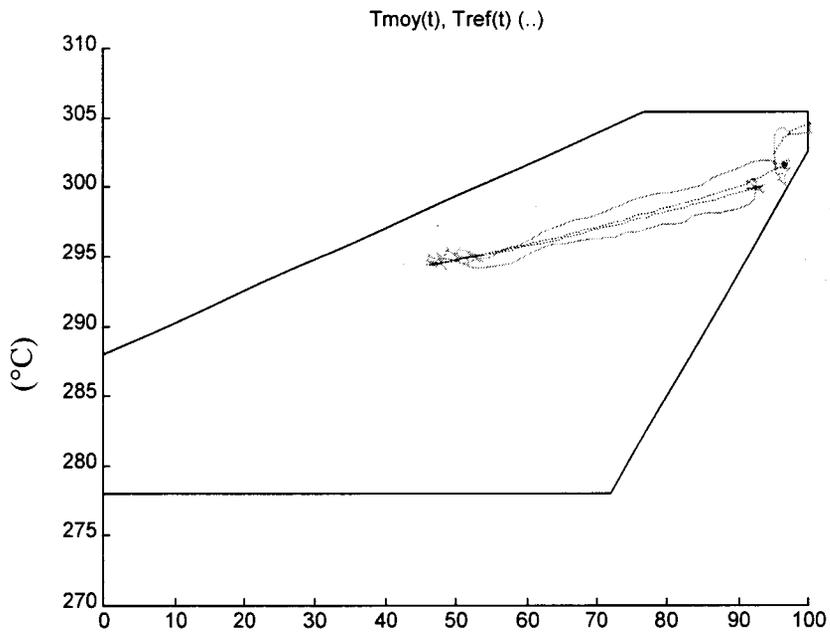


Fig. 4.18 Températures

Le régulateur tient toujours bien la température mais un écart proche d'une frontière peut signifier une sortie du domaine.

## Résultats et interprétation

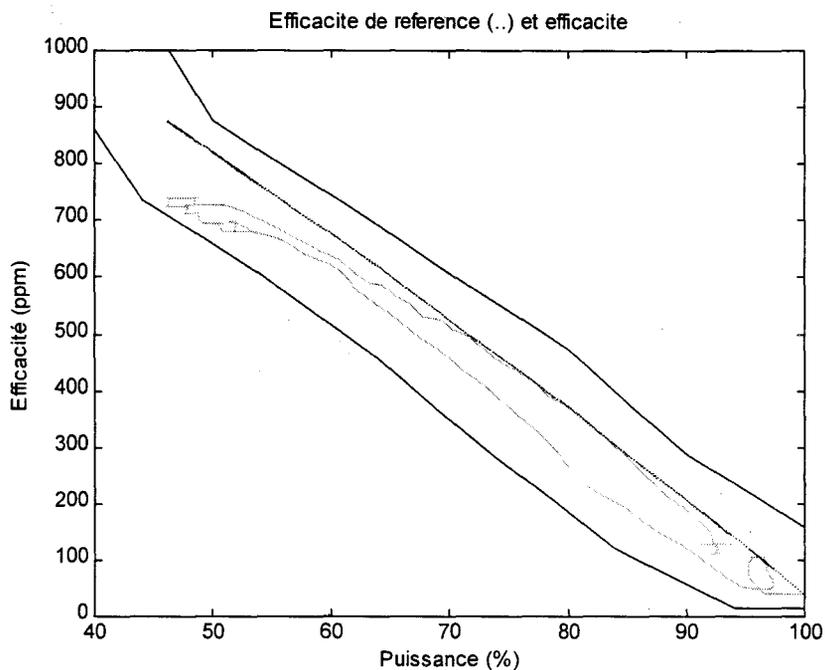


Fig. 4.19 Efficacités

Le comportement est globalement identique au scénario sans les perturbations, mais en palier bas, l'efficacité est légèrement plus proche des frontières du domaine.

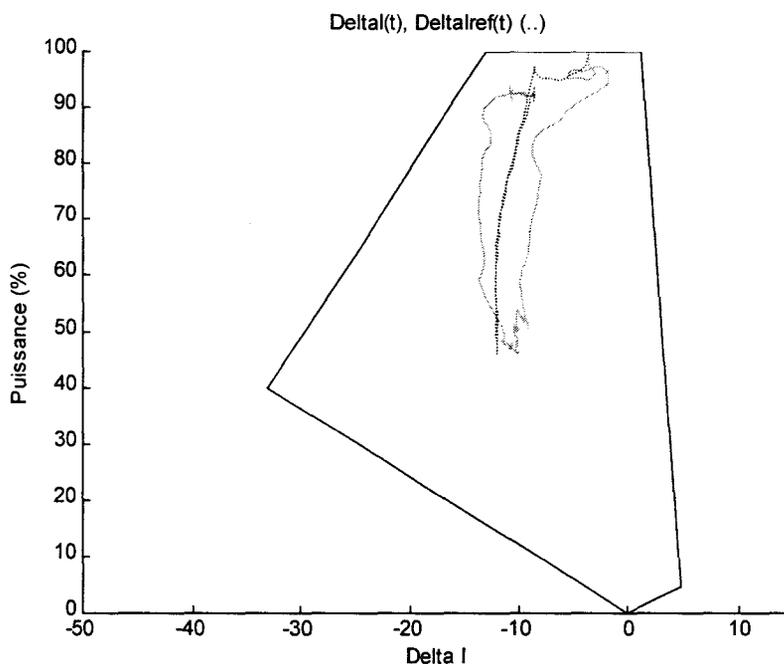


Fig. 4.20  $\Delta I$

Les perturbations font augmenter le trajet parcouru par les barres de 17 %. Les variables commandées sont perturbées par les signaux  $k\Delta F$  et  $NPr$ , de ce fait elles peuvent se rapprocher des frontières des domaines admissibles. C'est le cas de la température moyenne.

On peut envisager une optimisation sur un domaine réduit afin que les valeurs perturbées restent dans leurs domaines admissibles.

### 2.1.2. Scénario 2

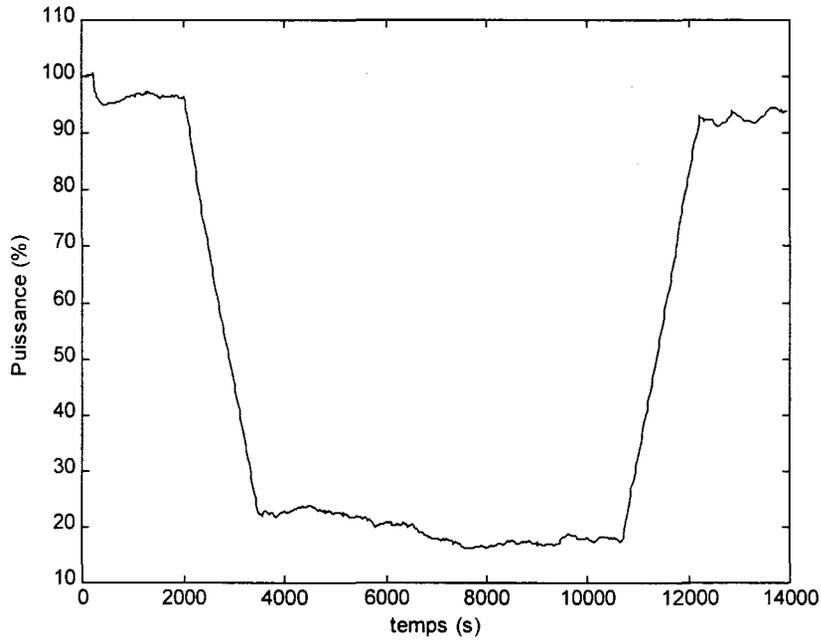


Fig. 4.21 Consigne de puissance avec perturbations

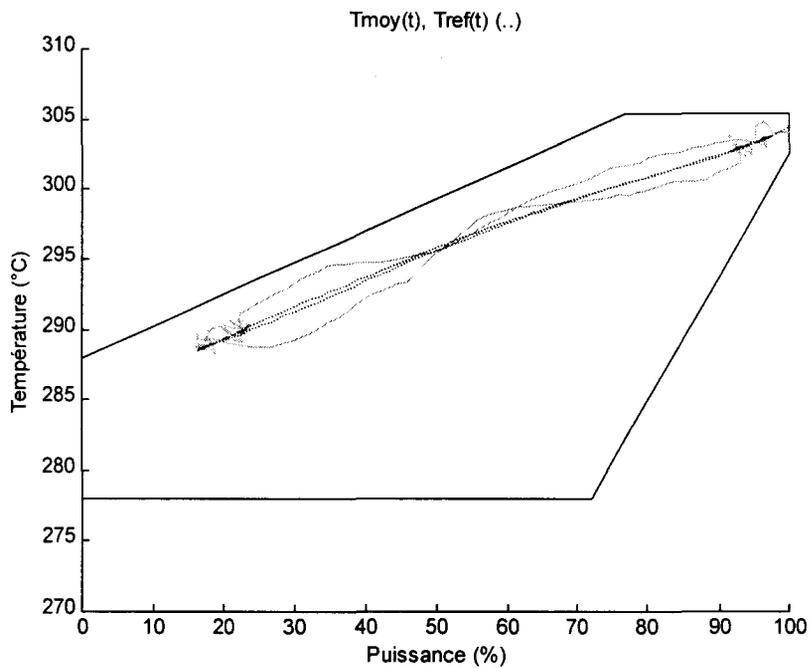


Fig. 4.22 Température de référence, température moyenne

La référence est plus au centre du domaine que pour le scénario 1, malgré les perturbations, la température moyenne reste éloignée des frontières de son domaine.

## Résultats et interprétation

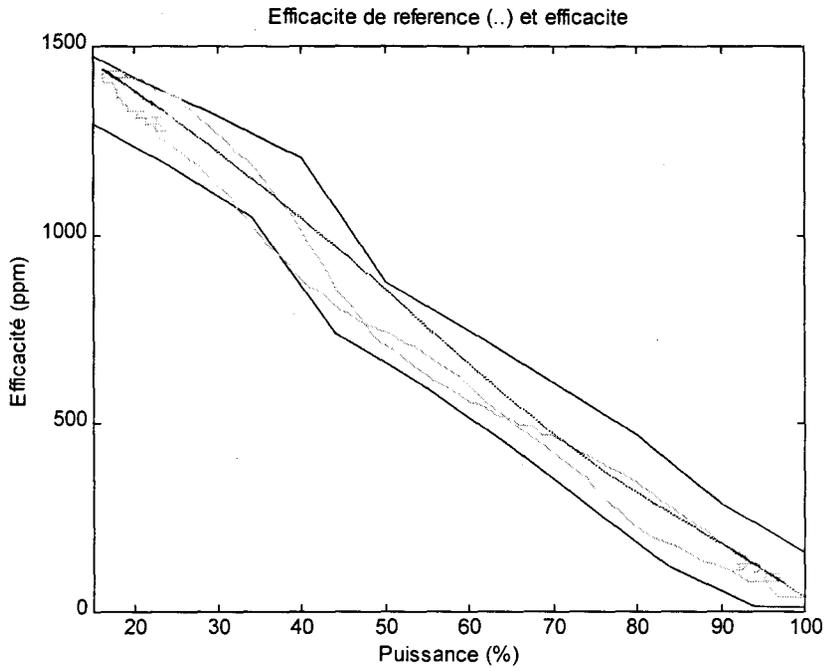


Fig. 4.23 Efficacité

Les perturbations font franchir à l'efficacité les limites de sûreté et de retour instantané en puissance pendant de courts instants (pendant la baisse de charge et au début de la remontée). Les références optimisées et le régulateur multivariable seuls sont insuffisants pour ce genre de scénario avec les perturbations.

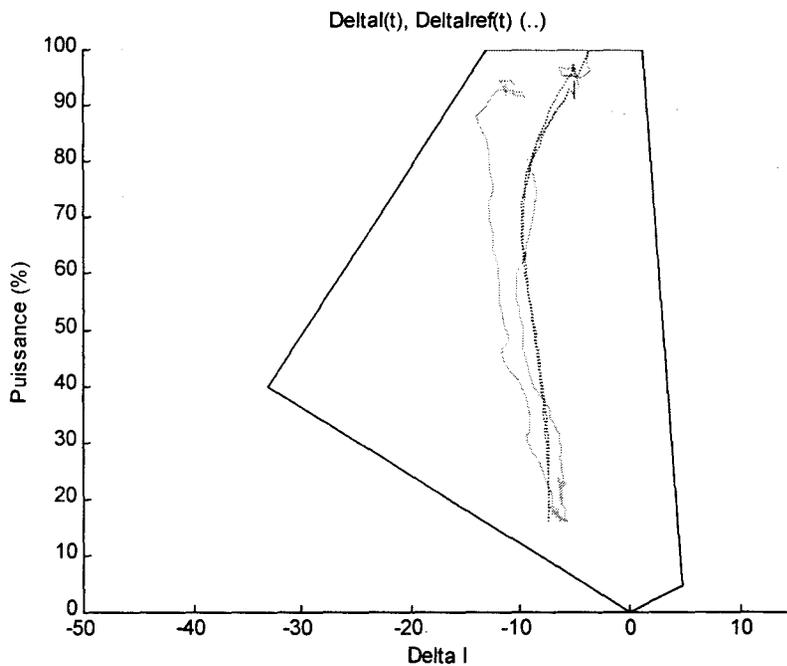


Fig. 4.24  $\Delta I$

Dans l'ensemble, les variables sont perturbées par les signaux  $k\Delta F$  et  $NPr$ , de ce fait il vaut mieux considérer des domaines réduits pour l'optimisation. Il y a deux sorties de  $\eta$  pour Sc2 pendant les transitoires. Le pilotage dans ces zones est assez délicat, l'aide d'un opérateur aurait sans doute permis d'éviter ces sorties.

## 2.2. Robustesse aux changements de scénarios

Deux simulations sont faites visant à vérifier la robustesse des références aux changements de scénario sur des exemples.

### 2.2.1. Palier à 50 % avec les résultats du scénario 2

Cette simulation est faite en utilisant le plan de charge du scénario Sc1.

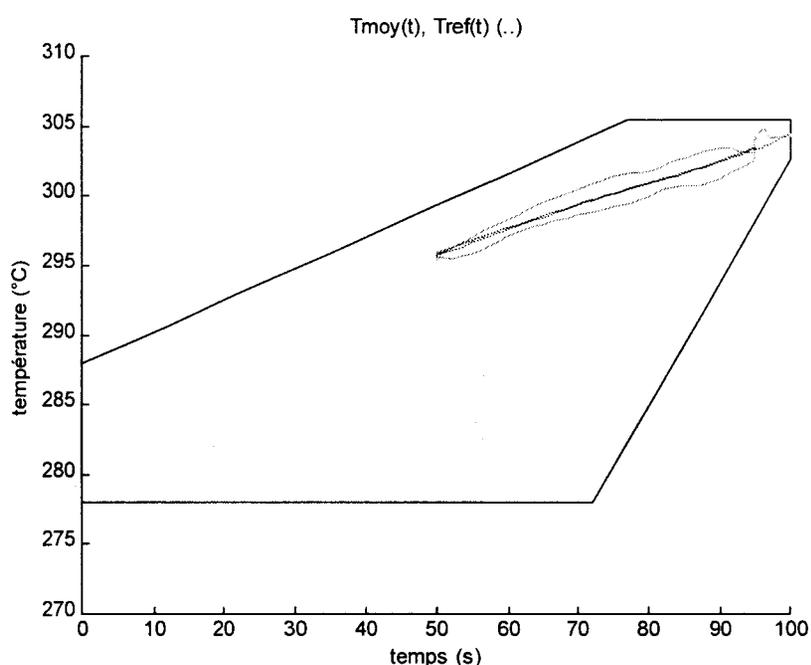


Fig. 4.25 Température

Le température est très bien tenue, mieux qu'avec les références optimisées du scénario 1.

## Résultats et interprétation

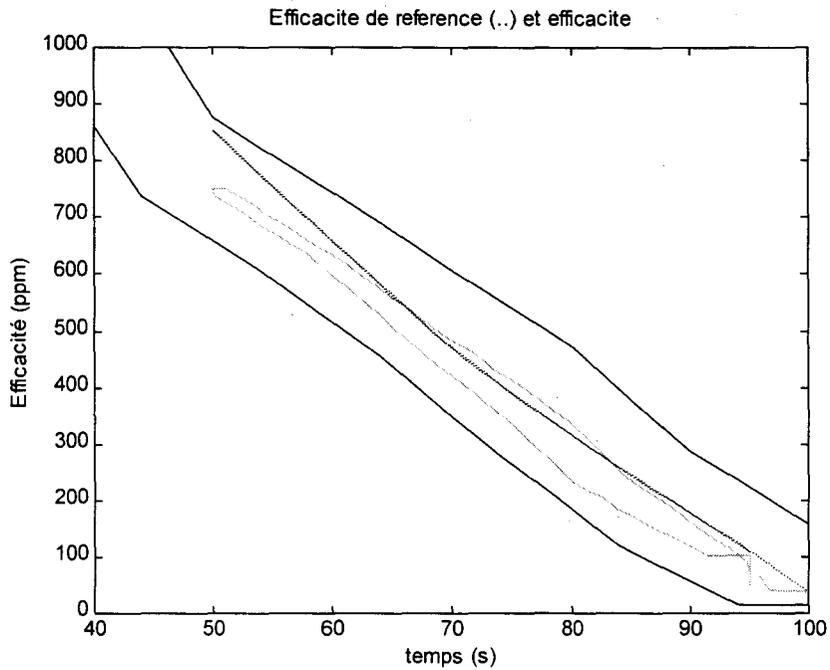


Fig. 4.26 Efficacité

Malgré un changement de consigne, l'efficacité se comporte de la même façon qu'avec les références optimisées du scénario 1.

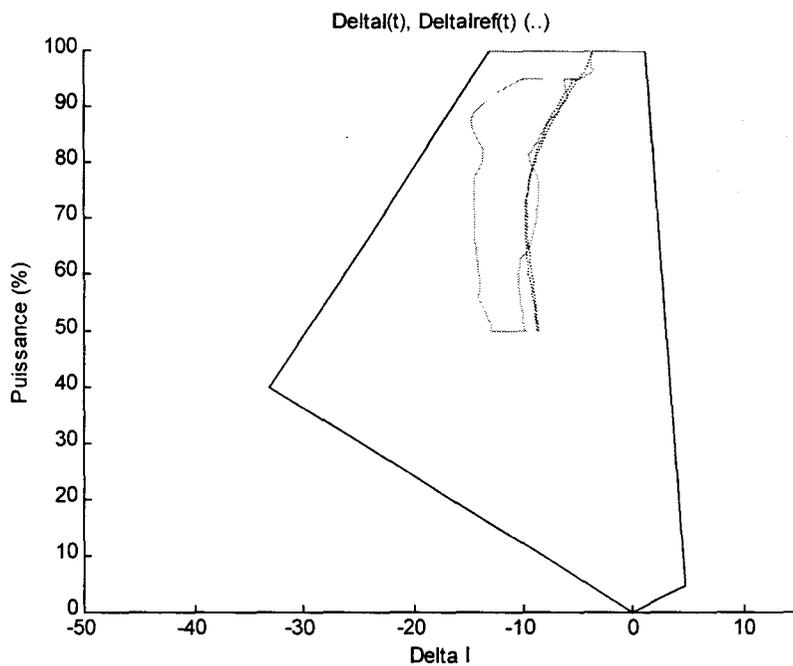


Fig. 4.27 Delta I

En remontée de charge le  $\Delta I$  est plus proche de la frontière mais revient vers le centre du diagramme.

La sollicitation des grappes est supérieure de 11 % à *Mult dyn* optimisé pour le scénario 1, les effluents sont supérieurs de 16 %. Par rapport au scénario de référence, les gains sur les grappes sont de 15 % et les pertes sur les effluents de 7.5%.

Les références optimisées pour le scénario 2 ont un bon comportement sur le scénario 1 puisque les variables commandées restent dans leurs domaines et que les actionneurs sont globalement moins sollicités qu'avec le scénario de référence.

### 2.2.2. Palier à 72.5 % avec des pentes de 1.5%/min

Ce scénario est calculé pour tester la robustesse à un changement de pente.

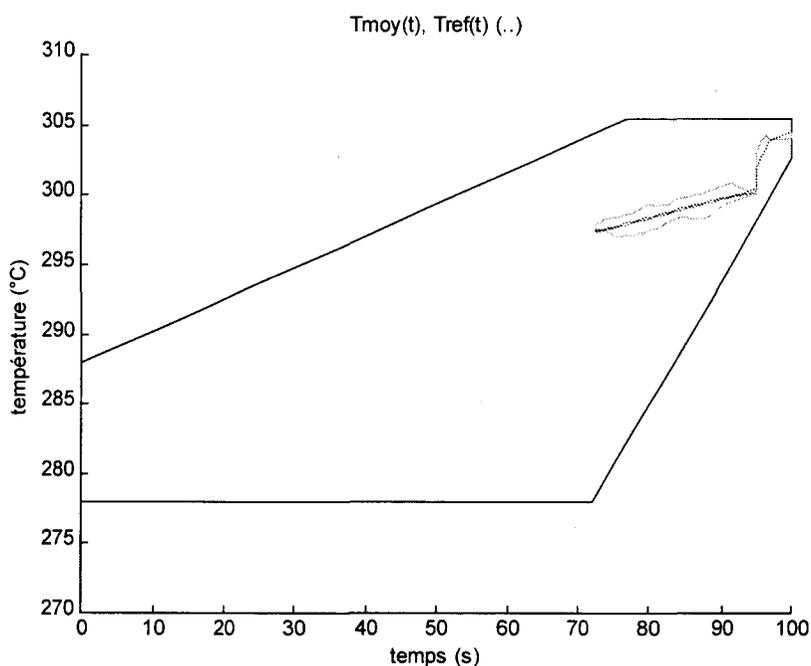


Fig. 4.28 Température

La température est plus proche de sa référence qu'avec une pente de 3 %/min.

## Résultats et interprétation

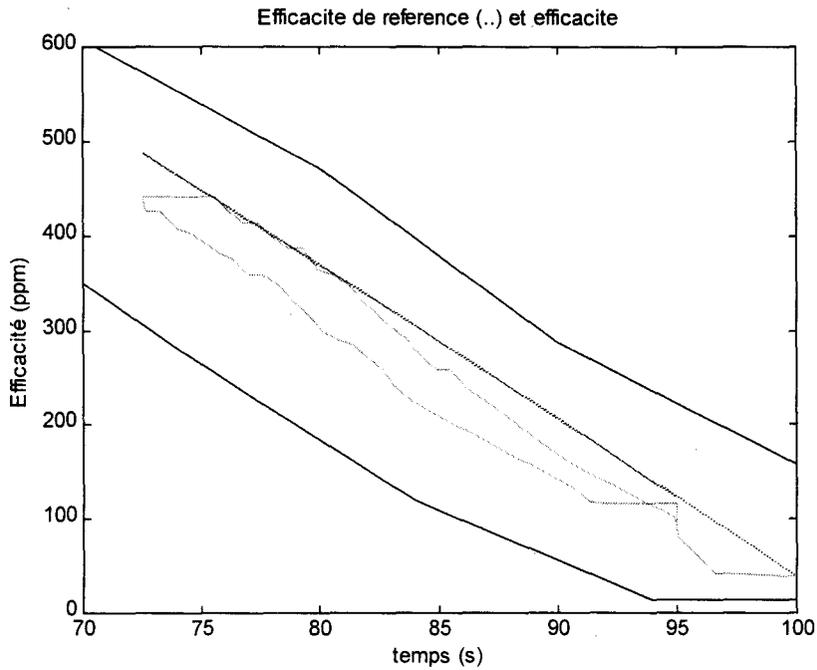


Fig. 4.29 Efficacité

L'efficacité reste au centre du domaine, le comportement est bon mais pas meilleur qu'à 3 %/min.

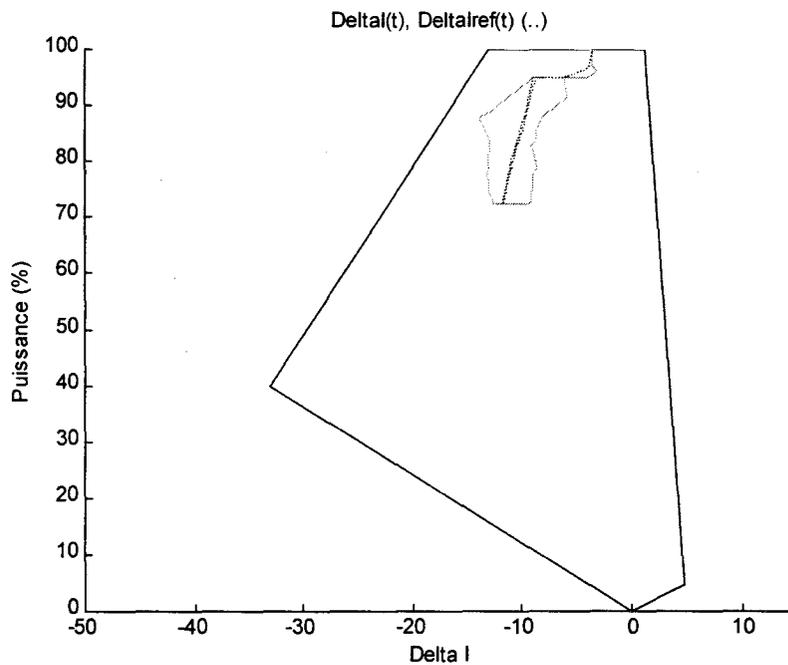


Fig. 4.30  $\Delta I$

On note le pic vers la gauche du diagramme au milieu de la remontée de charge, celui-ci est plus dû au scénario qu'aux références.

Il est difficile d'évaluer la sollicitation des actionneurs par manque de scénario équivalent, mais le comportement est globalement bon.

## **CONCLUSION**

Le générateur de références dynamique apporte une forte amélioration des performances au régulateur multivariable pour le scénario 1 qui présente un palier à moyenne charge. A basse charge, l'optimisation des références a fait baisser le volume des effluents et presque pas la sollicitation des grappes.

Les gains sur les grappes sont obtenus par gommage des dépassements dus aux transitoires. Sur les paliers, alors que les références n'évoluent pas, les valeurs sont mieux tenues par les références optimisées.

# CONCLUSION GENERALE

De nouvelles références ont été établies en vue de la réduction de l'utilisation des actionneurs. La méthode employée a consisté en la création d'un modèle pour la commande, rapide et représentatif des phénomènes prenant place dans la centrale. Ce modèle a été validé qualitativement à partir du modèle qualitatif de la centrale, et numériquement par rapport au modèle de connaissance SIROP. De nouvelles références ont été élaborées à partir d'un modèle très simple de la centrale. Pour permettre l'élaboration de ces références, l'hypothèse d'un régulateur parfait a été effectuée. Cette hypothèse permet de ne pas faire d'autres hypothèses sur le régulateur de la centrale. De ce fait, la méthode employée peut être utilisée pour un autre régulateur, l'optimisation seule étant à refaire. Un régulateur de la concentration en bore a été conçu ; il prend pour entrées les références des variables commandées de la centrale. Aucun réglage de ce régulateur n'est donc nécessaire en cas de calcul de nouvelles références. Les nouvelles références ont été optimisées à l'aide d'un algorithme génétique. Elles permettent d'économiser les actionneurs de la centrale et maintiennent les variables commandées à l'intérieur de leur domaine admissible. Un terme du critère d'optimisation a permis d'éviter de compenser le régulateur multivariable par les références. Par rapport aux références actuelles appliquées au régulateur multivariable conçu par la DER, les nouvelles références donnent de bons résultats. Par rapport au régulateur implanté dans les centrales actuelles des gains certains ont été obtenus sur le scénario test 1 et des performances au moins semblables sur le scénario test 2. On a montré sur des exemples la robustesse des solutions obtenues aux perturbations et aux changements de scénarios. Pendant la baisse et la remontée de charge du scénario 2, l'efficacité est sortie deux fois pendant des temps très courts de son domaine, c'est la seule faiblesse mise en évidence par les tests de robustesse.

Différentes voies de poursuite de cette étude sont ouvertes. Suite aux problèmes de temps, aucune optimisation n'a été menée au cours de l'étude sur l'ensemble des 61 paramètres du générateur de références. À cause du temps nécessaire à l'optimisation (2 ou 4 jours, le plan de charge étant connu 24 heures à l'avance), il n'est pas possible d'utiliser actuellement cette méthode. Il est cependant envisageable de créer une base de références correspondant à un ensemble de scénarios types et d'utiliser ces références comme points de départ pour de nouvelles optimisations afin d'en réduire le temps de calcul. Le régulateur utilisé pour l'étude ne prend pas en compte la concentration en bore, une nouvelle synthèse la prenant en compte

#### *Chapitre 4*

apporterait certainement une amélioration sensible des performances. Enfin cette méthode peut être reprise pour l'ensemble des centrales en cours de fonctionnement (REP 1300 MW, palier N4) ou en cours de conception (REP 2000, EPR).

# BIBLIOGRAPHIE

[Alexandre 94] Alexandre P. Quellien P., *Optimisation de la gestion du programme de température, Résultat sur la détermination du domaine*, CEA SSAE/LCSR 93/026

[Bendotti 94] Bendotti P., Bodenheimer Bobby, *Identification and  $H_\infty$  Control Design for a pressurized Water Reactor*, IEEE CDC, pp 1072-1077, 1994

[Bendotti 96] Bendotti P., Millerat P. *Régulation coordonnée de la température moyenne et de la puissance thermique du circuit primaire d'un REP CP2 approche  $H_\infty$* , EDF DER HP-33/96/024A

[Beolet 89] Beolet M., Tyran J.-L. Deroubaix P., *An automatic dilution/boration system to improve reactor operation : SYCOBOR*, FRAMATOME, NEW NUCLEAR NEEDS, 1989.

[Bodini 96] Bodini L., Millerat P., *Modèle de compréhension des processus physiques mis en jeu dans le fonctionnement normal d'une centrale nucléaire*, EDF DER HP-33/96/003/A

[Bodini 98] Bodini L., Millerat P., Borne P., *From a qualitative model to a quantitative model : the example of a power plant*, System Analysis, Modeling and Simulation, (A paraître)

[Bodini 97] Bodini L., Millerat P., *Conception d'un régulateur de la concentration en bore du circuit primaire des REP*, EDF DER HP-33/97/063/A

[Bodini 97A] Bodini L., Millerat P., Borne P., *Creation of a model for the control of a pressurized Water Reactor of a nuclear power plant*, CASCD 97, Gand

[Bodini 98A] Bodini L., Millerat P., Borne P., *Implementation of a boron regulation in a nuclear power plant*, CESA 98, Hammamet

[Borne et al. 95] Borne P. et al., *Théorie et pratique du calcul matriciel*, Editions Technip, 1995

[Borne et al. 92a] Borne P. et al., *Modélisation et Identification des processus*, tome 1, Editions Technip, 1992

## Bibliographie

[Corfmat 92] Corfmat J.-P., <i>Le modèle d'amont turbine Lilliam, description de la version 2.0</i> , EDF DER HP-35/92.08-A
[De Larminat] De Larminat P., <i>Automatique, commande des systèmes linéaires</i> , 2 <sup>e</sup> édition revue et augmentée, Hermès, 1993, p87
[Descartes] Descartes R., <i>Discours de la méthode</i> , 1637
[Dos Santos, Lesbats et al 93] Dos Santos, Lesbats et al., <i>Science du danger : Approche globale, Aspects méthodologiques</i> , Assises Internationales des formations universitaires et avancées dans le domaine des sciences et techniques du danger, Actes
[Ermine 96] Ermine J.-L., <i>Les systèmes de connaissance</i> , Hermès, 1996
[Goldberg 89] Goldberg D.E., <i>Genetic algorithms in search, optimization &amp; machine learning</i> , Addison-Wesley
[Grandamas et Ermine 92] Grandamas O., Ermine J.-L., <i>Outils d'aide à l'organisation de l'intervention en cas d'accident de transport de produits toxiques liquides ou gazeux</i> , EC2 Ed., Avignon 92, vol 2 , pp 113-116
[Le Grand 97] Le Grand E., <i>Optimisation des consignes pour le pilotage d'un réacteur à eau pressurisée (REP)</i> , Mémoire de fin d'études, ENSTA.
[Le Moigne 84] Le Moigne J.-L., <i>La théorie du système général, théorie de la modélisation</i> , 1984, 2 <sup>e</sup> me édition, PUF
[Millerat 95] Millerat P. <i>Projet Minotaure : cahier des charges fonctionnel recherche d'une régulation de la puissance thermique utilisant le poste d'eau</i> , HP-33/95/014/A
[Mourlevat 93] Mourlevat J.-L., <i>Evolution des modes de pilotage</i> , RGN Juillet/Août 1993
[Saillard 96] Saillard Y., Grelier J.-P., <i>Projet Minotaure, Pilotage de la consigne Tref, dossier d'évaluation et de synthèse</i> , EDF DER HP-33/96/012/A
[Sellami 98] Sellami H., Karray F., <i>Global optimization using genetic algorithm with zooming</i> , CESA 98, Hammamet.
[Shannon 49] Shannon C.E. et Weaver W., <i>A mathematical theory of communication</i> , 1949, 11 <sup>e</sup> éd., 1967, Urbana, Illinois, University of Illinois Press, 125 p.

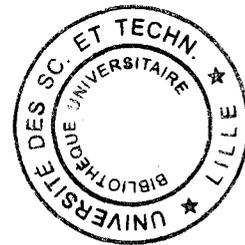
## Bibliographie

[Steinbruner 74] Steinbruner J. D., *The cybernetic theory of decision, new dimension of political analysis*, NJ, Princeton University Press, 1974

[Tyran 90] Tyran J.-L., *DEBORAH, un automate de borication-dilution pour une commande plus souple des centrales REP*, EDF, Bulletin de la direction des études et recherches, série A, nucléaire, hydraulique, thermique N°3, 1990, pp35-44

[Walton 87] Walton K., Marschall J.E.(1987), Direct method for TDS stability analysis. *I.E.E. Proceedings*, Vol. 134, part D, N°2, pp.101-107

[Zadeh 69] Zadeh L. A. et Polak E. , *System theory*, NY, McGraw-Hill Book Cy, 1969, 521 p.



# SOMMAIRE

ANNEXE 1. Présentation de la centrale, introduction à la science des systèmes .....	1
1. Modélisation et connaissance.....	1
2. Modélisation des systèmes complexes.....	1
3. Epistémologie de la science des systèmes.....	1
3.1. Le discours de la méthode.....	2
3.2. Les différents paradigmes .....	3
3.3. Le nouveau discours de la méthode .....	5
ANNEXE 2. Schémas globaux.....	9
1. Schéma global incluant quelques notions qualitatives .....	9
2. Schéma global deux cœurs .....	10
ANNEXE 3. Linéarisation du régulateur de la concentration en bore .....	11
ANNEXE 4. Identification .....	15
1. Construction de la fonction F .....	15
2. Courbe de calibrage des groupes gris .....	16
3. Interpolation des coefficients $a_j$ .....	17
3.1. Interpolations des coefficients $a_j$ (1 <sup>ère</sup> série) .....	19
3.2. Conventions et notations: Modèle à 42 paramètres ( $\lambda$ , $\chi$ et $\alpha_j$ pour j allant de 1 à 40) .....	21
ANNEXE 5. Réduction du modèle et définition du problème .....	23
1. Modèle à 21 paramètres ( $\lambda'$ , $\chi$ et $\alpha'_k$ pour k allant de 1 à 19).....	23
2. Modèle à 12 paramètres ( $\beta_n$ pour n allant de 1 à 12) .....	24
3. Détermination de bornes sur les paramètres.....	25
4. Construction de la fonction de coût.....	26

## **ANNEXE 1. PRESENTATION DE LA CENTRALE, INTRODUCTION A LA SCIENCE DES SYSTEMES**

### **1. MODELISATION ET CONNAISSANCE.**

Il est nécessaire pour notre étude d'appréhender (saisir par l'esprit) l'objet centrale nucléaire. Toute étude en automatique nécessite la réalisation préliminaire d'un modèle. En fait ces deux affirmations n'en font qu'une : toute représentation ou perception du réel (tout *objet* à l'extérieur de la conscience du *sujet*) constitue une connaissance *et* un modèle de la réalité. C'est ainsi que la notion même de modèle est *indissociable* de la notion de connaissance ou de représentation<sup>1</sup>. "*Connaître une chose, en effet, c'est se l'assimiler, se la rendre intérieure, la faire sienne, et ainsi se la rendre présente au sens le plus fort*"<sup>2</sup>. Modéliser est connaître et réciproquement. Ainsi l'idée même de présentation de la centrale inclut le concept de modélisation

### **2. MODELISATION DES SYSTEMES COMPLEXES.**

Pour appréhender, pour connaître l'objet centrale nucléaire, la modélisation est donc nécessaire. Face à un objet<sup>3</sup> apparemment complexe et de taille importante pour le modélisateur se pose la question de la méthode à employer. Dans son ouvrage *La théorie du système général, théorie de la modélisation*<sup>4</sup> Jean-Louis Le Moigne pose les bases d'une *science des systèmes* et propose une méthode de modélisation adaptée aux systèmes complexes.

### **3. EPISTEMOLOGIE DE LA SCIENCE DES SYSTEMES.**

Cette science des systèmes est à la fois ancienne et récente, ancienne par certains de ses principes énoncés par les Grecs (Héraclite, Aristote) et récente par son fort développement dû

---

<sup>1</sup> La connaissance est assimilable à une représentation du monde ; cette représentation, propre à chacun, n'est qu'une modélisation faite par le modélisateur. Modéliser c'est connaître et réciproquement.

<sup>2</sup> Citation de Jean Ladrière, Encyclopédie Universalis, article Représentation et connaissance

<sup>3</sup> L'objet est ici défini dans son sens large : objet de l'étude et non objet inanimé.

<sup>4</sup> PUF, 2<sup>ème</sup> édition, 1984

à des travaux de personnalités proches de l'automatique (Wiener, Shannon) et par sa formalisation en cours (J.-L. Le Moigne, E. Morin). La présence, l'utilisation de cette science des systèmes dans ce mémoire sur la commande des centrales nucléaires est légitimée par son épistémologie présentée ci-après.

### 3.1. Le discours de la méthode

Le mot même de méthode est associé à Descartes et à son ouvrage *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences*. Descartes définit quatre préceptes :

« Ainsi, au lieu de ce grand nombre de préceptes dont la logique est composée, je crus que j'aurais assez des quatre suivants pourvu que je prisse une ferme et constante résolution de ne manquer pas une seule fois à les observer.

« Le premier était de ne recevoir jamais aucune chose pour vraie que je ne la connusse évidemment être telle, c'est-à-dire d'éviter soigneusement la précipitation et la prévention, et de ne comprendre rien de plus en mes jugements que ce qui se présenterait si clairement et si distinctement à mon esprit que je n'eusse aucune occasion de la mettre en doute.

« Le second, de diviser chacune des difficultés que j'examinerais en autant de parcelles qu'il se pourrait et qu'il serait requis pour les mieux résoudre.

« Le troisième, de conduire par ordre mes pensées en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu comme par degrés jusques à la connaissance des plus composés, et supposant même de l'ordre entre ceux qui ne se précèdent point naturellement les uns les autres.

« Et le dernier, de faire partout des dénombrements si entiers et des revues si générales que je fusse assuré de ne rien omettre.

« Ces longues chaînes de raisons toutes simples et faciles, dont les géomètres ont coutume de se servir pour parvenir à leurs plus difficiles démonstrations, m'avaient donné occasion de m'imaginer que toutes les choses qui peuvent tomber sous la connaissance des hommes s'entre-suivent en même façon, et que, pourvu seulement qu'on s'abstienne d'en recevoir aucune pour vraie qui ne le soit, et qu'on garde toujours l'ordre qu'il faut pour les déduire les unes des autres, il n'y en peut avoir de si éloignées auxquelles enfin on ne parvienne, ni de si cachées qu'on ne découvre. »

Ces préceptes forment un paradigme : "un ensemble d'hypothèses fondamentales et critiques sur la base desquelles théories et modèles peuvent se développer"<sup>5</sup>. La science qui s'associe le mieux avec un tel paradigme est la mécanique analytique. Toute description consistera en une présentation des lois (la structure) internes et invariables de l'objet qui en explique le comportement (la fonction, l'effet). Ce paradigme est axiomatique. De même que l'axiome d'Euclide qui est reconnu adapté à notre monde et d'autres axiomes qui lui sont contraires ont été la base de nombreux développements, de même des méthodes de modélisation (donc de représentation) peuvent être développées à partir d'axiomes différents voire contradictoires. C'est le pragmatisme qui détermine la légitimité d'un ensemble d'axiomes.

Jean Louis Le Moigne montre dans [Le Moigne 84] l'évolution des divers paradigmes depuis le paradigme cartésien (dit aussi de la mécanique analytique) jusqu'au paradigme systémique.

### 3.2. Les différents paradigmes

Le premier paradigme qui a rompu avec celui de la mécanique analytique est le paradigme de la thermodynamique qui développe les notions de système fermé, de description statistique (on ne décomposera pas le système en parties microscopiques) et d'évolution irréversible (non-invariance de "la structure" de l'objet).

Le paradigme structuraliste (J. Piaget) essaie de réunir ces deux paradigmes dans une description plus globale de l'objet fonctionnant et évoluant : "*la nature du sujet est de constituer un centre de fonctionnement et non pas le siège d'un édifice achevé*", "*une structure est un système de transformation autonome*". L'étude du fonctionnement d'un système est indissociable de celle de ses transformations et réciproquement.

Le paradigme cybernétique dont on reconnaît la paternité officielle à N. Wiener introduit les notions de :

- boîte noire fonctionnelle : au lieu d'expliquer quelle est la structure de l'objet, on va essayer de "*comprendre et d'interpréter les comportements en référence permanente aux projets du phénomène modélisé, décrits par rapport aux environnements au sein desquels il fonctionne et il se transforme*"<sup>6</sup>.

---

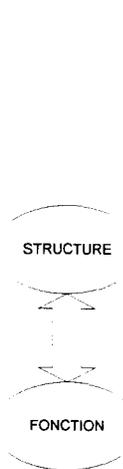
<sup>5</sup> [Steinbrunner 74]

<sup>6</sup> [Le Moigne 84]

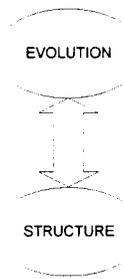
- boucle informationnelle de rétrocommande<sup>7</sup>.
- téléologie (l'étude de la finalité) : dans la description de l'objet, on attachera l'importance non pas aux causes mais à la finalité, au projet de l'objet.

La notion de structure s'efface pour laisser place à la notion d'interface : l'interface d'un projet conçu dans un environnement perçu. Ainsi *l'ignorance des causes mécaniques ne constitue plus l'obstacle infranchissable à la modélisation intelligible du phénomène considéré*<sup>8</sup>.

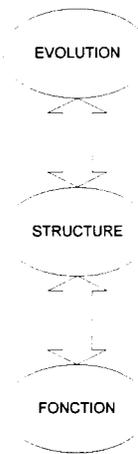
On peut considérer une cybernétique de premier ordre (proche de l'automatique classique) et une cybernétique de second ordre résultant dans une auto-organisation de la structure (interne) de l'objet (ou auto-régulation des transformations internes).



Le paradigme de la mécanique classique



Le paradigme de la mécanique statistique (ou thermodynamique)



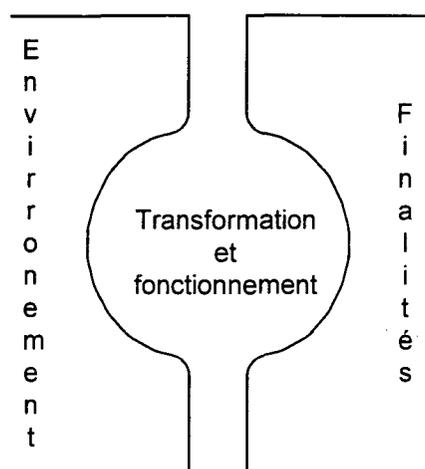
Le paradigme structuraliste

La réunion des paradigmes structuraliste et cybernétique constitue le fondement du paradigme systémique. Deux hypothèses fortes caractérisent celui-ci :

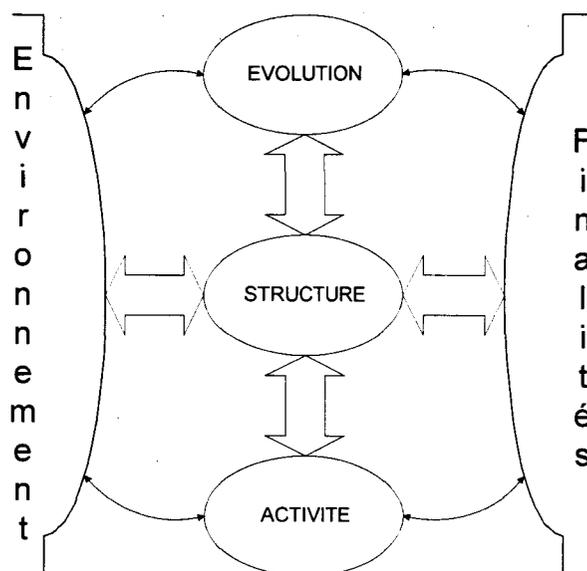
- L'hypothèse téléologique : on peut définir pour un objet complexe au moins un projet par rapport auquel son comportement pourra être interprété, lequel comportement ne sera pas uniquement la conséquence de lois causales indépendantes du projet.
- L'hypothèse d'ouverture sur l'environnement : un objet complexe ne peut être complètement décrit sans la prise en compte de son environnement.

<sup>7</sup> Il est important de noter qu'en même temps Shannon expose sa *Théorie mathématique de la communication* [Shannon 49] qui décrit la transmission des signaux informationnels.

<sup>8</sup> Encyclopaedia Universalis, Science des systèmes, J.-L. Le Moigne



Le paradigme cybernétique



Le paradigme systémique

Jean Louis Le Moigne nomme le paradigme systémique décrit par le schéma ci-dessus le "Système Général" et lui donne cette définition mnémorique :

- quelque chose (n'importe quoi, présumé identifiable)
- qui *dans* quelque chose (environnement)
- *pour* quelque chose (finalité ou projet)
- *fait* quelque chose (activité = fonctionnement)
- *par* quelque chose (structure = forme stable)
- qui *se transforme* dans le temps (évolution).

### 3.3. Le nouveau discours de la méthode

Le paradigme systémique définit 4 préceptes qui sont les pendants des quatre préceptes sur lesquels est basé le paradigme cartésien (évidence, réductionnisme, causalité, exhaustivité).

Le précepte d'exhaustivité ("des dénombrements si entiers et des revues si générales que je fusse assuré de ne rien omettre") est impraticable et met sans doute en défaut le paradigme cartésien puisque les quatre préceptes sont solidaires. La définition d'**agrégat** [Zadeh et Polak 69], ensemble à l'intérieur duquel nous acceptons de ne pas tout dénombrer, autorise la description d'un objet sans obliger le modélisateur à une improbable exhaustivité. Alors que l'identification entre le cartésianisme et la rationalité est souvent faite, le nouveau discours de la méthode ne se veut pas moins rationnel que l'ancien. En effet, dans le nouveau discours la difficulté de l'exhaustivité cartésienne se soustrait à la difficulté de bien choisir les agrégats de

façon à ce que la description ne soit pas incomplète vis-à-vis du projet du modélisateur<sup>9</sup>. Un tel choix nécessite raison, logique et bon sens.

Considérer que le précepte de causalité est la seule explication (description) des effets ne permet pas de s'affranchir de ce que l'on ne connaît pas. En effet comment déterminer les effets si on ne peut déterminer toutes les causes et tous les causants ? Un objet complexe s'il ne peut être *expliqué* par des lois cause-effet peut être *décrit* par "*l'interprétation (ou la compréhension) comportement-finalité*". Le précepte **téléologique** se propose comme une alternative au précepte de causalité.

Une finalité, un projet se comprend dans un environnement. La perception d'un objet faisant un tout immergé dans son environnement se propose comme une option par rapport à la description d'un objet par ses parties uniquement. Ce précepte de **globalisme** rejoint des idées fort anciennes énoncées par Pascal "*Toute chose étant aidée et aidante, je tiens pour impossible la connaissance du tout sans la connaissance des parties et la connaissance des parties sans la connaissance du tout*" et Aristote : "*le tout est plus que la somme des parties*"<sup>10</sup>. La prise en compte et la compréhension de l'environnement de l'objet implique la notion d'ouverture des systèmes contrairement au précepte réductionniste qui favorise par nature l'idée de fermeture de l'objet.

Le précepte complémentaire du précepte d'évidence (la réduction en parties s'arrête quand prend place le précepte d'évidence) est la **pertinence**. Ce qui est tenu pour vrai est pertinent par rapport à la (aux) finalité(s) de l'objet explicitée(s) par le modélisateur.

Ainsi sont définis les quatre préceptes du nouveau discours de la méthode ou paradigme systémique. J.-L. Le Moigne les présente comme suit :

*Le précepte de pertinence : Convenir* que tout objet que nous considérerons se définit par rapport aux intentions implicites ou explicites du modélisateur. Ne jamais s'interdire de mettre en doute cette définition si, nos intentions se modifiant, la perception que nous avons de cet objet se modifie.

*Le précepte du globalisme : Considérer* toujours l'objet à connaître par notre intelligence comme une partie immergée et active au sein d'un plus grand tout. Le percevoir d'abord

---

<sup>9</sup> On passe ainsi de la seule description possible à une description faite avec le modélisateur (et donc non indépendante de celui-ci). Cette notion de modèle-modélisateur est éloignée du paradigme cartésien pour lequel la description d'un objet est unique et donc indépendante du modélisateur.

globalement, dans sa relation fonctionnelle avec son environnement sans se soucier outre mesure d'établir une image fidèle de sa structure interne, dont l'existence et l'unicité ne seront jamais tenues pour acquises.

*Le précepte téléologique* : *Interpréter* l'objet non pas en lui-même, mais par son comportement, sans chercher à expliquer *a priori* ce comportement par quelque loi impliquée dans une éventuelle structure. Comprendre en revanche ce comportement et les ressources qu'il mobilise par rapport aux projets que, librement, le modélisateur attribue à l'objet. Tenir l'identification de ces hypothétiques projets pour un acte rationnel de l'intelligence et convenir que leur démonstration sera bien rarement possible.

*Le précepte de l'agrégativité* : *Convenir* que toute représentation est partisane, non pas par oubli du modélisateur, mais délibérément. Chercher en conséquence quelques recettes susceptibles de guider la sélection d'agrégats tenus pour pertinents et exclure l'illusoire objectivité d'un recensement exhaustif des éléments à considérer.

Le nouveau discours ne renie pas l'ancien ; il trouve sa place dans l'évolution des paradigmes. Il se propose comme une alternative au modélisateur face à un système compliqué ou complexe. Dans un sens élargi, la science des systèmes peut aider toute personne désirant appréhender, connaître ou expliquer tout objet complexe.

---

<sup>10</sup> [Le Moigne 84], p.35

## ANNEXE 2. SCHEMAS GLOBAUX

### 1. SCHEMA GLOBAL INCLUANT QUELQUES NOTIONS QUALITATIVES

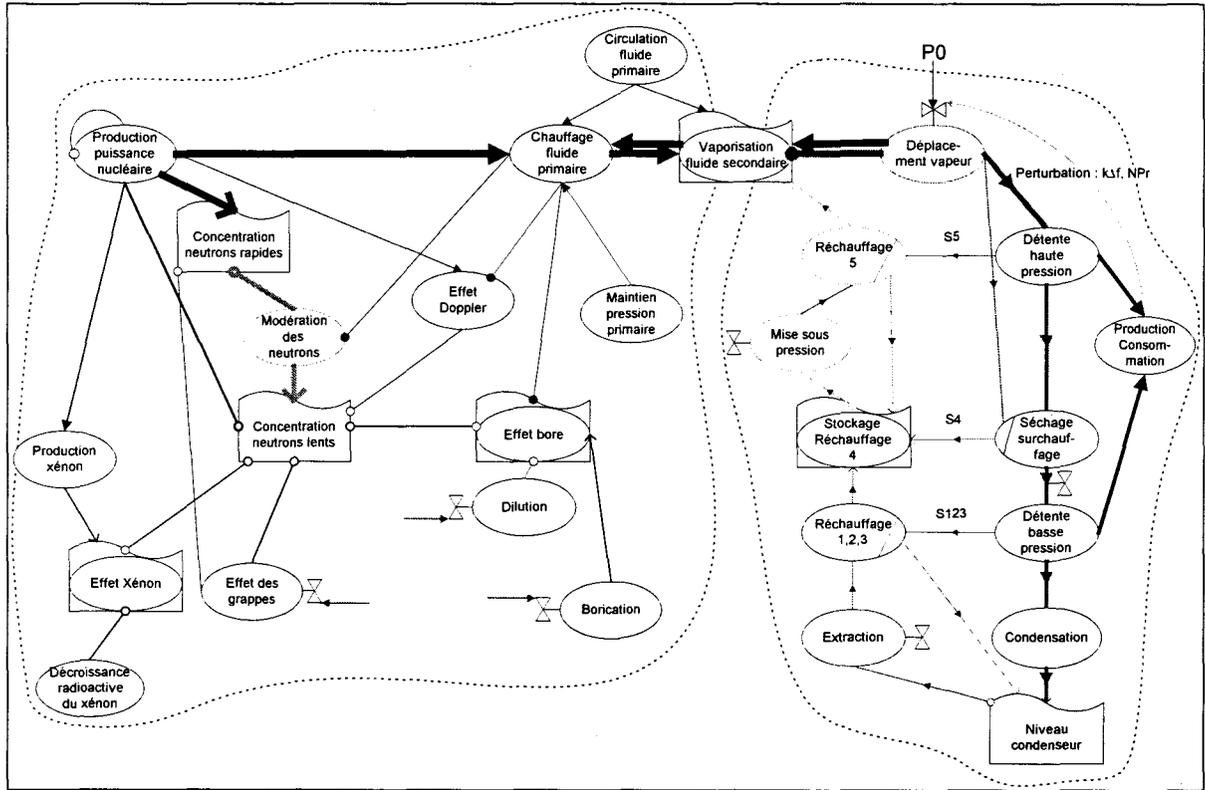


Fig. A2.1 Schéma global avec quelques notions quantitatives

Malgré l'imperfection de la représentation des notions quantitatives de l'importance de l'influence d'un processus sur un autre, la compréhension du schéma s'en trouve améliorée.

## 2. SCHEMA GLOBAL DEUX CŒURS

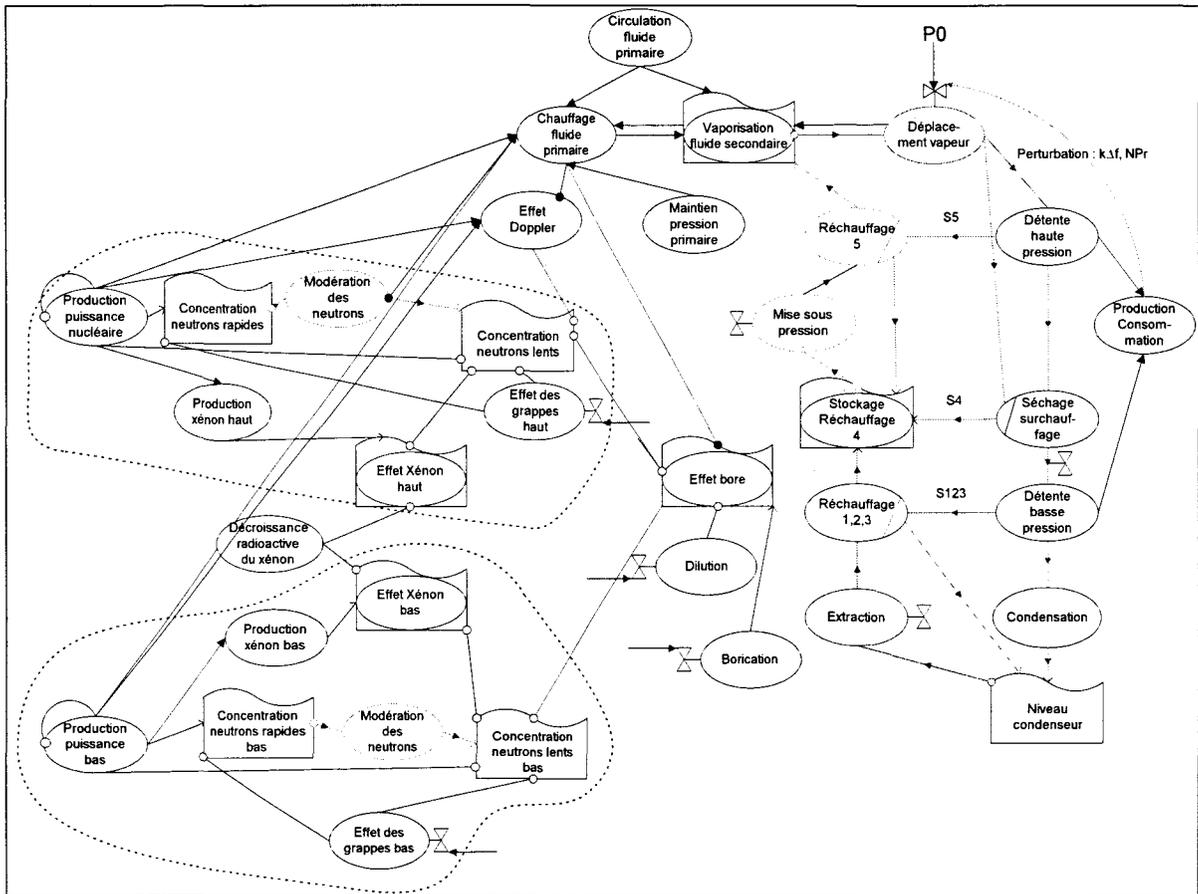


Fig. A2.2 Schéma global deux cœurs

Le schéma est devenu plus lourd, mais par contre on voit bien les deux cœurs et les effets différenciés des groupes selon la partie haute ou basse du cœur.

### ANNEXE 3. LINEARISATION DU REGULATEUR DE LA CONCENTRATION EN BORE

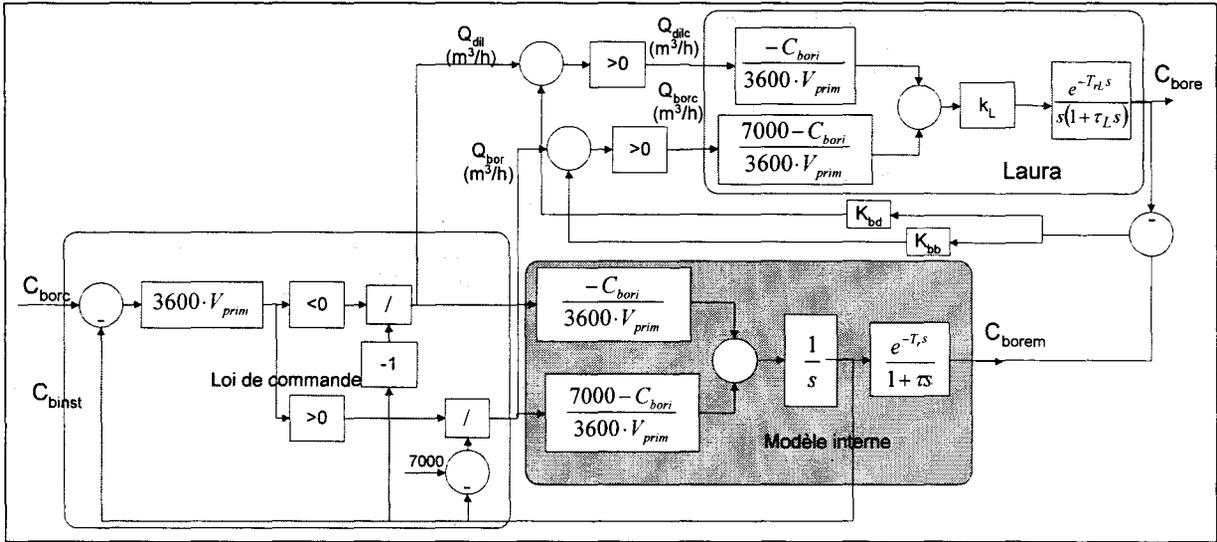


Fig. 3.1 Modèle initial

Pour étudier la stabilité de ce régulateur, il faut linéariser et simplifier le système régulé.

On fait passer le facteur  $(3600 \cdot V_{prim})^{-1}$  devant les sommateurs à l'entrée des modèles. Ce facteur apparaît alors dans les gains de retour  $K_{bb}$  et  $K_{bd}$  et se simplifie avec  $3600 \cdot V_{prim}$  placé après  $(C_{bc} - C_{binst})$ .  $C_{binst}$  est inscrit directement dans les lois de commande.

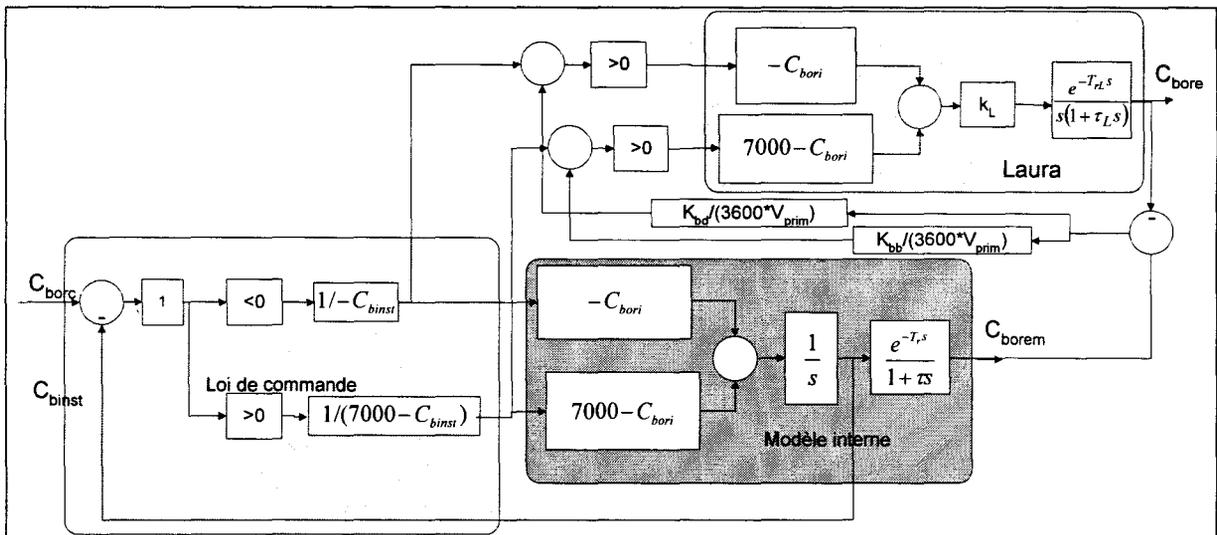


Fig. A3.2 Simplification de  $3600 \cdot V_{prim}$

Pour simplifier davantage, on fait passer  $7000 - C_{bori}$  et  $-C_{bori}$  à l'extérieur des modèles. Cette opération fait apparaître un terme supplémentaire au niveau des gains de la deuxième boucle de rétroaction.

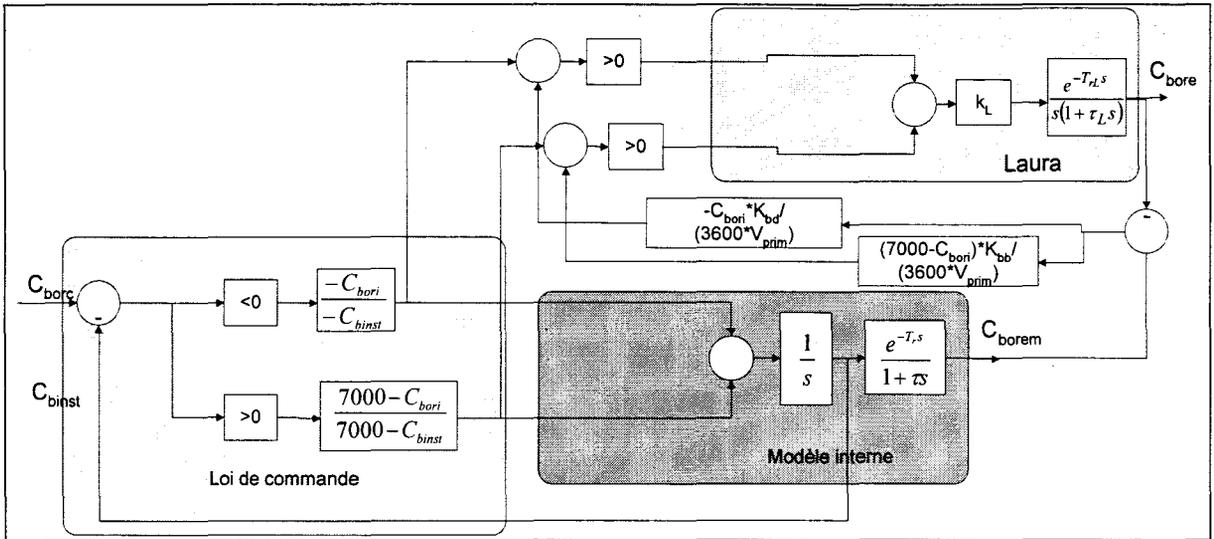


Fig. A3.3 Simplification des modèles

On pose :

$$K_{sb} = \frac{7000 - C_{bori}}{7000 - C_{binst}}, K_{sd} = \frac{-C_{bori}}{-C_{binst}} \quad (A.1)$$

Avec  $C_{bori}$  et  $C_{binst}$  compris entre 200 et 1200 ppm, on obtient :

$$\begin{aligned} 0.96 \leq K_{sb} \leq 1.3 \\ 0.4 \leq K_{sd} \leq 2.4 \end{aligned} \quad (A.2)$$

On voit la mise en évidence de deux circuits de commande exclusifs (les boites passe si supérieur/ passe si inférieur à zéro ont été enlevées).

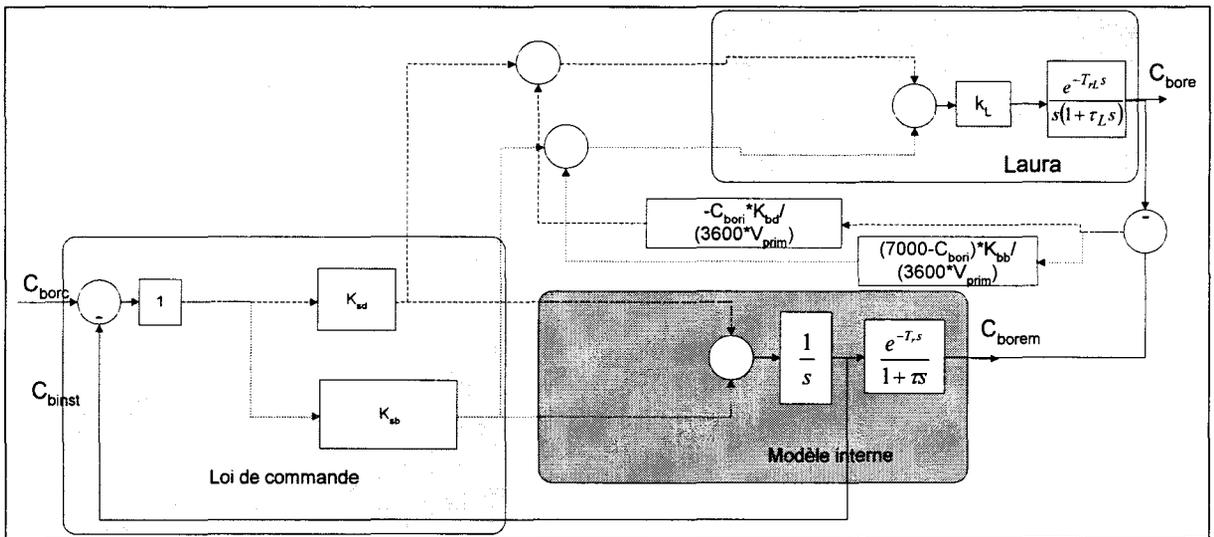


Fig. A3.4 Mise en évidence de deux circuits

Les gains  $K_{sd}$  et  $K_{sb}$  sont du même ordre de grandeur, on peut les remplacer par un gain unique  $K_s$ .

### ANNEXE 3-Linéarisation du régulateur de la concentration en bore

Les gains dans la deuxième boucle de rétroaction peuvent s'écrire comme un seul gain en posant :

$$(0-C_{bori}) \cdot K_{sd} = (C_{borinj} - C_{bori}) \cdot K_s \text{ avec } C_{borinj} = 0 \text{ ppm, } K_s = K_{sd};$$

$$(7000-C_{bori}) \cdot K_{sb} = (C_{borinj} - C_{bori}) \cdot K_s \text{ avec } C_{borinj} = 7000 \text{ ppm, } K_s = K_{sb}.$$

On obtient alors le modèle linéarisé suivant :

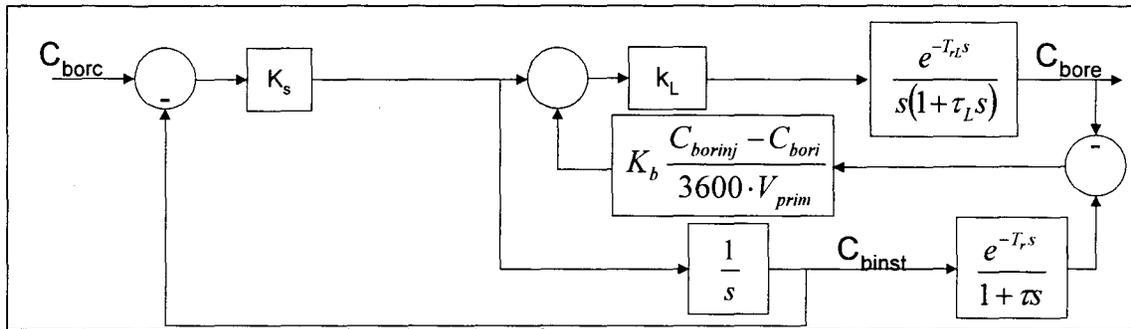


Fig. A3.5 Passage au modèle linéarisé

## ANNEXE 4. IDENTIFICATION

### 1. CONSTRUCTION DE LA FONCTION F

Tableau 4-I: Valeurs d'équilibre

	21%	60%	90%	99%
$T_{\text{moy}}$ (°C)	291.16	297.84	303.04	304.65
PosG (pas)	299.17	378.95	506.19	612
PosR	193.97	203.33	211	211
$\eta_G$ (pcm)	-1458.9	-761.90	-193.48	-13.6
$\eta_R$	-82.93	-40.81	-25.20	-25.20
Ouvt (%)	23.27	56.77	85.11	94.00

Tableau 4-II Coefficients  $\alpha(P)$ ,  $\beta'(P)$ ,  $\gamma(P)$  et  $\xi(P)$ 

P	$\alpha(P)$	$\beta'(P)$	$\gamma(P)$	$\xi(P)$
21%	2.3119	4.1013	-10.4036	-17.7116
60%	5.1251	5.2195	-12.3157	-20.9460
90%	7.4839	5.5748	-13.4710	-22.9139
99%	7.6604	4.4998	-13.7887	-23.4291

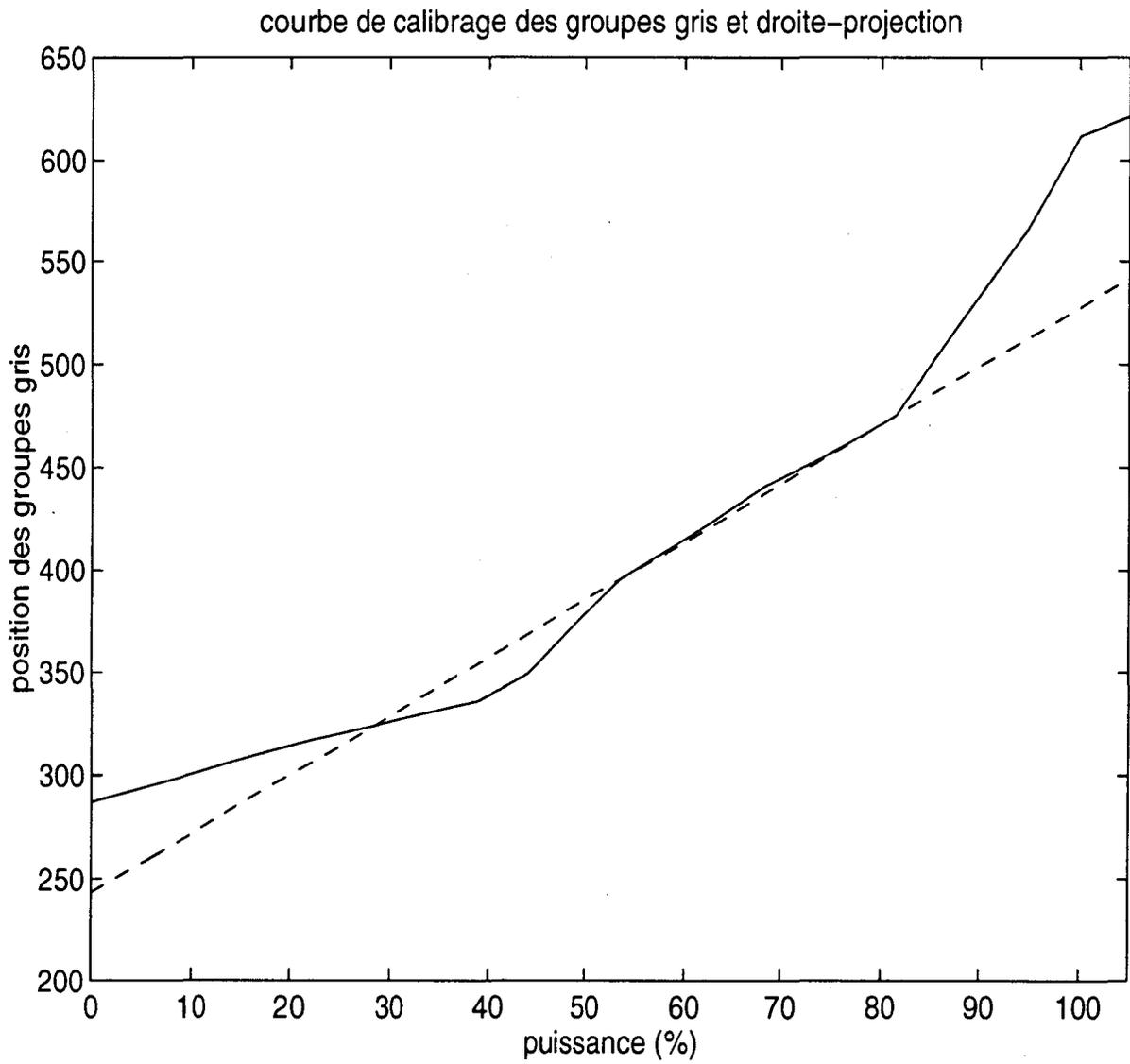
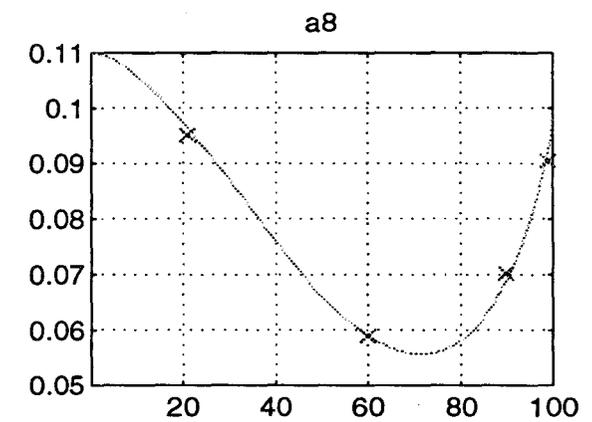
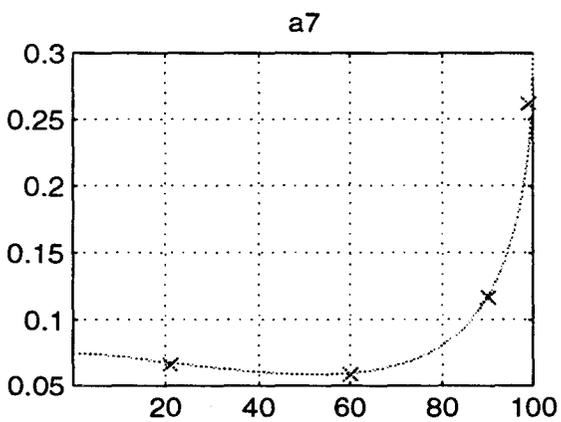
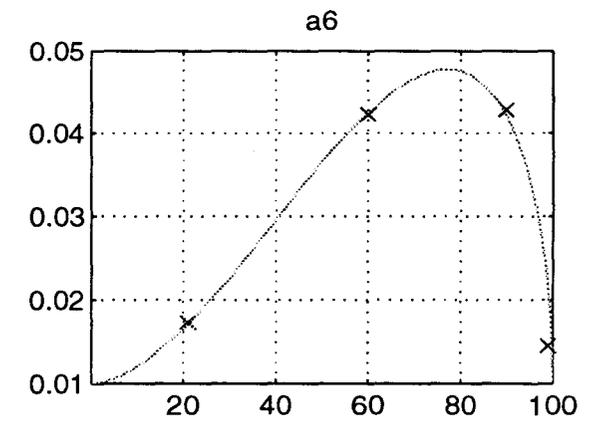
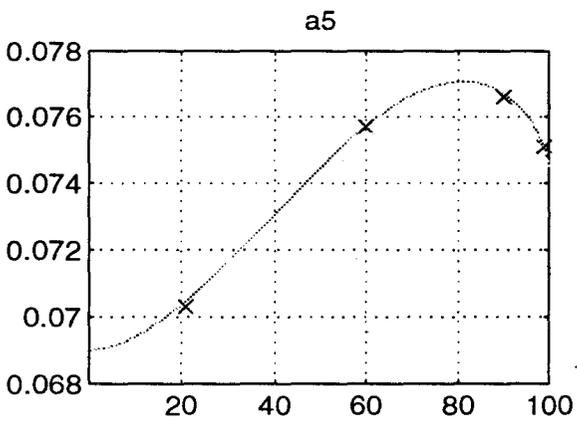
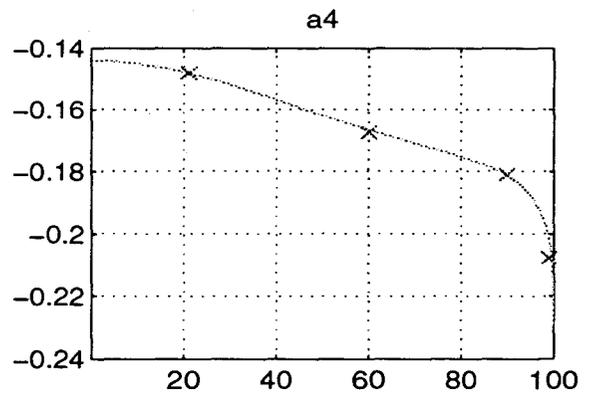
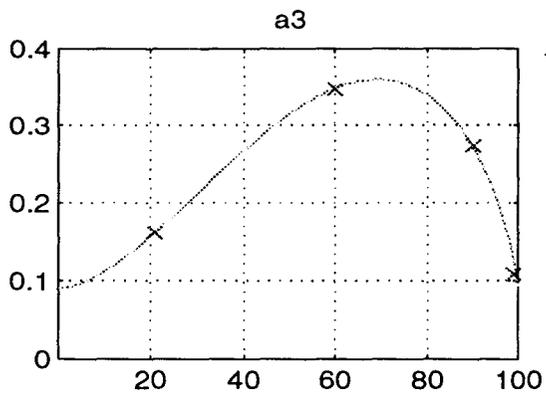
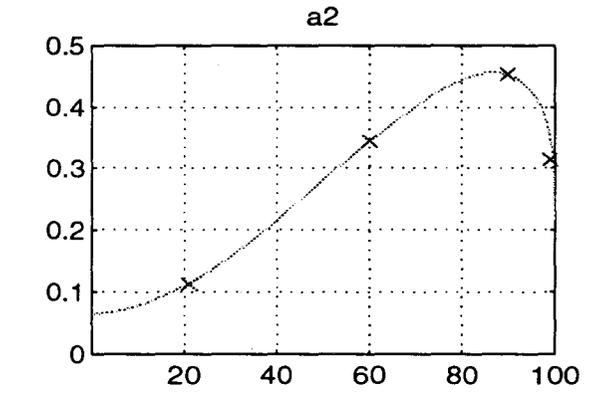
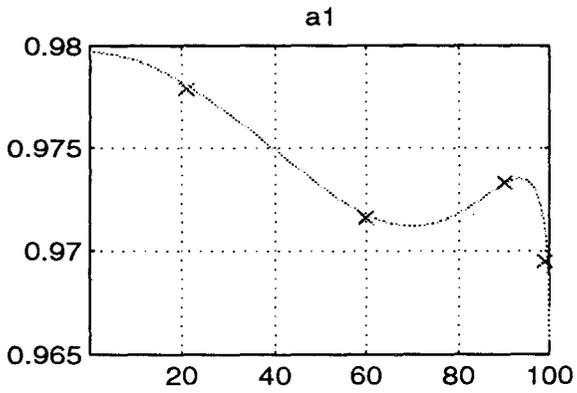
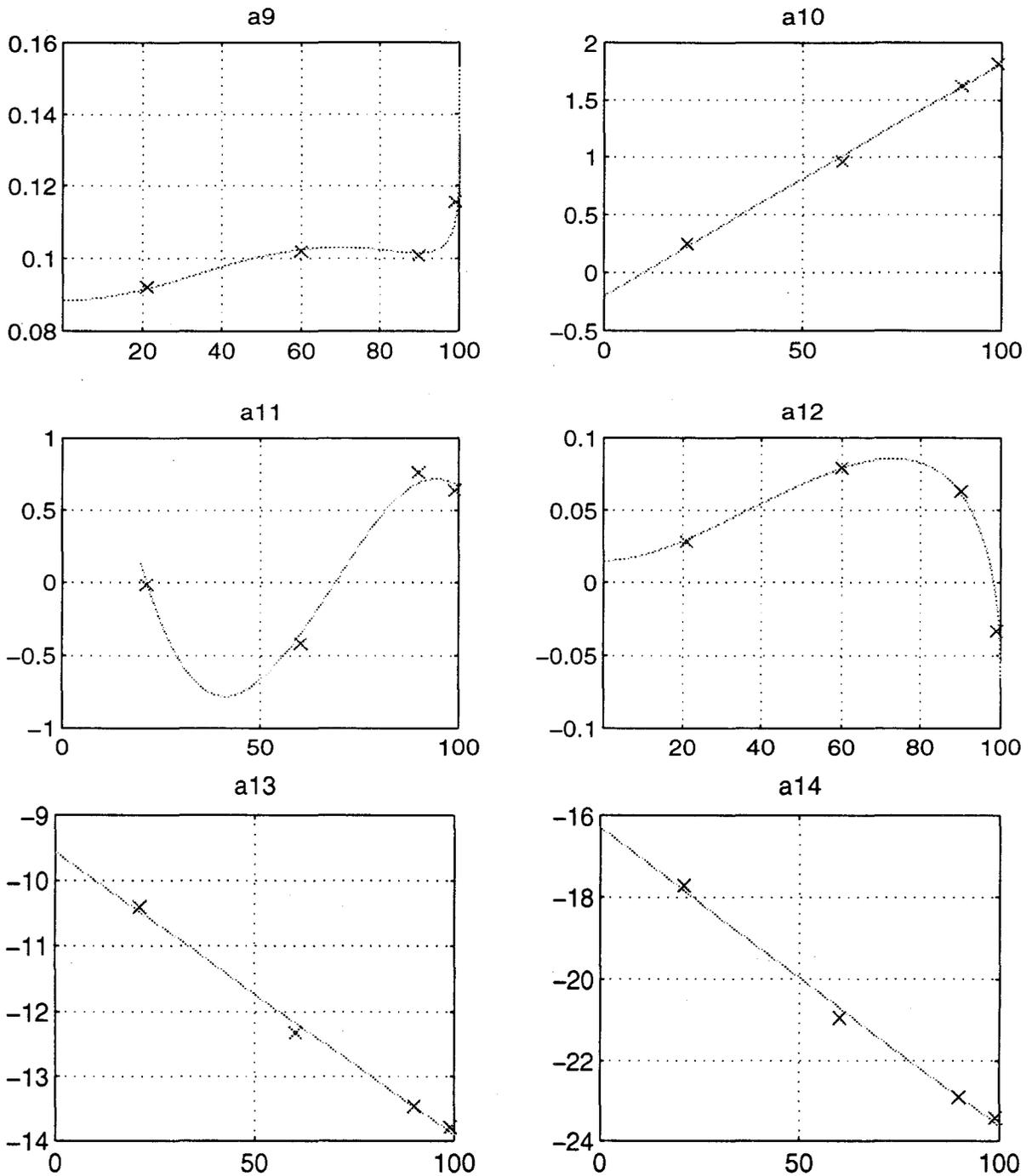
**2. COURBE DE CALIBRAGE DES GROUPES GRIS**

Figure 4.1 Courbe de calibrage des groupes gris

3. INTERPOLATION DES COEFFICIENTS  $A_I$ 

Figure4.2: Coefficients  $a_i$  de la fonction  $F$  et interpolations

3.1. Interpolations des coefficients  $a_i$  (1<sup>ère</sup> série)

$$a_1 = 0.031 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.37} \left( \frac{P}{100} \right)^6 + 0.9797 + 0.028Q(P)$$

$$a_2 = 0.62 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.41} \left( \frac{P}{100} \right)^{2.47} + 0.08 - 0.38Q(P)$$

$$a_3 = 1.05 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.7} \left( \frac{P}{100} \right)^{1.95} + 0.1$$

$$a_4 = 0.11 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.3} \left( \frac{P}{100} \right)^2 - 0.144 + 0.17Q(P)$$

$$a_5 = 0.014 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.7} \left( \frac{P}{100} \right)^{1.95} + 0.069 - 0.011Q(P)$$

$$a_6 = 0.14 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.57} \left( \frac{P}{100} \right)^{2.1} + 0.01$$

$$a_7 = -0.63 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.48} \left( \frac{P}{100} \right)^{2.1} + 0.07 - 0.45Q(P)$$

$$a_8 = -0.22 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.76} \left( \frac{P}{100} \right)^{2.18} + 0.105 + 0.01Q(P)$$

$$a_9 = -0.086 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.147} \left( \frac{P}{100} \right)^2 + 0.0883 - 0.13Q(P)$$

$$a_{10} = 2.0208 \left( \frac{P}{100} \right) - 0.2013$$

$$a_{11} = -19.6194 \left( \frac{P}{100} \right)^3 + 39.8581 \left( \frac{P}{100} \right)^2 - 22.7901 \left( \frac{P}{100} \right) + 3.2150$$

$$a_{12} = 0.52 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.61} \left( \frac{P}{100} \right)^{2.5} + 0.02 + 0.12Q(P)$$

$$a_{13} = -4.3397 \left( \frac{P}{100} \right) - 9.5655 \quad \text{et} \quad a_{14} = -7.3418 \left( \frac{P}{100} \right) - 16.2944$$

**Interpolations des coefficients  $a_i$  ( $\beta$  constant)**

$$a_1 = 0.031 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.37} \left( \frac{P}{100} \right)^6 + 0.9797 + 0.028Q(P)$$

$$a_2 = 0.63 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.33} \left( \frac{P}{100} \right)^2 + 0.065 - 0.3Q(P)$$

$$a_3 = 1.18 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.74} \left( \frac{P}{100} \right)^2 + 0.09$$

$$a_4 = 0.11 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.3} \left( \frac{P}{100} \right)^2 - 0.144 + 0.17Q(P)$$

$$a_5 = 0.014 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.7} \left( \frac{P}{100} \right)^2 + 0.069 - 0.011Q(P)$$

$$a_6 = 0.128 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.52} \left( \frac{P}{100} \right)^2 + 0.01$$

$$a_7 = -0.61 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.46} \left( \frac{P}{100} \right)^2 + 0.075 - 0.45Q(P)$$

$$a_8 = -0.2 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.75} \left( \frac{P}{100} \right)^2 + 0.11 + 0.023Q(P)$$

$$a_9 = -0.086 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.147} \left( \frac{P}{100} \right)^2 + 0.0883 - 0.13Q(P)$$

$$a_{10} = 2.0208 \left( \frac{P}{100} \right) - 0.2013$$

$$a_{11} = -19.6194 \left( \frac{P}{100} \right)^3 + 39.8581 \left( \frac{P}{100} \right)^2 - 22.7901 \left( \frac{P}{100} \right) + 3.2150$$

$$a_{12} = 0.44 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{0.47} \left( \frac{P}{100} \right)^2 + 0.015 + 0.16Q(P)$$

$$a_{13} = -4.3397 \left( \frac{P}{100} \right) - 9.5655 \quad \text{et} \quad a_{14} = -7.3418 \left( \frac{P}{100} \right) - 16.2944$$

3.2. Conventions et notations: Modèle à 42 paramètres ( $\lambda$ ,  $\chi$  et  $\alpha_j$  pour  $j$  allant de 1 à 40)

$$a_1 = \alpha_1 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{\alpha_2} \left( \frac{P}{100} \right)^{3\lambda} + \alpha_3 (e_1^0 + d_1^0 Q(P))$$

$$a_2 = \alpha_4 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{\alpha_5} \left( \frac{P}{100} \right)^{\lambda} + \alpha_6 (e_2^0 + d_2^0 Q(P))$$

$$a_3 = \alpha_7 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{\alpha_8} \left( \frac{P}{100} \right)^{\lambda} + \alpha_9 (e_3^0 + d_3^0 Q(P))$$

$$a_4 = \alpha_{10} \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{\alpha_{11}} \left( \frac{P}{100} \right)^{\lambda} + \alpha_{12} (e_4^0 + d_4^0 Q(P))$$

$$a_5 = \alpha_{13} \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{\alpha_{14}} \left( \frac{P}{100} \right)^{\lambda} + \alpha_{15} (e_5^0 + d_5^0 Q(P))$$

$$a_6 = \alpha_{16} \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{\alpha_{17}} \left( \frac{P}{100} \right)^{\lambda} + \alpha_{18} (e_6^0 + d_6^0 Q(P))$$

$$a_7 = \alpha_{19} \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{\alpha_{20}} \left( \frac{P}{100} \right)^{\lambda} + \alpha_{21} (e_7^0 + d_7^0 Q(P))$$

$$a_8 = \alpha_{22} \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{\alpha_{23}} \left( \frac{P}{100} \right)^{\lambda} + \alpha_{24} (e_8^0 + d_8^0 Q(P))$$

$$a_9 = \alpha_{25} \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{\alpha_{26}} \left( \frac{P}{100} \right)^{\lambda} + \alpha_{27} (e_9^0 + d_9^0 Q(P))$$

$$a_{10} = \alpha_{28} \left( \frac{P}{100} \right) + \alpha_{29}$$

$$a_{11} = \alpha_{30} \left( \frac{P}{100} \right)^3 + \alpha_{31} \left( \frac{P}{100} \right)^2 + \alpha_{32} \left( \frac{P}{100} \right) + \alpha_{33}$$

$$a_{12} = \alpha_{34} \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{\alpha_{35}} \left( \frac{P}{100} \right)^{\lambda} + \alpha_{36} (e_{12}^0 + d_{12}^0 Q(P))$$

$$a_{13} = \alpha_{37} \left( \frac{P}{100} \right) + \alpha_{38} \quad \text{et} \quad a_{14} = \alpha_{39} \left( \frac{P}{100} \right) + \alpha_{40}$$

$$v(P) = 5 * \tanh \left( 6 * \left( \frac{P}{100} \right)^{\chi} - 3 \right) + 5$$

## ANNEXE 5. REDUCTION DU MODELE ET DEFINITION DU PROBLEME

### 1. MODELE A 21 PARAMETRES ( $\lambda'$ , $\chi$ ET $\alpha'_K$ POUR K ALLANT DE 1 A 19)

$$a_1 = \alpha'_1 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{\alpha'_2} \left( \frac{P}{100} \right)^{3\lambda'} + \alpha'_3 (e_1^0 + d_1^0 Q(P))$$

$$\frac{a_2 \nu}{\nu+1} + \frac{a_3}{\nu+1} + a_4 = \alpha'_4 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{\alpha'_5} \left( \frac{P}{100} \right)^{\lambda'} \left( \frac{\nu}{\nu+1} f_2(P) + \frac{1}{\nu+1} f_3(P) + f_4(P) \right) \\ + \alpha'_6 \left( \frac{\nu}{\nu+1} g_2(P) + \frac{1}{\nu+1} g_3(P) + g_4(P) \right)$$

$$a_5 = \alpha'_7 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{\alpha'_8} \left( \frac{P}{100} \right)^{\lambda'} + \alpha'_9 (e_5^0 + d_5^0 Q(P))$$

$$a_6 = 15 \alpha'_7 \alpha'_8 \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{\alpha'_8} \left( \frac{P}{100} \right)^{\lambda'} + \alpha'_9 (e_6^0 + d_6^0 Q(P))$$

$$\frac{a_7 \nu}{\nu+1} + \frac{a_8}{\nu+1} + a_9 = \alpha'_{10} \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{\alpha'_{11}} \left( \frac{P}{100} \right)^{\lambda'} \left( \frac{\nu}{\nu+1} f_7(P) + \frac{1}{\nu+1} f_8(P) + f_9(P) \right) \\ + \alpha'_{12} \left( \frac{\nu}{\nu+1} g_7(P) + \frac{1}{\nu+1} g_8(P) + g_9(P) \right)$$

$$\frac{a_{10} \nu}{\nu+1} + \frac{a_{11}}{\nu+1} + a_{12} = \alpha'_{13} \left( -\ln \left( \frac{P}{100} \right) \right)^{\alpha'_{14}} \left( \frac{P}{100} \right)^{\lambda'} \\ + \frac{1}{\nu+1} \left[ \alpha'_{15} \left( \frac{\alpha'_{30}}{\alpha'_{36}} + (1+\nu) d_{12}^0 \right) \left( \frac{P}{100} \right)^3 + \alpha'_{15} \left( \frac{\alpha'_{31}}{\alpha'_{36}} - \frac{3}{2} (1+\nu) d_{12}^0 \right) \left( \frac{P}{100} \right)^2 \right] \\ + \frac{1}{\nu+1} \left[ \alpha'_{16} \left( \nu + \frac{\alpha'_{32}}{\alpha'_{28}} \right) \left( \frac{P}{100} \right) + \alpha'_{15} \left( \frac{\alpha'_{29}}{\alpha'_{36}} \nu + \frac{\alpha'_{33}}{\alpha'_{36}} + (1+\nu) e_{12}^0 \right) \right]$$

$$\frac{a_{13} \nu}{\nu+1} + \frac{a_{14}}{\nu+1} = \alpha'_{17} \frac{\nu + \alpha'_{18}}{\nu+1} \left( \frac{P}{100} + \alpha'_{19} \right)$$

$$\nu(P) = 5 * \tanh \left( 6 * \left( \frac{P}{100} \right)^{\chi} - 3 \right) + 5$$

**2. MODELE A 12 PARAMETRES ( $\beta_N$  POUR N ALLANT DE 1 A 12)**

$$a_1 \text{ discret} = 1 \quad (\text{soit } a_1 \text{ continu} = 0)$$

$$a_2 = a_3 = a_4 = a_5 = a_6 = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{a_7\nu}{\nu+1} + \frac{a_8}{\nu+1} + a_9 = & \beta_2 \left( -\ln\left(\frac{P}{100}\right) \right)^{\beta_3} \left( \frac{P}{100} \right)^{\beta_1} \left( \frac{\nu}{\nu+1} f_7(P) + \frac{1}{\nu+1} f_8(P) + f_9(P) \right) \\ & + \beta_4 \left( \frac{\nu}{\nu+1} g_7(P) + \frac{1}{\nu+1} g_8(P) + g_9(P) \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{a_{10}\nu}{\nu+1} + \frac{a_{11}}{\nu+1} + a_{12} = & \beta_5 \left( -\ln\left(\frac{P}{100}\right) \right)^{\beta_6} \left( \frac{P}{100} \right)^{\beta_1} \\ & + \frac{1}{\nu+1} \left[ \beta_7 \left( \frac{\alpha_{30}^0}{\alpha_{36}^0} + (1+\nu)d_{12}^0 \right) \left( \frac{P}{100} \right)^3 + \beta_7 \left( \frac{\alpha_{31}^0}{\alpha_{36}^0} - \frac{3}{2}(1+\nu)d_{12}^0 \right) \left( \frac{P}{100} \right)^2 \right] \\ & + \frac{1}{\nu+1} \left[ \beta_8 \left( \nu + \frac{\alpha_{32}^0}{\alpha_{28}^0} \right) \left( \frac{P}{100} \right) + \beta_7 \left( \frac{\alpha_{29}^0}{\alpha_{36}^0} \nu + \frac{\alpha_{33}^0}{\alpha_{36}^0} + (1+\nu)e_{12}^0 \right) \right] \end{aligned}$$

$$\frac{a_{13}\nu}{\nu+1} + \frac{a_{14}}{\nu+1} = \beta_9 \frac{\nu + \beta_{10}}{\nu+1} \left( \frac{P}{100} + \beta_{11} \right)$$

$$\nu(P) = 5 * \tanh \left( 6 * \left( \frac{P}{100} \right)^{\beta_{12}} - 3 \right) + 5$$

**3. DETERMINATION DE BORNES SUR LES PARAMETRES**Tableau 5-I: Bornes sur les paramètres  $\alpha'$ ,  $\lambda'$  et  $\chi$  (modèle à 21 paramètres)

Borne inférieure	Paramètre $\alpha'$	borne supérieure
0	$\alpha'_1$	0.1500
0.2500	$\alpha'_2$	0.9500
0	$\alpha'_3$	1
0	$\alpha'_4$	1.5000
0	$\alpha'_5$	0.3000
0	$\alpha'_6$	2
0	$\alpha'_7$	0.0420
0.1000	$\alpha'_8$	0.9500
0	$\alpha'_9$	1
0.2000	$\alpha'_{10}$	3
-0.1000	$\alpha'_{11}$	2
0.2500	$\alpha'_{12}$	3
-0.6000	$\alpha'_{13}$	4
0	$\alpha'_{14}$	3
-3	$\alpha'_{15}$	3
-0.5	$\alpha'_{16}$	0.5
-12.34	$\alpha'_{17}$	5
1	$\alpha'_{18}$	10
0.001	$\alpha'_{19}$	3
0.25	$\chi$	4
1.1000	$\lambda'$	6

4. CONSTRUCTION DE LA FONCTION DE COUT

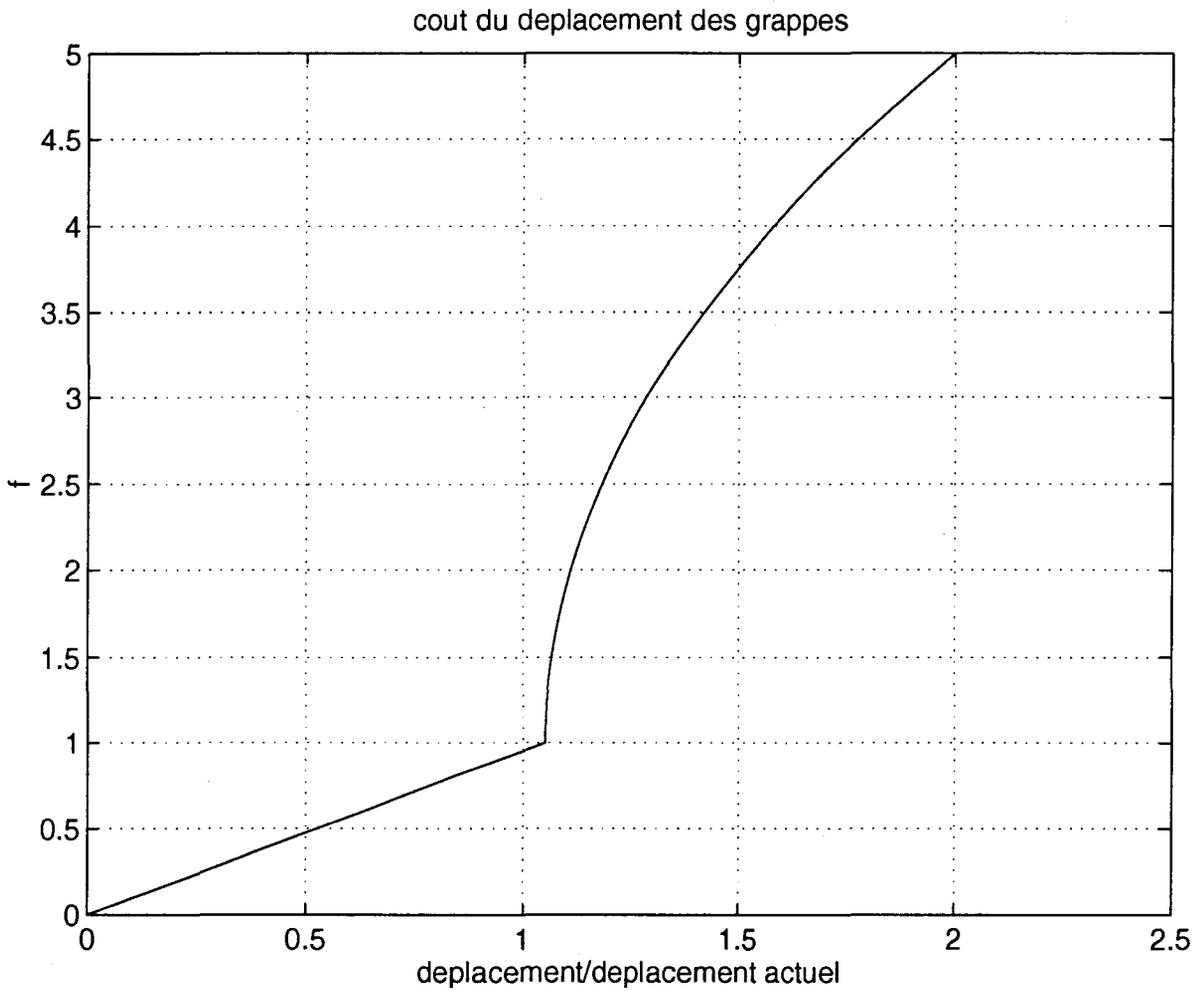


Fig. 5.1 Allure de la fonction de pénalisation du déplacement

