



INGENIORAT EN ELECTRONIQUE  
**PROJET DE FIN D'ETUDES**

CONTROLE ET REGULATION

DANS LES CENTRALES ELECTRONUCLEAIRES  
DE PUISSANCE DU TYPE CANDU 600 MWE.



Proposé par :

M. KACIMI.

Etudié par :

M. ABDELGUERFI.

M. DRINALI.

المدرسة لوطنية للعلوم الهندسية  
- المكتبة -  
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHÈQUE

INGENIORAT EN ELECTRONIQUE  
**PROJET DE FIN D'ETUDES**

---

CONTROLE ET REGULATION  
DANS LES CENTRALES ELECTRONUCLEAIRES  
DE PUISSANCE DU TYPE CANDU 600 MWE.



Proposé par :  
M. KACIMI.

Etudié par :  
M. ABDELGUERFI.  
M. DRINALI.

## REMERCIEMENTS

*Le travail qui a fait l'objet du présent mémoire a été réalisé au Centre des Sciences et de la Technologie Nucléaire d'ALGER.*

*Nous remercions vivement Monsieur KACIMI pour nous avoir guidé et fait bénéficier de sa vaste expérience tout au long de notre travail.*

*Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de notre sincère gratitude.*

*Nous avons été sensibles à l'intérêt que Messieurs ALLEK, SELLAM et ABERKANE ont porté à notre travail.*

*Nous les remercions pour leurs nombreuses suggestions et précieux conseils.*

*Nos remerciements vont également à Mademoiselle REBIHA qui a bien voulu accepter de dactylographier ce texte, ce qui représente une bonne somme de travail et de patience.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à tous les services du CSTN dont l'aide permanente nous a été précieuse, en particulier le Labo-Photo et le service d'impression.*

*Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail soient remerciés.*

## -:- INTRODUCTION -:-

Le but que nous nous sommes assignés dans notre travail est essentiellement axé sur l'étude des régulations.

Ce travail comporte deux parties :

- Une partie théorique,
- Une partie expérimentale.

La partie théorique nous permettra de présenter de façon générale les caractéristiques de la régulation.

La partie expérimentale nous permettra de présenter les différents circuits mis en oeuvre dans la régulation d'un processus industriel. L'exemple choisi concerne la description des caractéristiques des régulations prévues sur la centrale électronucléaire de puissance "CANDU 600 Mwe".

Afin de rendre l'exposé de cette partie plus accessible, nous avons préféré la diviser en trois parties:

- La première partie nous permettra de décrire les principaux composants constituant la centrale,
- La deuxième partie sera axée sur l'étude des systèmes de régulation prévus sur ce type de centrale,
- La troisième et dernière partie nous permettra de présenter le travail expérimental réalisé, ainsi que les résultats obtenus.

- S O M M A I R E -

CHAPITRE I

- I.1. - Introduction
- I.2. - Définition d'un système physique
- I.3. - Classification des systèmes
- I.4. - Système régulé
  - I.4.1. - Définition d'un système régulé
  - I.4.2. - Constitution des boucles de régulation
  - I.4.3. - Equation générale d'une boucle de régulation
- I.5. - Caractéristique d'un système bouclé :
  - I.5.1. - Stabilité
  - I.5.2. - Précision
- I.6. - Correction
  - I.6.1. - Introduction
  - I.6.2. - Correcteurs classique
  - I.6.3. - Correction par chaîne d'anticipation.

CHAPITRE II

- II.1 : Description de la centrale électronucléaire de puissance " CANDU 600 MWe "
  - II.1.A. - Introduction
  - II.1.b. - Le Réacteur
    - II.1.b.1. - Principe de la réaction en chaîne
    - II.1.b.2. - Fonctionnement du réacteur
  - II.1.c. - Le circuit primaire
  - II.1.d. - Le pressuriseur
  - II.1.e. - Les générateurs de vapeur
    - II.1.e.1. - Introduction
    - II.1.e.2. - Description des équipements d'un générateur de vapeur.
    - II.1.e.3. - Description du fonctionnement.

.../...

## II.2. - Contrôle du CANDU 600 MWe

### II.2.1. - Introduction

### II.2.2. - Etude des système de régulation

#### II.2.2.1. - Introduction

#### II.2.2.2. - Contrôle de réactivité.

##### II.2.2.2.1. - Introduction

##### II.2.2.2.2. - Le réacteur

##### II.2.2.2.3. - Mécanismes de réactivité.

#### II.2.2.3. - Régulation du niveau dans les Générateurs de vapeur

##### II.2.2.3.2. - Description physique

###### II.2.2.3.2.1. - Régulation simple

###### II.2.2.3.2.2. - Défauts de la régulation simple

###### II.2.2.3.2.3. - Régulateur utilisé dans la centrale

##### II.2.2.3.3. - Modélisation du régulateur utilisé

###### II.2.2.3.3.1. - Introduction

###### II.2.2.3.3.2. - Signal de puissance

###### II.2.2.3.3.3. - Signal d'erreur de niveau

###### II.2.2.3.3.4. - Signal d'erreur de débit

###### II.2.2.3.3.5. - Signal de commande appliqué au régulateur.

#### II.2.2.4. - Régulation de pression au niveau des Générateurs de vapeur

##### II.2.2.4.1. - Introduction

###### II.2.2.4.1.1. - Rôle du régulateur de pression

###### II.2.2.4.1.2. - Les différents modes de fonctionnement.

##### II.2.2.4.2. - Régulation en mode réchauffage

##### II.2.2.4.3. - Régulation en mode refroidissement

##### II.2.2.4.4. - Régulation en mode fixe

###### II.2.2.4.4.1. - Régulation en mode turbine prioritaire

###### II.2.2.4.4.2. - Régulation en mode réacteur prioritaire.

.../...

## II.3. - Réalisation :

II.3.1. - Introduction

II.3.2. - Principe du calcul analogique

II.3.2.1. - Unité machine

II.3.2.2. - Facteur d'amplitude

II.3.2.3. - Choix de l'échelle des temps.

II.3.3. - Caractéristiques des circuits électronique utilisés

II.3.3.1. - Introduction

II.3.3.2. - L'amplificateur opérationnel

II.3.3.2.1. - Introduction

II.3.3.2.2. - Amplificateur inverseur

II.3.3.2.3. - Amplificateur sommateur

II.3.3.2.4. - Amplificateur de différence

II.3.3.2.5. - Intégrateur

II.3.3.2.6. - Amplificateur dérivateur

II.3.3.2.7. - Filtres

II.3.3.2.7.1. - Introduction

II.3.3.2.7.2. - Filtre à action proportionnelle et intégrale.

II.3.3.2.7.3. - Filtre à action proportionnelle et dérivée.

II.3.3.2.7.4. - Filtre passe bas.

II.3.3.2.7.2. - Générateurs de fonctions.

II.3.3.3. - Multiplieur - Diviseur :

II.3.3.3.1. - Multiplieur

II.3.3.3.2. - Diviseur

II.3.4. - Résolutions d'équations différentielles :

II.3.4.1. - Introduction

II.3.4.2. - Résolution d'une équation différentielle du second ordre

II.3.4.3. - Résolution de système d'équations différentielles couplées

II.3.5. - Réalisation pratique

II.3.6. - Conclusion.



I.1 INTRODUCTION :

Notre travail étant axé sur l'étude des systèmes de régulations dans les Centrales Electronucléaires de puissance du type CANDU 600 MWe. Il nous a paru utile de préciser quelques notions concernant les systèmes asservis. C'est ce que nous nous proposons de faire dans le présent chapitre.

I.2 - DEFINITION D'UN SYSTEME PHYSIQUE :

D'une façon générale un système physique est constitué d'un ensemble d'éléments liés les uns aux autres de façon à former un tout.

Du point de vu pratique, le système peut être défini par une grandeur physique qui caractérise son état. Ce dernier est généralement fonction de plusieurs paramètres liés à l'environnement dans lequel est placé le système physique.

Schématiquement parlant, on pourra caractériser l'effet de l'environnement par une grandeur qui perturbe l'état du système.

Si l'on désire minimiser l'effet des perturbations, il faudra prévoir un moyen d'agir extérieurement sur le système de façon à maintenir le système dans un état désiré.

De ce qui précède, on en déduit qu'il est possible de représenter schématiquement un système physique sous la forme d'une boîte sur laquelle agissent deux grandeurs :

- l'une caractérisant l'effet des perturbations,
- l'autre celui de la commande.

L'état du système sera caractérisé par une grandeur de sortie.

La figure : I.1 résume les considérations précédentes.

I.3 - CLASSIFICATION DES SYSTEMES :I.3.1. - INTRODUCTION :

D'une façon générale, la grandeur destinée à assurer la commande du système physique est réalisée par un système de commande qui reçoit un signal à l'entrée qui informe :

.../...

## I.2.

- soit sur la sortie désirée : on parle alors de système de commande en boucle ouverte,
- soit sur l'erreur entre le signal désiré en sortie et le signal réellement obtenu en sortie : on parle alors de système de commande en boucle fermée.

### I.3.2 - SYSTEME DE COMMANDE EN BOUCLE OUVERTE :

La figure : I.2 qui donne le schéma de principe d'un tel système de commande montre que le signal de commande U appliqué au système ne tient compte d'aucune information sur l'état du système.

La commande est en quelque sorte "aveugle". Il en résulte que la sortie ne suit pas de façon convenable la commande appliquée à l'entrée du fait des perturbations appliquées à l'entrée.

Le système de commande est simple mais imprécis.

On utilise généralement ce système quand les effets des perturbations ne sont pas importants et on a une connaissance précise du système à commander.

### I.3.3. SYSTEME DE COMMANDE EN BOUCLE FERMEE :

La figure : I.3 qui donne le schéma de principe d'un tel système montre que le signal de commande U de ce système dépend de la sortie. L'information de retour "Feed-back" tient compte de l'état de la sortie, des perturbations éventuelles et dispense l'utilisateur d'une connaissance parfaite du système à commander.

D'une manière générale, les systèmes de commande en boucle fermée ou asservissements sont conçus de manière à corriger par eux-mêmes les écarts entre la valeur réelle du signal de sortie et la valeur désirée correspondant à la loi imposée à l'entrée.

## I.4. SYSTEME REGULE :

### I.4.1. DEFINITION D'UN SYSTEME REGULE :

Un système régulé est un système asservi qui maintient constante une grandeur physique ou qui fait varier celle-ci suivant une loi préétablie (régulation à programme).

Dans le premier cas, la régulation devient une stabilisation.

#### I.4.2 - ELEMENTS DE CONSTITUTION DES BOUCLES DE REGULATION :

La figure : I.4. donne le schéma d'ensemble d'une chaîne de régulation.

Ce système fonctionne de la façon suivante :

Un signal d'entrée E ou signal de consigne est appliqué au système de façon à placer la sortie de ce dernier dans un état déterminé.

Du fait des perturbations auxquelles est soumis le système, la sortie de ce dernier peut ne pas "obéir" aux lois qui lui sont dictées par le signal de consigne.

Pour pallier cet inconvénient, il a été prévu une contre réaction destinée à informer l'entrée de l'état pris par la sortie du système.

La comparaison entre le signal de commande et le signal de contre réaction permet de générer un signal d'écart dont l'amplitude et le signe nous renseignent sur la manière dont s'écarte la sortie de l'entrée.

Dans un système idéal, le signal d'écart est nul.

Dans la pratique, il n'en est jamais ainsi, c'est la raison pour laquelle le signal d'erreur est appliqué à un régulateur constitué d'un organe de commande et un organe de réglage dont le rôle est de **minimiser le signal d'erreur E**.

Certains éléments, non indispensables à la régulation, peuvent être inclus dans les boucles. Ils assurent généralement des fonctions de sécurité, de surveillance et de calcul.

Citons par exemple :

- des enregistreurs qui permettent la connaissance de l'état des mesures à chaque instant,
- des sécurités qui évitent les accidents lorsque la régulation est défaillante,
- des opérateurs algébriques : tels que :
  - addition et soustraction des signaux (somme ou différence de débit, pression, etc...),
  - multiplication et division de signaux
- des opérateurs dynamiques : (intégrateurs, dérivateurs, etc...)

#### I.4.3 - EQUATION GENERALE D'UNE BOUCLE DE REGULATION :

La figure : I.5. donne le schéma fonctionnel d'une boucle de régulation, on y remarquera la présence des signaux suivants :

.../...

#### I.4.

- C (P) : variation de la consigne,  
E (P) : écart,  
G (P) : fonction de transfert de l'organe de commande,  
H<sub>R</sub>(P) : fonction de transfert de l'organe de réglage,  
V (P) : variation du signal de réglage,  
D (P) : variation de la grandeur perturbatrice,  
H<sub>D</sub>(P) : fonction de transfert perturbatrice,  
S (P) : variation du signal de sortie.

L'équation générale du système bouclé précédent est de la forme :

$$S(P) = C(P) \frac{G(P) \cdot H_R(P)}{1 + G(P) \cdot H_R(P)} + D(P) \frac{H_D(P)}{1 + G(P) \cdot H_R(P)}$$

L'expression précédente montre que le signal de sortie S(P) est à chaque instant la somme de deux termes :

- Un terme relatif à la consigne,
- Un terme dû à la perturbation D(P).

#### I.5 - CARACTERISTIQUE D'UN SIGNAL BOUCLE :

D'une façon générale, un système est caractérisé par deux grandeurs essentielles qui sont :

- la stabilité,
- la précision.

##### I.5.1. STABILITE :

##### I.5.1.1. INTRODUCTION :

La stabilité d'un système bouclé peut être conçue de la manière suivante :

Lorsque l'entrée est soumise à une perturbation de durée finie le système doit revenir à son état initial après quelques oscillations, s'il y a lieu.

Ladite perturbation engendre un régime transitoire qui doit être caractérisé par une amplitude décroissante en fonction du temps. Si le système continue à osciller de façon permanente, il est instable.

Il l'est également lorsque les oscillations apparaissent systématiquement en l'absence de toute excitation extérieure.

.../...

S'il en est ainsi, la sortie "S" du système bouclé ne peut plus être prévue en fonction de l'entrée.

Un asservissement dont la sortie ne peut plus être maîtrisée n'est plus un asservissement. Celui-ci doit répondre correctement aux ordres, et son comportement doit être prévisible.

Dans la négative, le système est instable.

Pour déterminer si un système est stable ou instable, plusieurs critères sont utilisés. Le plus important est le critère du revers.

#### I.5.1.2. CRITERE DU REVERS :

Le critère du revers peut s'énoncer comme suit :

Si en parcourant dans le sens des pulsations croissantes, le lieu de Nyquist en boucle ouverte d'un système asservi, on laisse le point critique ( $\bullet 1$ ) à sa gauche, le système est stable. Si on laisse le point critique à droite, il est instable. Le système sera juste oscillant si le lieu de Nyquist passe par le point critique.

#### I.5.2 - PRECISION :

##### I.5.2.1. - INTRODUCTION :

Si l'on se reporte au schéma du système bouclé de la figure : I.6, on dira que le système est d'autant plus précis que la différence  $E(t)$  entre la valeur réelle de la grandeur de sortie est la valeur désirée est réduite.

Pour caractériser la grandeur  $E(t)$  il suffira d'utiliser les caractéristiques de la transformée de Laplace. On montre alors que :

$$E(P) = \frac{1}{1 + T(P)} E(P) - \frac{G_2(P) \cdot H(P)}{1 + T(P)} D(P)$$

Expression dans laquelle :

$$T(P) = G_1(P) G_2(P) H(P)$$

$T(P)$  est appelée fonction de transfert en boucle ouverte.

La relation précédente montre que  $E(P)$  est composée de deux termes :

- Un terme relatif à l'entrée  $E(P)$ ,
- Un terme dû à la présence d'une perturbation.

.../...

I.5.2.2. PRECISION DYNAMIQUE :

Dans la pratique, on montre que tant que la réponse transitoire d'un système bouclé à un signal d'entrée quelconque possède une valeur non négligeable, la fonction  $E(t)$  caractérise ce que l'on appelle la " précision dynamique " du système bouclé.

Pour des raisons de commodité, on caractérise le régime transitoire d'un système bouclé par la forme de sa réponse à la fonction échelon unitaire.

Dans ce cas, on pourra admettre que la valeur désirée de la grandeur de sortie est une constante " K " et par conséquent :

$$E(t) = K - S(t)$$

On peut donc suivre les variations de  $E(t)$  en observant la valeur par rapport à la constante " K " de la sortie  $S(t)$ . L'étude de la réponse à un échelon unitaire d'un système quelconque permet donc de caractériser sa précision dynamique.

I.5.2.3. PRECISION STATIQUE :I.5.2.3.1. DEFINITION DES ERREURS STATIONNAIRES :

On appelle erreur stationnaire d'ordre n la limite  $E_{on}$  relative à une entrée.

$$e_n(t) = \frac{t^{n-1}}{(n-1)!} u(t)$$

$e_n(t)$  étant une entrée de transformée de Laplace :

$$E_n(P) = \frac{1}{P^n}$$

Ainsi, l'erreur stationnaire du premier ordre  $E_{o1}$ , correspond à une entrée en échelon unitaire :

$$e(t) = u(t)$$

Et l'erreur stationnaire d'ordre deux,  $E_{o2}$ , correspond à une entrée en rampe unitaire :

$$e(t) = t \cdot u(t)$$

Le paragraphe I.5.2.1. nous a permis de montrer que :

$$E(P) = W(P) \cdot E(P)$$

avec :

$$W(P) = \frac{1}{1 + T(P)} \quad \text{si } E(P) \text{ est l'entrée principale.}$$

ou :

$$W(P) = \frac{T(P)}{1 + T(P)} \cdot \frac{1}{G_1(P)} \quad \text{si } E(P) \text{ est une perturbation.}$$

On peut donc écrire alors que :

$$E_{on}(P) = \lim_{P \rightarrow 0} \frac{W(P)}{P^{n-1}}$$

.../...

I.5.2.3.2. EXPRESSION DES ERREURS STATIONNAIRES RELATIVES A UNE ENTREEPRINCIPALE :

La fonction de transfert en boucle ouverte d'un système asservi est de la forme :

$$T(P) = \frac{K}{P^\alpha} \frac{1 + a.p + \dots}{1 + b.p + \dots}$$

Donc lorsque P tend vers zéro :

$$T(P) \simeq K/P^\alpha$$

- Si la fonction de transfert en boucle ouverte ne possède pas de pôle à l'origine ( $\alpha = 0$ ), on vérifiera facilement que :

$$E_{01} = \frac{1}{1 + K}$$

et que toutes les erreurs d'ordre supérieur tendent vers l'infini.

- Si la fonction de transfert en boucle ouverte T(P) possède un pôle à l'origine d'ordre ( $\alpha > 0$ ), on trouve alors que :

$$E_{01} = E_{02} = \dots = E_{0\alpha} = 0$$

$$E_{0\alpha+1} = \frac{1}{K}$$

Les erreurs d'ordre supérieur à ( $\alpha + 1$ ) tendant vers l'infini.

D'une manière générale, la précision statique :

- dépend de l'ordre du pôle à l'origine de la fonction de transfert en boucle ouverte.
- est proportionnelle au gain K de la boucle ouverte.

La précision statique est d'autant meilleure que K possède une valeur élevée.

Toutefois, l'accroissement du gain K finit par provoquer la destabilisation (le pompage) du système.

En conclusion, le choix du gain en boucle ouverte (K) résulte d'un compromis :

- Ou bien on choisit K faible pour avoir une bonne stabilité mais l'asservissement est mou et pour précis.
- Ou bien on prend K élevé, on améliore alors la précision statique au dépend de la stabilité.

I.6 - CORRECTION :I.6.1. INTRODUCTION :

Les correcteurs sont généralement des systèmes conçus pour modifier notablement la fonction de transfert d'un système asservi dans un domaine de fréquence bien précis dans le but d'améliorer certaines caractéristiques principales du système boucle.

Les correcteurs peuvent être classés en deux groupes :

- Les correcteurs classiques,
- Les correcteurs du type anticipation.

I.6.2. CORRECTEURS CLASSIQUES :

Les correcteurs classiques les plus souvent utilisés sont :

- Le correcteur proportionnel et intégral (PI)
- Le correcteur proportionnel et dérivé (PD)
- Le correcteur proportionnel, intégral et dérivé (PID)

I.6.2.1. CORRECTEUR PROPORTIONNEL ET INTEGRAL :

Un tel correcteur est caractérisé par une fonction de transfert  $C(P)$  du type :

$$C(P) = K \left[ 1 + \frac{1}{T_P} \right] = K \frac{1 + T_P P}{T_P}$$

La relation précédente montre que ce type de correcteur contribue à ajouter un pôle à l'origine à la fonction de transfert en boucle ouverte ce qui permet d'améliorer la précision statique d'ordre un.

I.6.2.2. CORRECTEUR PROPORTIONNEL ET DERIVE :

Un tel correcteur est caractérisé par une fonction de transfert  $C(P)$  du type

$$C(P) = K [1 + T_P P]$$

La relation précédente montre que ce type de correcteur en augmentant la **mar**ge de phase permet d'améliorer la stabilité.

I.6.2.3. CORRECTEUR PROPORTIONNEL, INTEGRAL ET DERIVE :

Un tel correcteur est caractérisé par une fonction de transfert  $C(P)$  du type :

.../...

I.9.

$$C(P) = K \left[ 1 + \frac{1}{T_{1P}} + T_{2P} \right]$$

La relation précédente montre que ce type de correcteur combine les effets des deux correcteurs précédemment définis.

### I.6.3. CORRECTION PAR CHAÎNE D'ANTICIPATION :

La figure : I.7 donne le schéma d'ensemble d'un tel correcteur.

Cette figure montre que la chaîne normale est soumise en un point intermédiaire à un signal d'anticipation issue :

- soit de l'entrée principale,
- soit d'un signal qui tient compte des perturbations auxquelles est soumis le système.

Le choix du point auquel est appliqué le signal d'anticipation ainsi que les gains  $G_1$  et  $G_2$  doit être tel qu'il y ait minimisation de l'erreur.

On pourra montrer que :

$$E(P) = \frac{A(P) - G_2(P) C(P)H(P)}{1 + G_1(P)G_2(P)H(P)} E(p)$$

L'expression précédente montre que l'erreur est nulle pour :

$$A(P) = G_2(P)G(P)H(P)$$

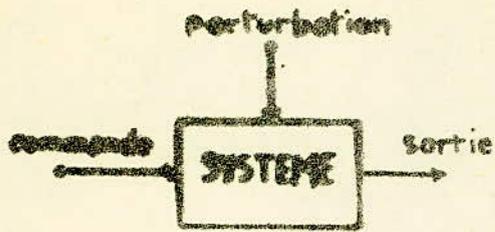


fig: I.1 système

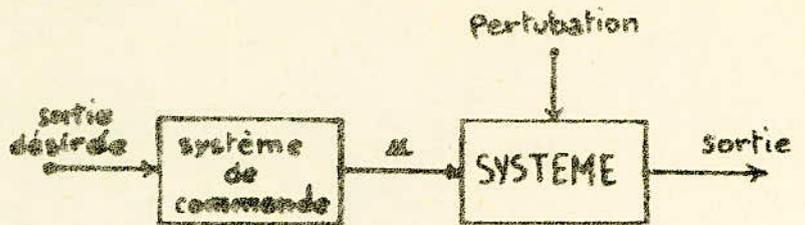


fig: I.2 système de commande en boucle ouverte.

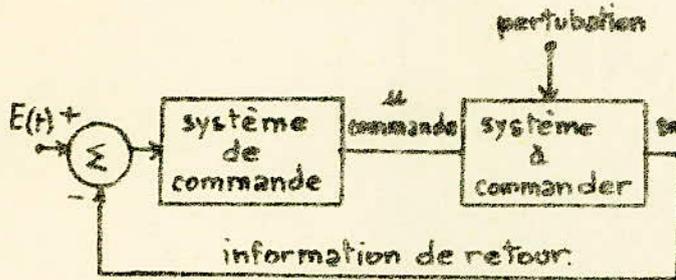


fig: I.3 système bouclé

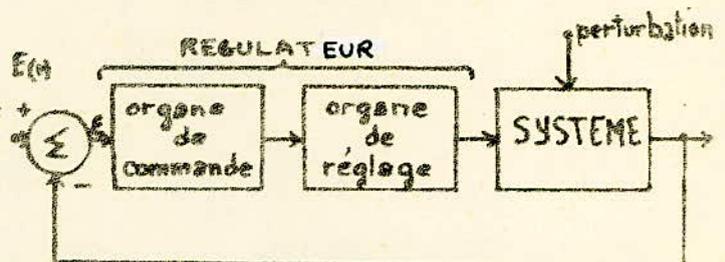


fig: I.4 schéma d'ensemble d'une chaîne de régulation.

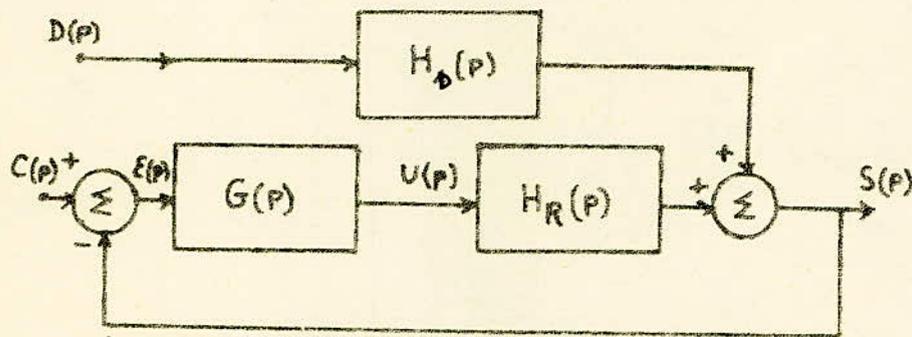


fig: I.5 schéma fonctionnel d'une chaîne de régulation.

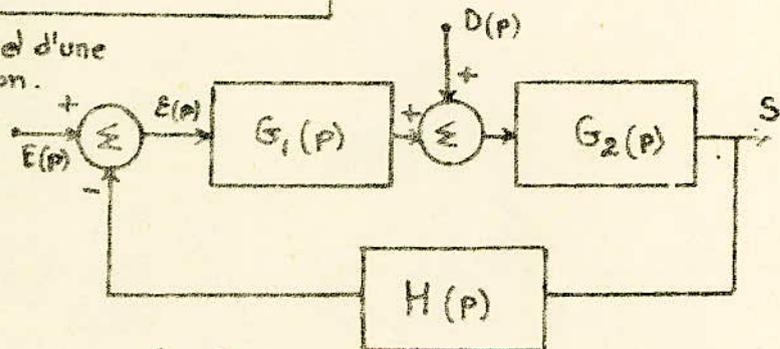


fig: I.6

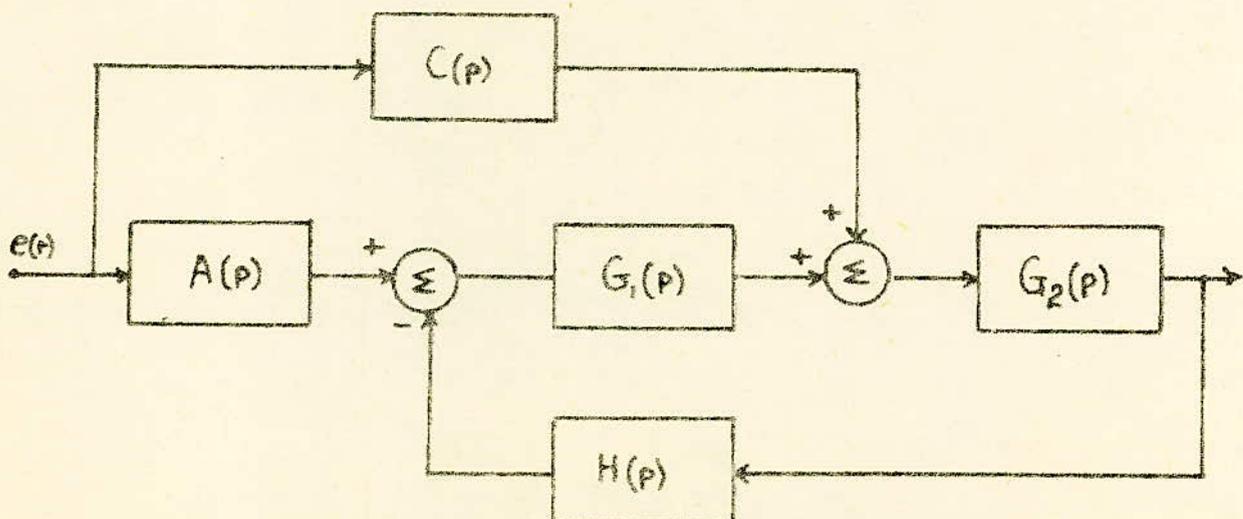
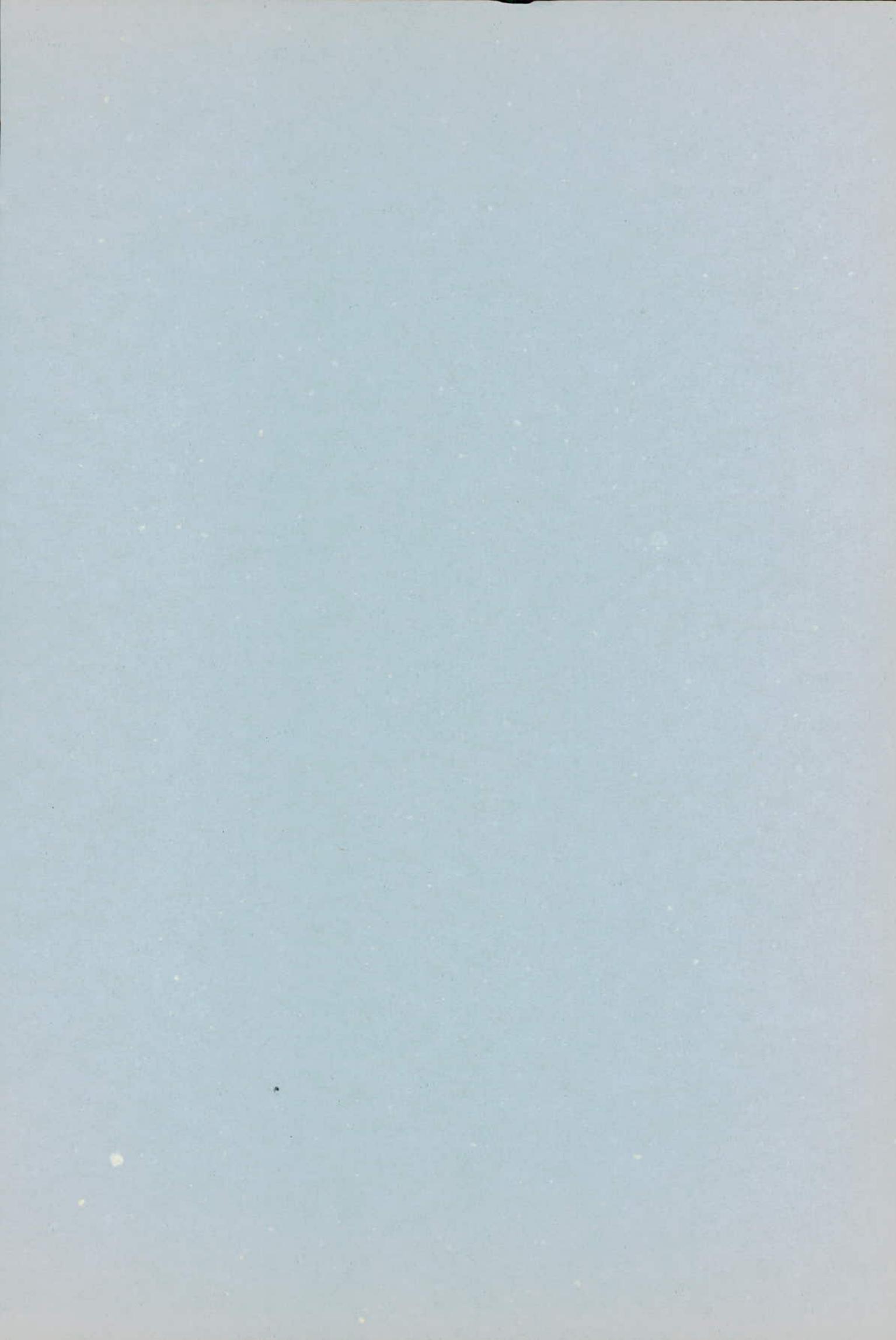


fig: I.7 correcteur branché dans une chaîne secondaire dite d'anticipation.



II.1. DESCRIPTION DE LA CENTRALE ELECTRONUCLEAIRE DE PUISSANCE "CANDU 600 MWe" :II.1. a : INTRODUCTION :

Les figures II.1.1 et II.1.2. qui donnent le schéma d'ensemble d'une centrale "CANDU 600 MWe" montrent que cette dernière est constituée essentiellement :

- d'un réacteur,
- d'un circuit primaire de caloportage,
- d'un pressuriseur,
- de quatre générateurs de vapeur,
- d'un turbo-alternateur.

Nous nous proposons de décrire dans la suite de façon très succincte l'ensemble des composants constituant les circuits précédemment inventoriés.

Pour rendre l'exposé plus aisé, nous commencerons par présenter la fission nucléaire, réaction qui est à la base du fonctionnement des réacteurs nucléaires.

II.1.b : LE REACTEUR :II.1.b.1 : PRINCIPE DE LA REACTION EN CHAINE :

Nous rappelons qu'une fission nucléaire est le résultat de l'interaction d'un neutron avec un noyau lourd fissile du type Uranium 235, Plutonium 239, Uranium 233.

Nous noterons au passage que seul l'Uranium 235 se trouve dans la nature en quantité relativement très faible puisque l'Uranium naturel est constitué de 99,3 % d'U<sub>238</sub> non fissile et de 0,7 % d'U<sub>235</sub>.

Le Pu<sub>239</sub> provient de l'U<sub>238</sub> après capture neutronique.

L'U<sub>233</sub> est issu du Thorium après capture neutronique.

L'U<sub>238</sub> et le Thorium qui après capture neutronique donnent naissance à des éléments fissiles sont appelés éléments fertiles.

La plupart des réacteurs en fonctionnement dans le monde utilisent l'U<sub>235</sub> comme élément fissile.

.../...

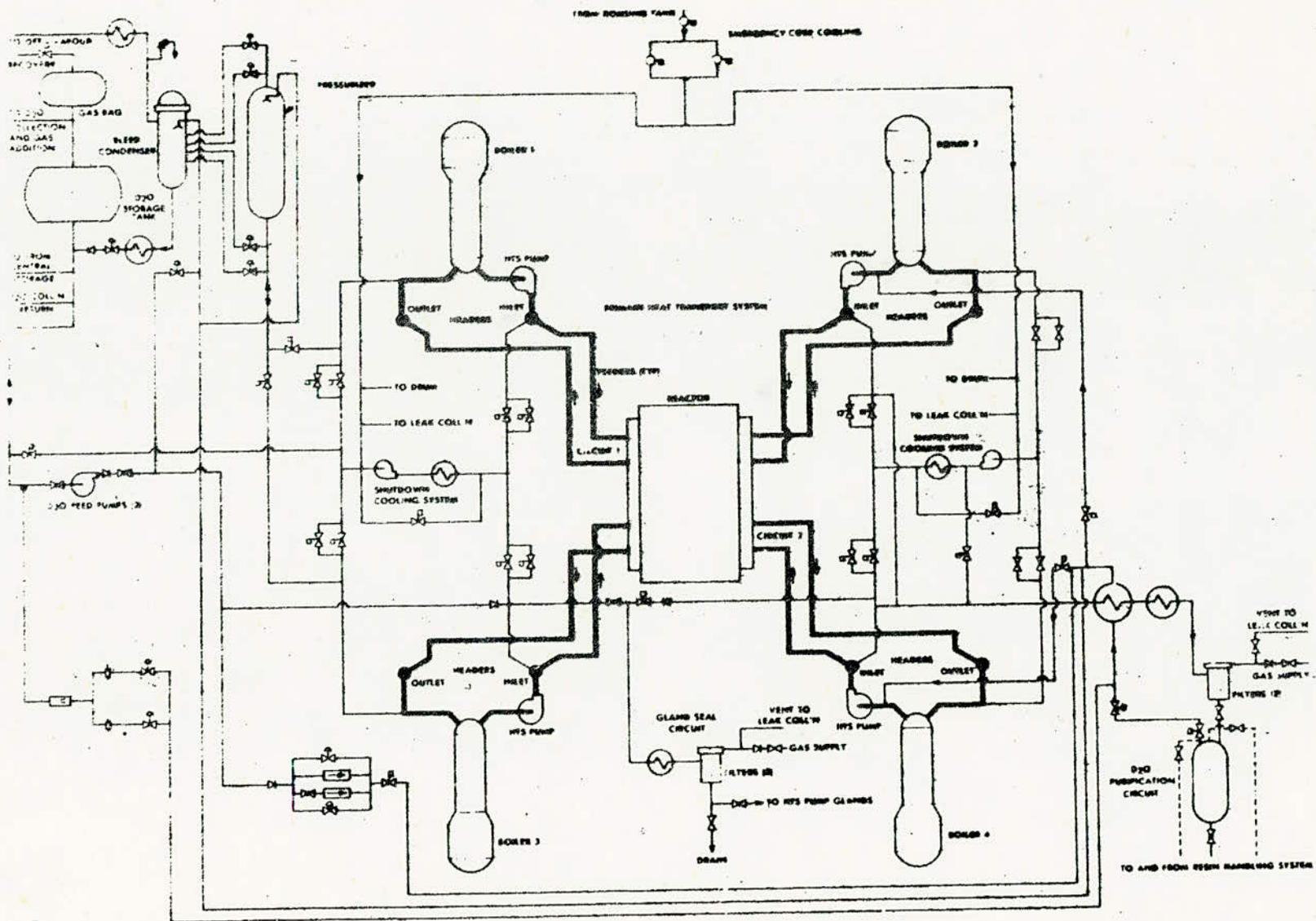


FIGURE II .1.1 PRIMARY HEAT TRANSPORT SYSTEM

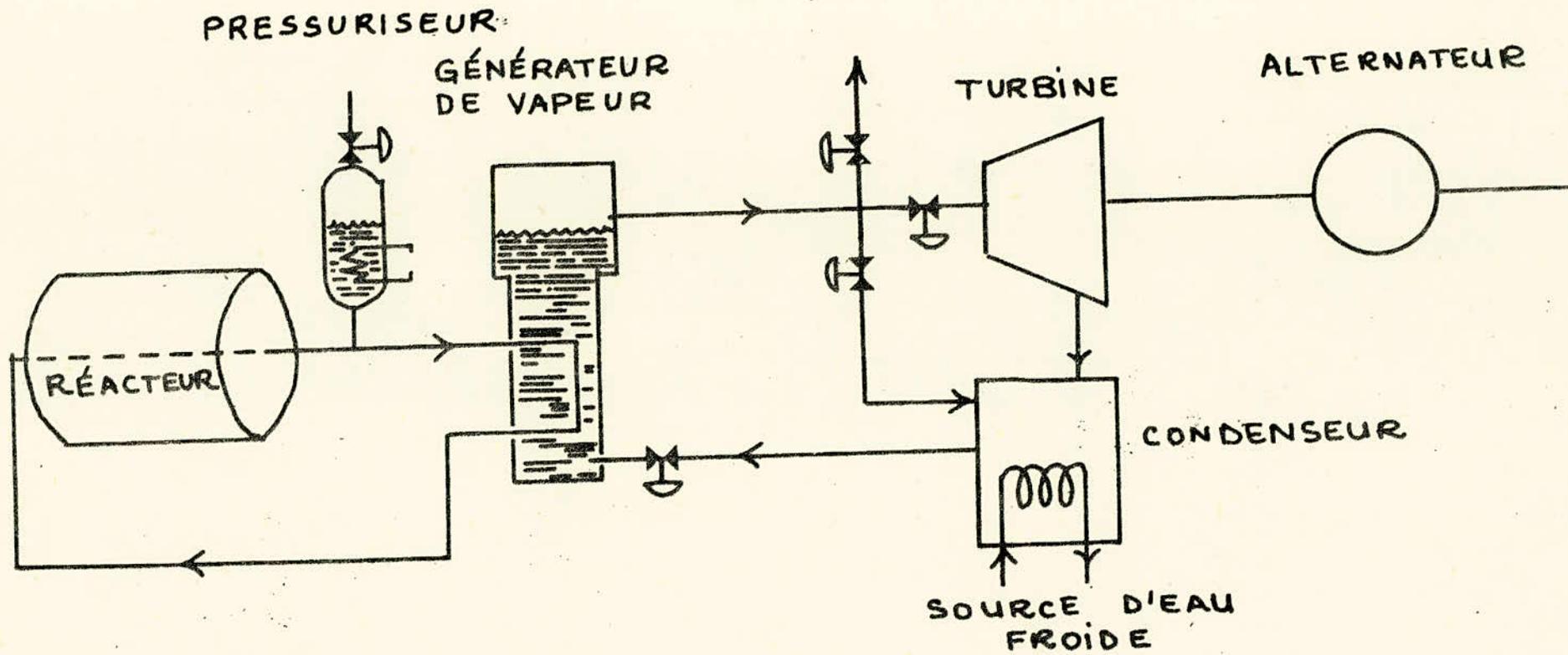


fig II.1.2

PRINCIPAUX ÉQUIPEMENTS IMPLIQUÉS DANS LE FONCTIONNEMENT  
D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE

L'expérience montre que la fission s'accompagne toujours de la libération :

- de deux à trois neutrons,
- d'une énergie de l'ordre de 200 Mev : Pour fixer les idées, Il suffit de noter que la fission d'un gramme d'Uranium 235 produit la même énergie que la combustion de deux tonnes de pétrole ou de 2,5 tonnes de charbon.

- de deux fragments de fission.

Les neutrons issus de la fission peuvent être utilisés pour produire d'autres fissions ce qui permet d'entretenir une réaction en chaîne. D'une façon générale, les neutrons issus d'une fission ne produisent nécessairement pas une fission, en effet :

Certains peuvent fuir du réacteur. Pour réduire cette fuite on entoure le coeur du réacteur d'un matériau dit réflecteur.

D'autres, peuvent être capturés par les éléments constituant le coeur du réacteur. Ces captures sont dites stériles.

D'autres, enfin, peuvent par capture par l'Uranium 238 conduire à la formation du "PLUTONIUM 239" fissile. Ces captures sont dites fertiles.

La réaction en chaîne peut être caractérisée par une grandeur "K" appelée "FACTEUR DE MULTIPLICATION" et définie comme le rapport de la population de neutrons de deux générations successives :

$$K = \frac{\text{Nombre de neutrons d'une génération (1)}}{\text{Nombre de neutrons d'une génération (I-1)}}$$

Dans la pratique on utilise pour caractériser la réaction en chaîne un paramètre " $\rho$ " appelé réactivité et définie par la relation :

$$\rho = \frac{K - 1}{K}$$

La réactivité s'exprime en p.c.m. (pour cent mille ou  $10^{-5}$ ).

D'après la définition des paramètres K et  $\rho$ , il apparaît qu'il peut exister trois (3) régimes de fonctionnement du réacteur :

- un régime sous critique  $K < 1$  ;  $\rho < 0$
- un régime critique  $K = 1$  ;  $\rho = 0$
- Un régime sur-critique  $K > 1$  ;  $\rho > 0$

.../...

Dans l'exploitation du réacteur mis à part les phases de démarrage et d'arrêt, on désire fonctionner en régime critique.

Il conviendra par conséquent de prévoir un système de contrôle permettant au réacteur de fonctionner à puissance constante malgré les perturbations auxquelles il peut être soumis.

Les fragments de fission sont généralement instables et tendent de se stabiliser en émettant des rayonnements nocifs

Il conviendra donc de prévoir autour du réacteur des protections biologiques pour protéger le personnel appelé à travailler autour du réacteur.

Certains produits de fission tel que le "Xenon" et le "Samarium" sont neutrophages, ils tendent de ce fait à perturber la réaction en chaîne.

D'autres produits de fission peuvent émettre des neutrons dits neutrons retardés.

#### II.1.b.2 : FONCTIONNEMENT DU REACTEUR : (fig II.1.3.)

Le réacteur élément essentiel de la centrale est chargé de **générer** par suite de fissions nucléaires une énergie destinée à être transformée en énergie électrique.

L'expérience montre que la probabilité pour que l'interaction neutron-noyau fissile conduise à une fission augmente lorsque l'énergie des neutrons diminue, c'est la raison pour laquelle on est souvent conduit à ralentir le neutron en utilisant un milieu ralentisseur appelé "Modérateur". Les trois modérateurs généralement utilisés sont :

- L'eau légère  $H_2O$
- L'eau lourde  $D_2O$
- Le Graphite

L'énergie libérée par la fission doit être évacuée pour être éventuellement utilisée. On utilise pour ce faire un fluide dit "réfrigérant" ou "caloporteur".

Les trois caloporteurs généralement utilisés sont :

- L'eau légère :  $H_2O$
- L'eau lourde :  $D_2O$
- Le gaz carbonique :  $CO_2$

.../...

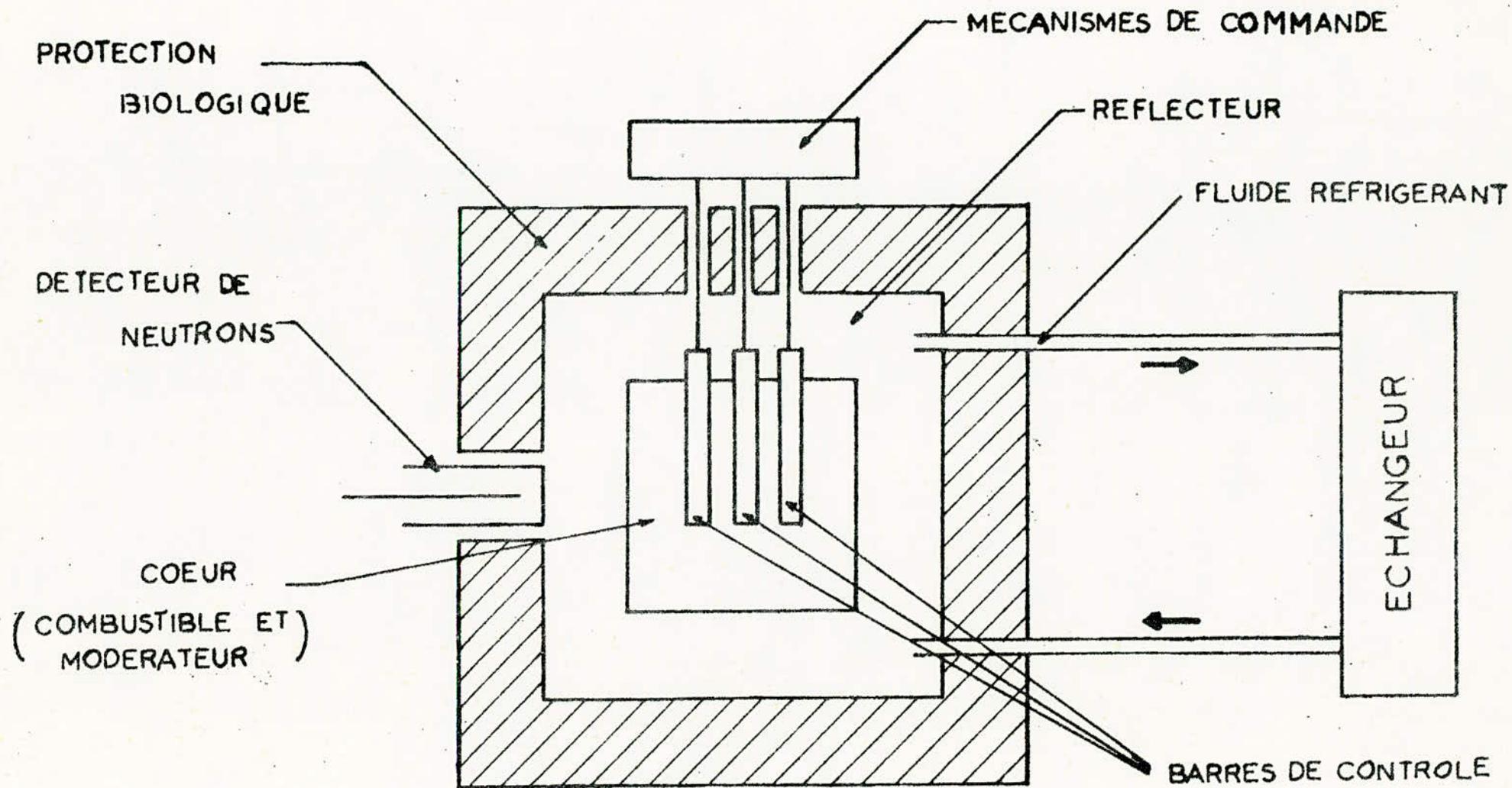


fig II.13 SCHEMA DE PRINCIPE D UN REACTEUR NUCLEAIRE

II.1.c : LE CIRCUIT PRIMAIRE :

La figure II.1.1, qui donne le schéma d'ensemble du circuit primaire d'une centrale électonucléaire de puissance type "CANDU 600 MWe" montre que celui-ci est composé de deux boucles identiques équipées chacune de deux générateurs de vapeur et de deux pompes. On remarque que les deux boucles possèdent, en commun, un pressuriseur unique. On notera de même que dans chacune des deux boucles le fluide caloporteur décrit un circuit fermé ayant la forme caractéristique d'un huit (8). En effet, le fluide est d'abord pompé vers de gros collecteurs d'entrée à travers des tuyaux de décharge de faible diamètre.

Du collecteur d'entrée, l'eau lourde est ensuite répartie, à travers des tuyaux de faible diamètre appelés "tuyaux d'alimentation", dans les canaux contenant le combustible.

Après avoir traversé le coeur du réseau, le réfrigérant est envoyé à travers des tuyaux de faible diamètre dits "tuyaux de sortie" vers les collecteurs de sortie. Des collecteurs de sortie, le caloporteur est acheminé grâce à un autre jeu de pompes vers un deuxième collecteur d'entrée via un échangeur de chaleur. Le cycle précédent se reproduit pour refermer le 8. On notera que le fluide réfrigérant circule dans deux sens opposés dans deux canaux adjacents.

Cette distribution permet d'obtenir une réactivité aussi constante que possible le long du canal et par voie de conséquence une redistribution de flux favorable. L'existence de deux boucles, au lieu d'une, permet de minimiser les conséquences qui pourraient résulter des défaillances qui peuvent affecter l'une d'elles.

II.1.D : LE PRESSURISEUR :

On montre que le rendement de la centrale est d'autant plus élevé que la température du fluide primaire est élevée. Le point d'ébullition de l'eau étant de 100°C à pression atmosphérique, on est conduit à pressuriser le circuit primaire si l'on désire augmenter la température du fluide tout en le maintenant en phase liquide.

Le pressuriseur est prévu pour maintenir la pression constante au niveau des collecteurs de sortie. Il utilise pour ce faire :

- Cinq (5) cannes chauffantes pour augmenter la pression,
- Des vannes de décharge chargées de diminuer la pression.

.../...

Il est aussi chargé de réguler l'inventaire du réfrigérant contenu dans les boucles primaires. Il utilise pour ce faire des vannes d'alimentation et de soutirage chargées de maintenir le niveau de la phase liquide contenue dans le pressuriseur aussi proche que possible d'un niveau de référence fonction de la puissance du réacteur.

#### II.1.e : Les GENERATEURS DE VAPEUR :

##### II.1.e1 : INTRODUCTION :

Les générateurs de vapeur constituent l'interface entre le circuit primaire et le circuit secondaire. Ils sont chargés de transformer l'énergie thermique véhiculée par le fluide primaire en énergie mécanique destiné à actionner un turbo-alternateur générateur de courant.

##### II.1.e 2 : DESCRIPTION DES EQUIPEMENTS D'UN GENERATEUR DE VAPEUR :

A l'intérieur d'un générateur de vapeur on distingue les parties suivantes (fig: II.1.4.) :

- Le faisceau de tubes (3550),
- La colonne montante ou bouilleur,
- Le ballon de vapeur où l'on trouve les équipements pour séparer l'eau de la vapeur,
- L'anneau de recirculation,
- Les raccords pour les conduites d'eau et vapeur du secondaire et les conduites d'entrées/sorties au primaire pour l'eau lourde.

##### II.1.e 3 : DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT :

Afin de faciliter la compréhension des problèmes de régulation, il est bon de décrire sommairement le fonctionnement des générateurs de vapeurs (fig. : II.1.5.) :

Au primaire, l'eau lourde ( $D_2O$ ) contenue dans les tubes est bouillante à l'entrée et se condense graduellement pour ressortir sous refroidit.

.../...

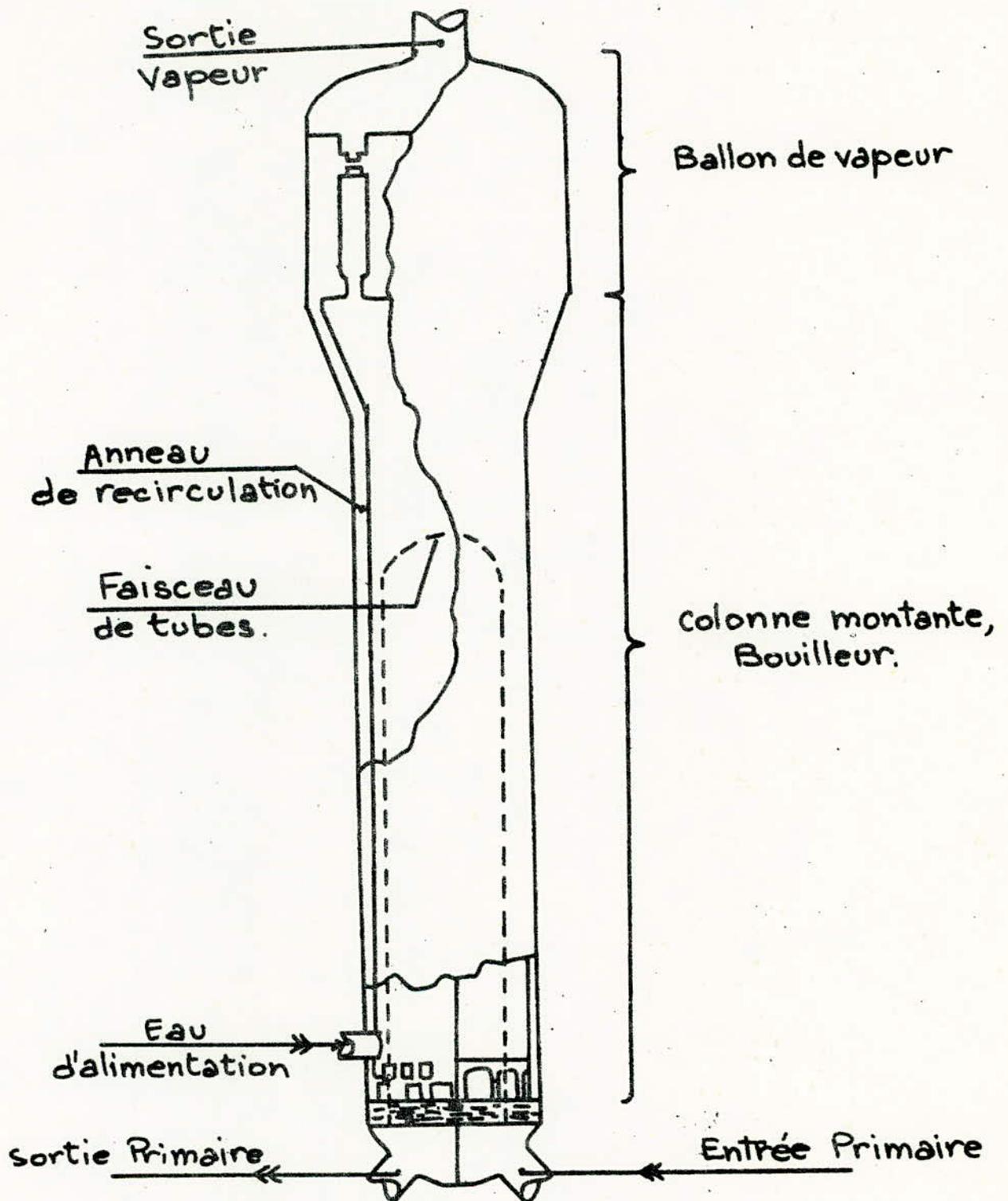


fig II.1.4 Arrangement interieur du  
 Generateur de Vapeur.

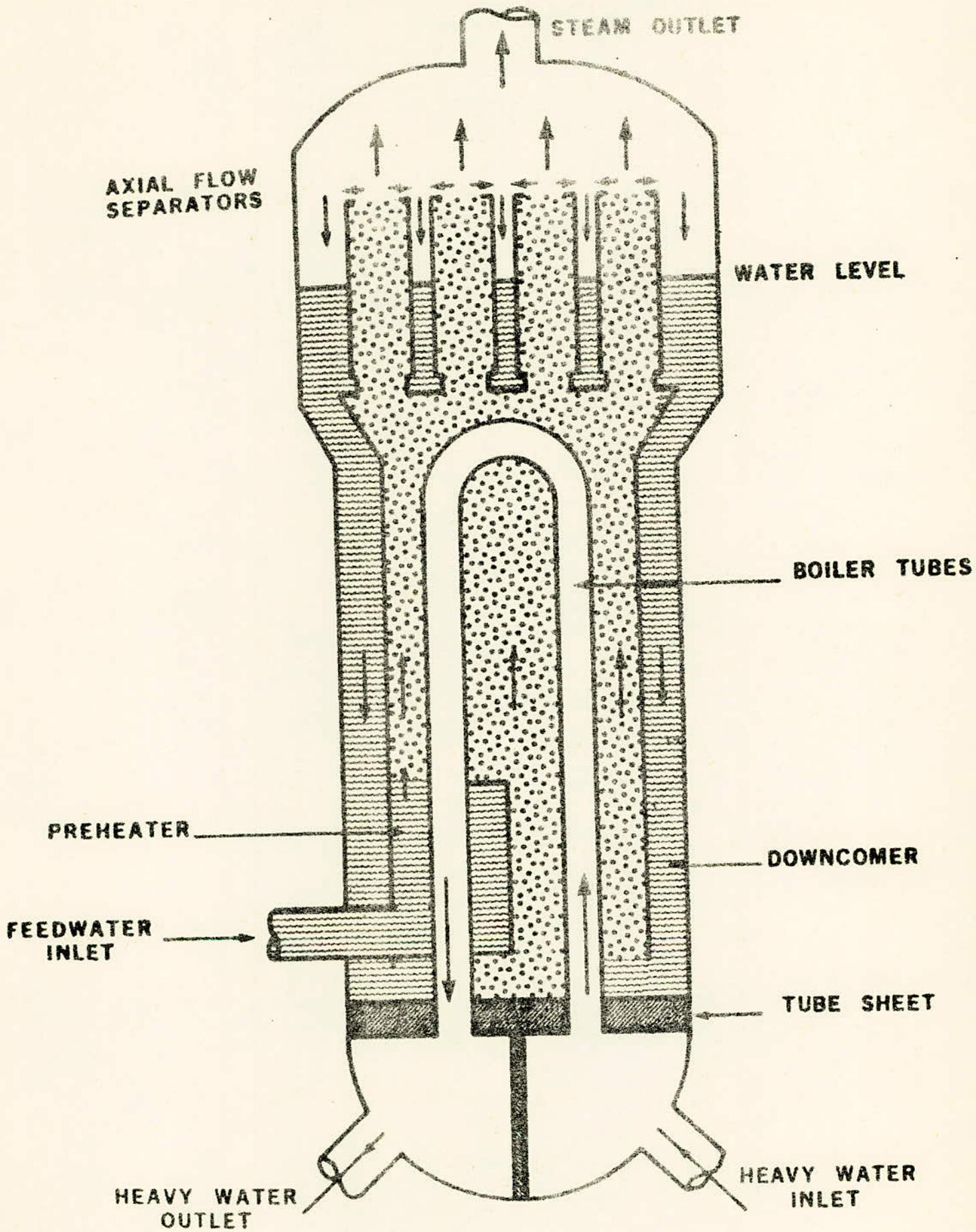


Fig II.15

PRINCIPE DE CIRCULATION DANS LE GENERATEUR DE VAPEUR.

Au secondaire, l'eau d'alimentation ( $H_2O$ ) sous-refroidit est amenée à température de saturation dans le préchauffeur. Par suite elle boue dans la colonne montante. Les bulles s'élèvent et entraînent un mélange eau vapeur qui est finalement séchée avant de repartir vers la turbine.

La figure : II.1.6. donne le tracé de la distribution de température du primaire et du secondaire le long des tubes du générateur de vapeur. Ces distributions sont calculées avec des modèles mathématiques.

On remarquera que :

- 1 - L'eau lourde et l'eau alimentaire s'écoulent en sens inverse afin d'obtenir une température appréciable sur toute la longueur du tube.
- 2 - Pour des températures d'entrée/sortie identiques pour le  $D_2O$  et  $H_2O$ , l'ébullition au primaire augmente le transfert de la chaleur.
- 3 - L'eau d'alimentation est rapidement réchauffée par le primaire le moins chaud .
- 4 - La plus grande partie de l'eau ainsi que la vapeur sont à température de saturation ( $260^{\circ}C$ ) à laquelle correspond une pression de saturation. Ainsi quelque soit le débit de vapeur, la pression et la température sont fixées et constantes.

Notons enfin, que la vapeur produite est collectée au niveau d'un collecteur vapeur. Elle peut être admise :

- à la turbine dont la capacité est de 100% du débit vapeur nominal,
- à l'usine d'eau lourde (30 % du débit nominal).
- aux vannes de délestage à l'atmosphère (10 % du débit nominal),
- aux vannes de délestage au condenseur (77 % du débit nominal)
- aux soupapes de sécurité (120 % du débit nominal).

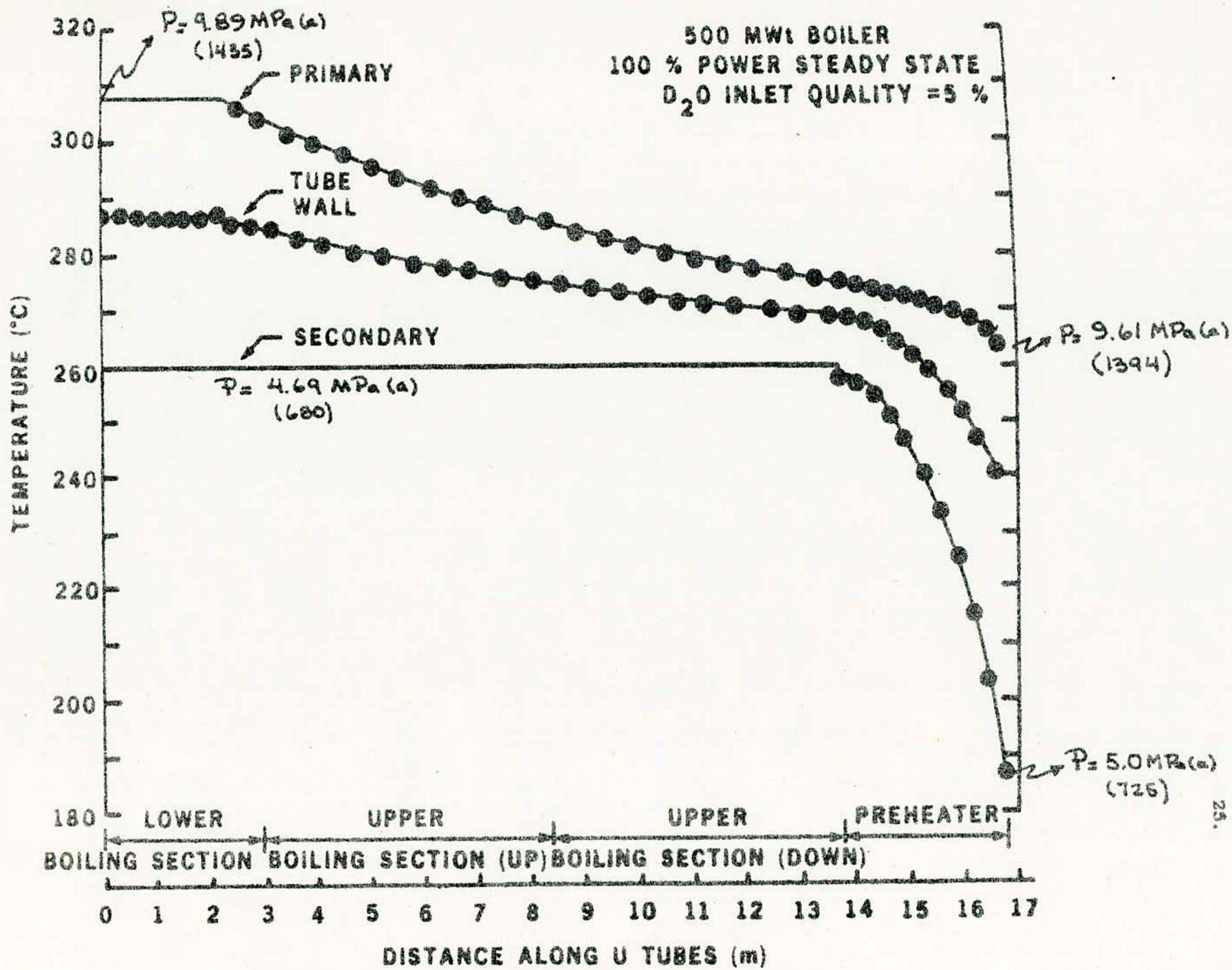


fig II.1.6

: FLUID TEMPERATURE DISTRIBUTION

II.2 : CONTROLE DU CAN DU 600 MW<sub>e</sub> :II.2.1 : INTRODUCTION :

La figure : II.2.1. montre que le contrôle de l'installation est assuré de la façon suivante :

L'instrumentation permet de calculer à tout moment la puissance du réacteur. Cette puissance est comparée à une puissance de consigne dont la valeur peut être fixée soit par l'opérateur en salle de contrôle, soit par un programme baisse de puissance, soit par le programme contrôleur de pression qui sera décrit par la suite.

Le signal d'erreur entre les deux signaux précédemment définis est appliqué aux mécanismes de réactivité qui sont chargés de manoeuvrer le réacteur dans le sens qui permet à ce dernier de fournir la puissance qui lui est demandée.

La figure précédente montre, qu'en plus du contrôle de réactivité, il est prévu quatre contrôles :

- Un contrôle de pression primaire,
- Un contrôle inventaire du fluide primaire,
- Un contrôle de niveau dans les générateurs de vapeur,
- Un contrôle de pression au niveau des collecteurs de vapeur.

a) CONTROLE DE PRESSION PRIMAIRE :

Le contrôle de pression primaire est assuré par un pressuriseur qui peut être assimilé à un récipient cylindrique relié au primaire par une conduite d'expansion.

Le pressuriseur contient deux phases : l'une liquide, l'autre vapeur.

Le contrôle de la pression est assuré au moyen de cannes chauffantes plongées dans la phase liquide et de vannes de décharge de la vapeur.

Le contrôle de pression au primaire est prévu pour maintenir la pression au primaire constante quelque soit le régime de fonctionnement.

.../...

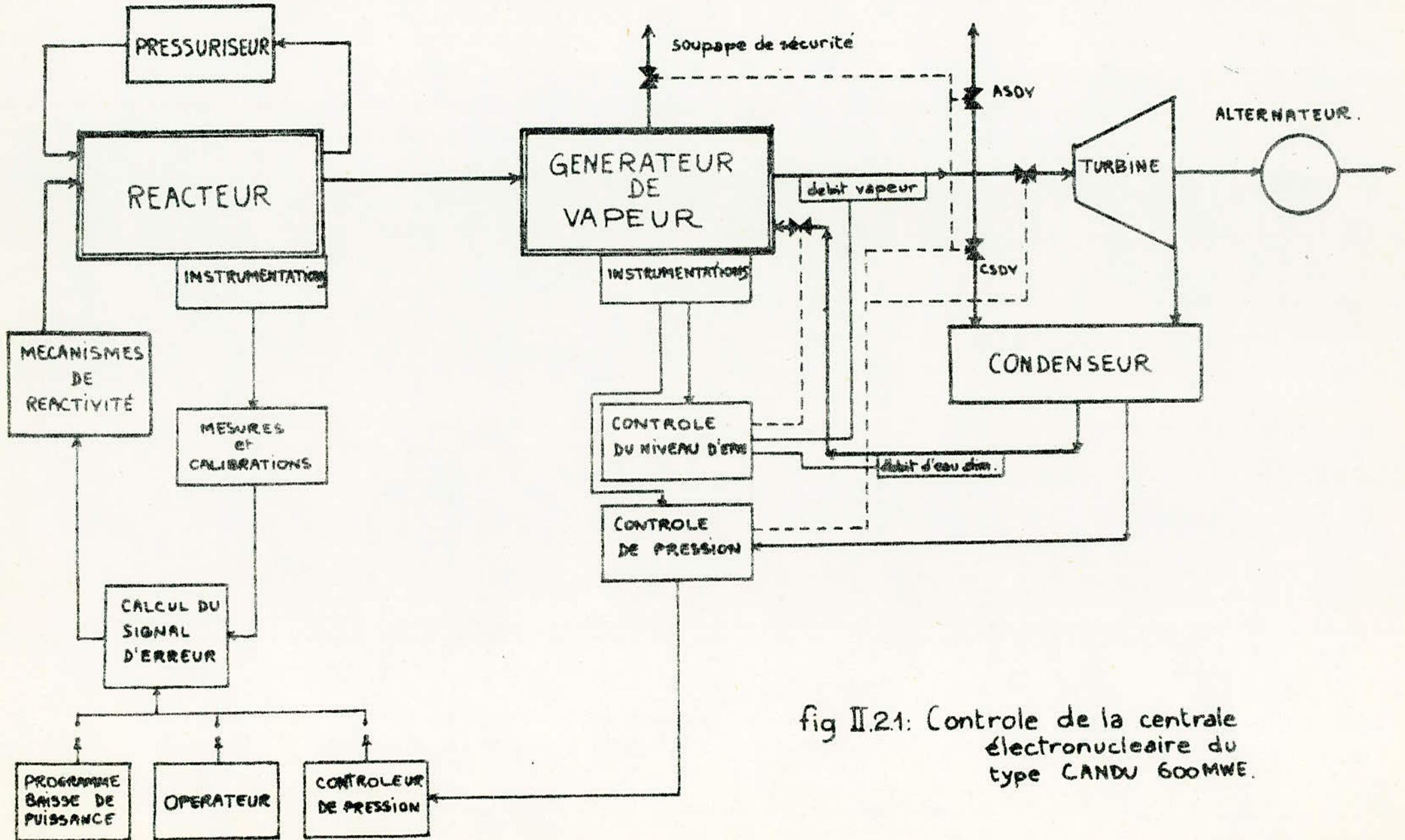


fig II.21: Contrôle de la centrale  
électronucléaire du  
type CANDU 600MWE.

Le contrôle de pression assure que le fluide primaire reste en phase liquide pour des températures supérieures à 100 °C, ce qui permet d'améliorer le rendement de la centrale.

Le choix de la pression de consigne résulte d'un compromis entre des contraintes technologiques et un rendement notable.

b) CONTROLE D'INVENTAIRE :

Le contrôle d'inventaire est prévu pour maintenir la masse de fluide réfrigérant constante dans le primaire.

La raison d'être de ce contrôle est due au fait que lors des manoeuvres de puissance, le fluide primaire peut être soit injecté, soit retiré du pressuriseur, selon que la puissance monte ou baisse respectivement.

Comme le pressuriseur est incapable d'absorber toutes les variations, le constructeur a été conduit à prévoir un système d'appoint ou de retrait de fluide caloporteur au niveau du circuit primaire.

Le circuit de contrôle d'inventaire est conçu pour maintenir le niveau d'eau dans le pressuriseur à une valeur aussi proche que possible d'un niveau de référence fonction de la puissance du réacteur.

c) CONTROLE DE NIVEAU DANS LE GENERATEUR DE VAPEUR :

Le contrôle de niveau est prévu pour maintenir le niveau d'eau dans les générateurs de vapeur à une valeur de consigne fonction de la puissance délivrée par le réacteur.

Ce circuit sera étudié en détail dans la suite.

d) CONTROLE DE PRESSION :

Le contrôle de pression est prévu, entre autre, pour maintenir la pression au niveau des générateurs de vapeurs à une valeur aussi proche que possible d'une consigne et ce, quelque soit le régime de fonctionnement.

Ce circuit sera également étudié en détail dans la suite.

.../...

## II.2.2 ETUDE DES SYSTEMES DE REGULATION :

### II.2.2.1. INTRODUCTION :

Comme il a été signalé plus haut, nous nous sommes restreints, dans notre travail, à l'étude et la réalisation des circuits permettant d'assurer :

- Le contrôle de la réactivité,
- Le contrôle du niveau dans les générateurs de vapeur,
- Le contrôle de pression au niveau des générateurs de vapeur.

La présentation du travail concernant ces régulateurs sera faite de la façon suivante :

La première partie relative à l'étude du contrôle de la réactivité nous permettra de préciser les principes mis en oeuvre pour assurer un contrôle aussi important que celui de la réactivité.

Dans la deuxième partie, nous commencerons par préciser pourquoi il convient de réguler le niveau dans le générateur avant de passer à l'étude détaillée des différents circuits constituant le régulateur.

La troisième partie réservée à l'étude du régulateur de pression sera menée de façon identique à celle précédemment décrite.

II - 2.2.2. CONTROLE DE REACTIVITE :II - 2.2.2.1-INTRODUCTION :

Nous montrerons dans la suite que l'évolution nucléaire d'un réacteur est liée à la variation de réactivité .

Les mécanismes de contrôle de réactivité ont pour but de modifier la puissance du réacteur afin que celle-ci soit la plus proche possible de la puissance demandée par le réseau.

La figure II : 2.2.2. a, montre que le signal erreur de puissance  $E_p$  chargé de commander les mécanismes de contrôle est composé de deux termes:

- un terme de contre réaction différence entre la puissance de consigne et la puissance instantanée du réacteur,
- un terme d'anticipation différence entre le taux de variation de la puissance du réacteur et le taux de variation demandé par l'opérateur.

Cette figure montre que :

$$E_p(t) = (W_n(t) - W_s(t)) + K_R \left( \frac{dW_n(t)}{dt} \frac{1}{W_n(t)} - R_s \right) \quad (1)$$

expression dans laquelle :

$E_p(t)$  : erreur de puissance,

$W_n(t)$  : puissance neutronique mesurée,

$W_s(t)$  : puissance normalisée de consigne,

$\frac{dW_n(t)}{dt}$  : Taux de changement de la densité neutronique,

$K_R$  : constante = 0,5

$R_s$  : le taux de manoeuvre de la puissance du réacteur.

Le contrôle du réacteur doit être très sensible, il est nécessaire d'introduire un terme d'anticipation qui dépend de  $\frac{dW_n(t)}{dt}$  sans quoi le programme de régulation serait trop lent à réagir.

II - 2.2.2.2. LE REACTEUR :

L'évolution de la puissance nucléaire d'un réacteur est régie par un système de sept équations à sept inconnues appelées équations de la cinétique qui tiennent compte de la puissance nucléaire, de la concentration de précurseurs de neutrons retardés, ainsi que de la réactivité.

.../...

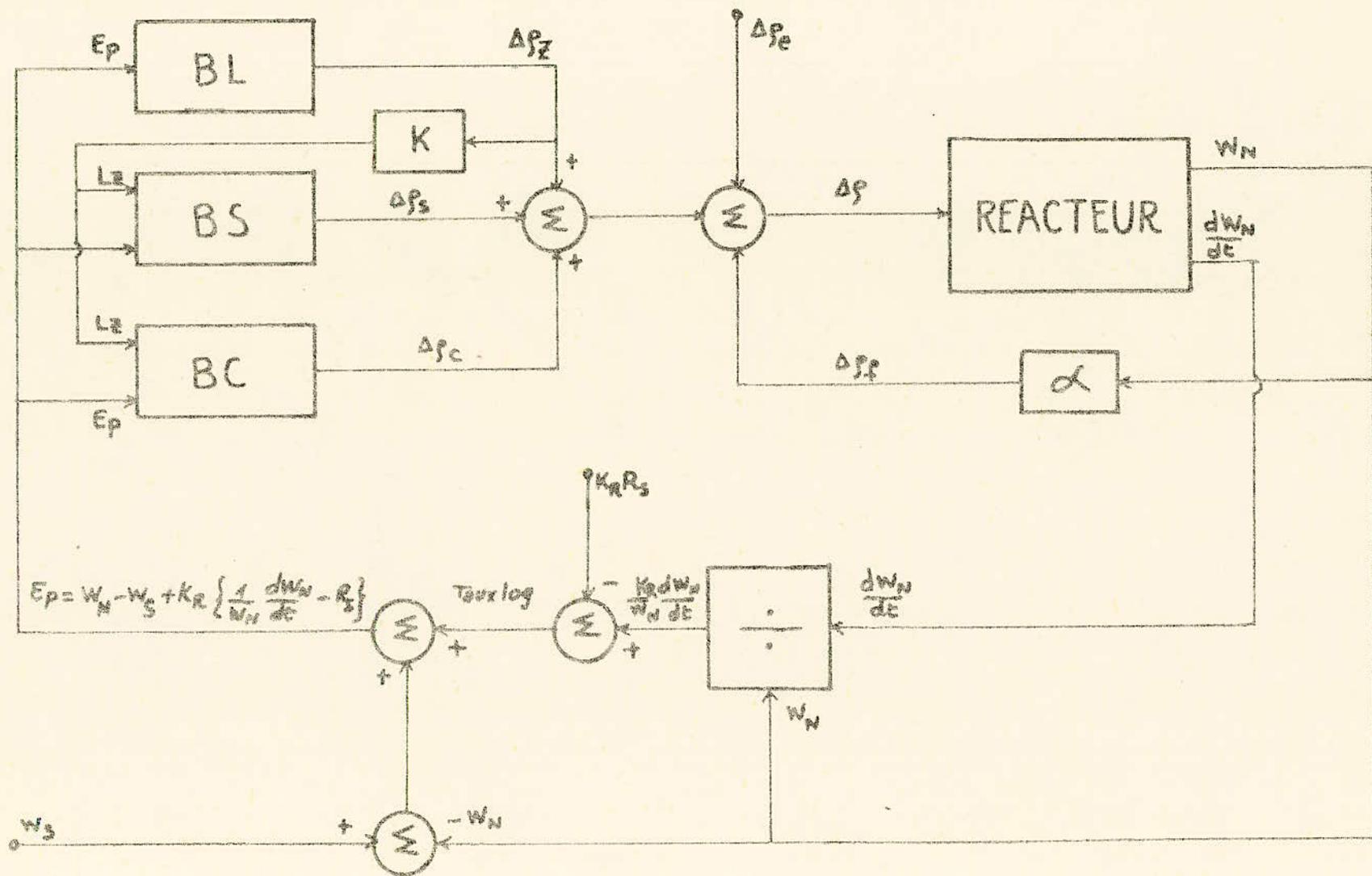


Fig II.2.2.2.a: Schéma fonctionnel du contrôle de la réactivité.

Le modèle étudié dans le cas de notre travail étant destiné à fournir une information sur la puissance en utilisant un modèle simplifié, nous avons réduit le système précédent aux deux équations suivantes :

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\Delta \rho(t) \cdot n(t)}{l} - \frac{Bn(t) + \lambda c(t)}{l} \quad (2)$$

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{B}{l} n(t) - \lambda c(t) \quad (3)$$

avec :

$$\Delta \rho(t) = \Delta \rho_e(t) + \Delta \rho_f(t) + \Delta \rho_r(t) \quad (4)$$

$$\Delta \rho_f(t) = -\alpha (n(t) - 1) \quad (5)$$

expressions dans lesquelles :

$n(t)$  : densité neutronique,

$c(t)$  : densité des précurseurs,

$\Delta \rho(t)$  : réactivité,

$\Delta \rho_e(t)$  : réactivité de perturbation,

$\Delta \rho_f(t)$  : réactivité de rétroaction due au combustible,

$\Delta \rho_r(t)$  : réactivité de régulation,

$l$  : temps de génération des neutrons

$B$  : fraction de neutrons retardés,

$\lambda$  : constante de désintégration des précurseurs.

Pour notre modèle, nous avons adopté les valeurs suivantes pour les constantes :

$$B = 0,00650$$

$$\lambda = 0,0766 \text{ sec}^{-1}$$

$$l = 8,510^{-4} \text{ sec}$$

Nous noterons au passage que le terme de rétroaction  $\Delta \rho_f(t)$  est proportionnel à l'écart entre la puissance instantanée et la puissance initial du réacteur. Comme cette dernière est normalisée à l'unité, la densité neutronique sera égale à "1" en régime permanent.

### II : 2.2.2.3 - MECANISMES DE REACTIVITE :

Les mécanismes de réactivité chargés d'assurer le contrôle du réacteur sont au nombre de "trois" . Il s'agit :

- des barres liquides (BL),
- des barres solides (BS),
- des barres de compensation (BC)

....

Le signal d'erreur de puissance  $E_p$  est utilisé pour commander une ouverture  $S^*$  des vannes qui alimentent les compartiments des barres liquides.

On admet que les paramètres  $E_p$  et  $S^*$  sont reliés par la relation suivante :

$$S^* = \frac{E_p - E_{pc}}{E_{po} - E_{pc}} \quad (6)$$

avec :

$$0 \leq S^* \leq 1 \quad (7)$$

expressions dans lesquelles :

-  $E_{po} = 2\%$  représente le signal d'erreur de puissance pour lequel les vannes alimentant les compartiments des BL sont totalement ouvertes.

-  $E_{pc} = -5\%$  correspond au signal d'erreur de puissance pour lequel les vannes qui alimentent les BL sont totalement fermées.

La relation précédente montre que compte tenu des valeurs numériques de  $E_{po}$  et  $E_{pc}$ , on pourra écrire :

$$S^* = 14,2857 E_p + 0,7143 \quad (8)$$

Cette relation montre qu'à chaque valeur du paramètre  $E_p$  correspond un signal de commande  $S^*$  appliqué aux vannes qui alimentent les compartiments des BL.

Naturellement, compte tenu des caractéristiques des vannes, celles-ci tendent à occuper une position  $S$  différente de  $S^*$ .

On montre par un calcul de dynamique élémentaire que les paramètres  $S$  et  $S^*$  sont reliés par la relation suivante :

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + 2 \xi W_0 \cdot \frac{ds}{dt} + W_0^2 s = W_0^2 S^* \quad (9)$$

expression dans laquelle :

- $\xi$  représente le coefficient d'amortissement de la vanne,
- $W_0$  la pulsation propre de la vanne.

Les vannes alimentant les compartiments des BL qui équipent les centrales électronucléaires de puissance de type CANDU 600 MWe possèdent les caractéristiques suivantes :

$$\xi = 0,8$$

$$W_0 = 10 \text{ rd/s}$$

.../...

En conclusion, il s'ensuit qu'à tout signal d'erreur de puissance  $E_p$  correspond d'une ouverture  $S$  des vannes, ouverture qui assure un débit d'entrée  $Q_e$  variant entre 0 l/s et 1 l/s.

Comme le débit de sortie  $Q_s$  est constant et égal à 0,5 l/s, on en déduit que le débit  $Q_e$  soustrait du débit  $Q_s$  donne un débit net entrant ou sortant de la barre.

Compte tenu du fait que les barres se présentent sous la forme de cylindres de 10 cm de diamètre et 2,5 m de haut et qu'une barre liquide peut passer de l'état vide à pleine en 50 s environ, il est possible d'associer à tout débit  $Q_e$  un niveau d'eau légère  $L_z$  contenue dans les barres liquides.

On montre que les expressions du niveau " $L_z$ " et de la réactivité " $\Delta \rho_z$ " des barres liquides sont données par les relations suivantes :

$$L_z(t) = 0,5 \left( 1 - \frac{\Delta \rho_z(t)}{0,00335} \right) \quad (10)$$

$$\frac{d \Delta \rho_z(t)}{dt} = - (2\beta^2(t) - 1) \rho_z \quad (11)$$

$$\Delta \rho_z(t) = \int \frac{d \Delta \rho_z}{dt} dt \quad (12)$$

où  $\rho_z$  représente le taux maximal de changement de réactivité.

Les douze relations précédemment définies, constituent le système complet d'équations qui constituent notre modèle de commande par les barres liquides (figure II.2.2.2 b).

Le couple de variables ( $E_p$ ,  $L_z$ ) est finalement utilisé pour commander les mouvements et la vitesse des barres solides et des barres de compensation.

La figure II.2.2.2.c qui résume la logique de commande des mécanismes de réactivité montre clairement les rôles respectifs des paramètres  $E_p$  et  $L_z$ .

Si l'on désire interpréter de tels graphes, il suffit de noter que le contrôle de la réactivité est conçu de façon qu'en fonctionnement normal, le niveau d'eau contenu dans les barres liquides se trouve dans la zone située entre 20 % et 70 % de la hauteur maximale des barres.

.../...

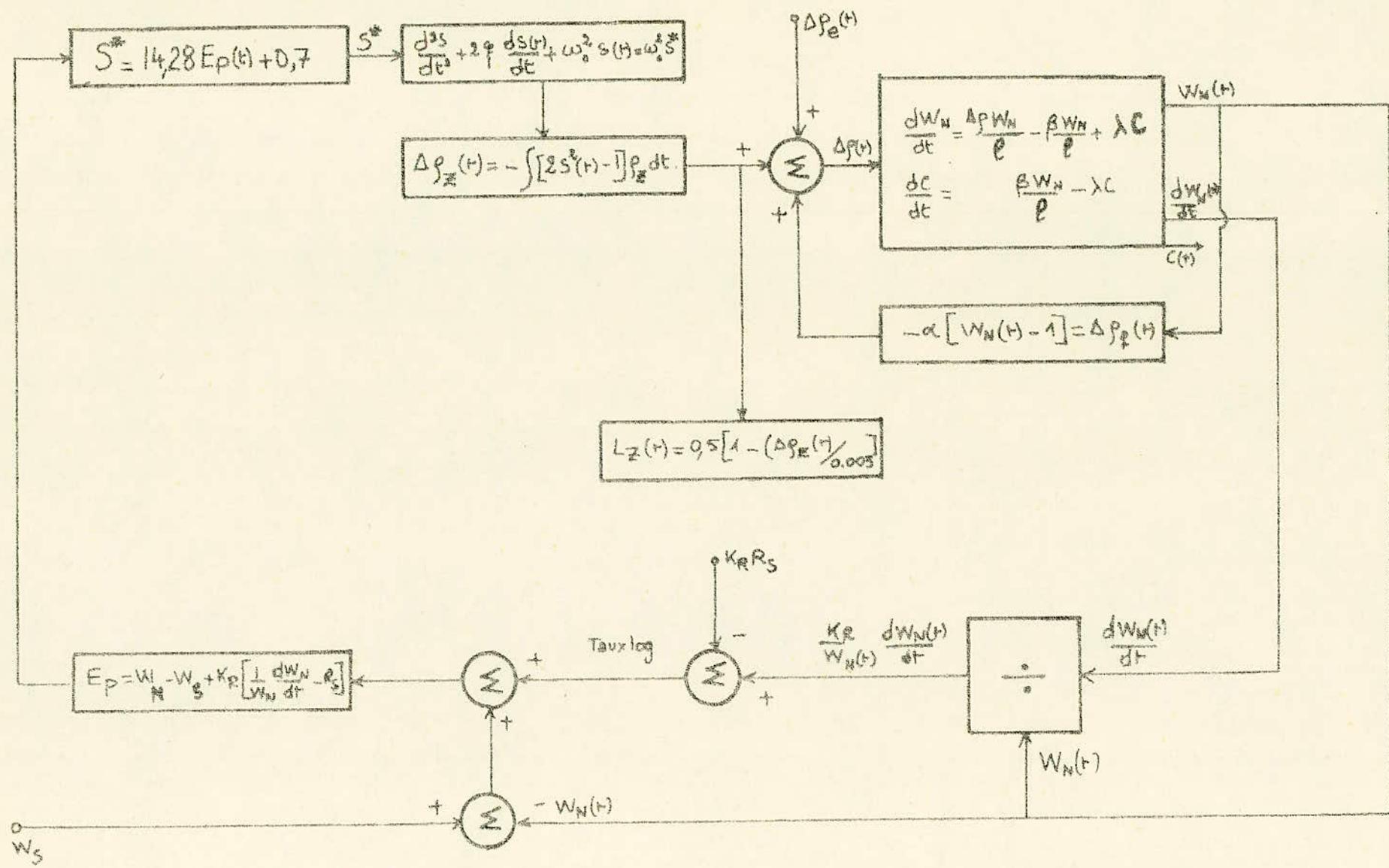


Fig II.2.2.2.b: Controle de réactivité par les barres liquides.

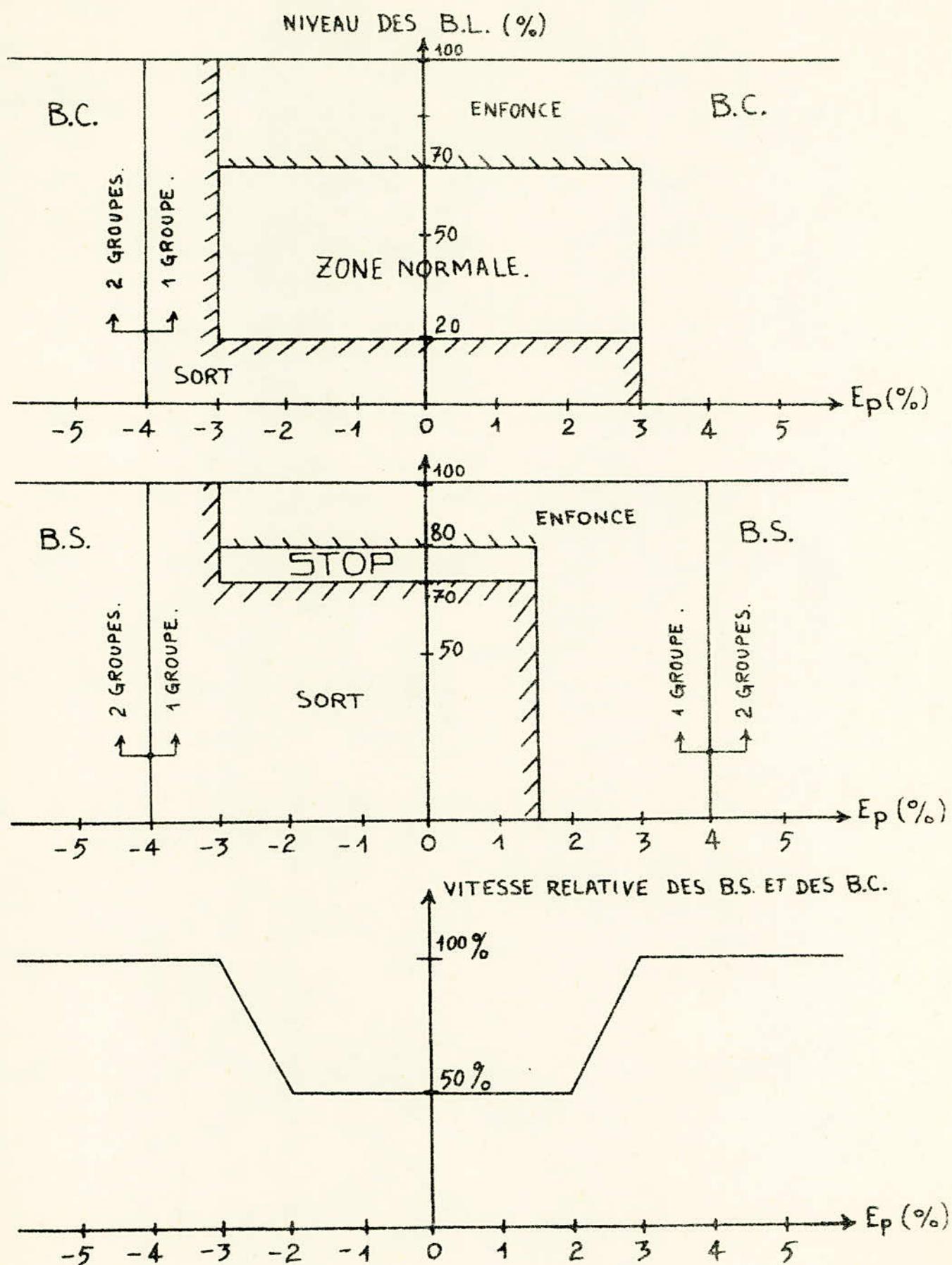


fig II.2.2.2.c : Logique de commande des B.S. et des B.C.

Si l'on tient compte du fait qu'en fonctionnement normal :

- les barres solides sont à l'extérieur du coeur du réacteur,
- les barres de compensation sont totalement insérées,

On déduit que si le niveau LZ venait à dépasser le seuil supérieur de 70 % de la hauteur maximale, ce qui revient à dire si le contrôle nécessite une augmentation de l'absorption neutronique pour réduire par exemple la puissance du réacteur, il conviendra d'introduire les barres solides pour prendre en charge l'augmentation de l'absorption neutronique demandée. L'insertion des barres solides entraîne automatiquement une baisse du niveau d'eau contenue dans les barres liquides ce qui permet de ramener celui-ci dans la gamme de fonctionnement normale comprise entre 20 % et 70 % de la hauteur maximale.

Il faudra cependant tenir compte du fait qu'étant donné que l'efficacité totale des quatorze barres liquides est de 600 p.c.m. et que celle du premier groupe des barres solides est aussi de 600 p.c.m., on déduit que l'insertion totale d'un groupe de barres solides peut entraîner une baisse du niveau des barres liquides en deça de la valeur de 20 % du niveau maximal.

C'est pour palier cet inconvénient que l'on doit stopper l'insertion des barres solides dès que le niveau des barres liquides se trouve dans la gamme située entre 80 % et 70 % du niveau maximal.

De même si le niveau des barres liquides venait à descendre au-dessous de 20 % de la hauteur maximale, ce qui signifie que l'on désire diminuer l'absorption neutronique dans le but d'augmenter la puissance du réacteur par exemple, il suffira de retirer quelques barres de compensation afin de prendre en charge la diminution du taux d'absorption neutronique demandé.

L'extraction des barres de compensation entraîne une augmentation du niveau dans les barres liquides ce qui permet de ramener celui-ci dans la gamme de fonctionnement normale comprise entre 20 % et 70 % de la hauteur maximale.

On notera au passage que contrairement aux barres solides, les barres de compensation une fois sollicitées ne peuvent pas être arrêtées avant leur fin de course.

Nous venons d'analyser l'effet du niveau des barres liquides sur le mouvement des barres solides et des barres de compensation.

Nous allons, à présent, étudier l'effet du module et du signe de l'erreur de puissance sur le mouvement des mécanismes précédents.

.../...

- Lorsque l'erreur de puissance est positive, ce qui signifie que la puissance développée par le réacteur est supérieur à la puissance de consigne, il conviendra d'introduire une réactivité négative. Ceci peut être réalisé en insérant soit les barres solides soit les barres de compensation pour peu que ces dernières aient été déjà extraites.

La vitesse et le nombre de groupes sollicités sont fonctions de l'erreur de puissance et du niveau des barres liquides  $L_z$ .

- De même si l'erreur de puissance est négative, ce qui signifie que la puissance développée par le réacteur est inférieure à la puissance de consigne, il conviendra d'introduire une réactivité positive. Ceci pourra être réalisé en retirant soit les barres de compensation, soit les barres solides pour peu que celles-ci aient été préalablement insérées.

II.2.2.3. REGULATION DE NIVEAU DANS LES GENERATEURS DE VAPEUR :II.2.2.3.1. : INTRODUCTION :

Le niveau d'eau dans les générateurs de vapeur est régulé pour deux raisons relevant de la sûreté et du fonctionnement.

- Un niveau trop bas risque d'entraîner un refroidissement insuffisant du circuit primaire qui peut engendrer des conséquences néfastes pour le fonctionnement du réacteur (figure II.2.2.3<sub>a</sub>).
- Un niveau trop haut risque d'entraîner de l'eau dans la turbine.

La régulation du niveau d'eau dans les générateurs de vapeur a pour but de maintenir le niveau d'eau à une valeur de consigne fonction de la puissance.

II.2.2.3.2. DESCRIPTION PHYSIQUE :II.2.2.3.2.1. REGULATION SIMPLE :

Si le générateur de vapeur réagissait comme un gros réservoir, ce qu'il fait, en fait, dans 99 % des cas, un régulateur proportionnel et intégral commandé par un signal d'erreur différence entre le niveau de consigne et le niveau mesuré pourrait être suffisant pour réguler le niveau d'eau dans le pressuriseur en agissant sur les vannes d'eau alimentaire.

Si l'on désire améliorer la réponse du régulateur aux transitoires, il suffirait d'introduire un signal d'anticipation dont le signe et l'amplitude dépendront de la différence entre les débits de vapeur  $Q_v$  et d'eau alimentaire  $Q_{ea}$ .

Le principe de fonctionnement de cette boucle est le suivant :

Dès qu'une variation dans le débit entrant ou sortant est détectée, le régulateur actionne la vanne sans attendre que le niveau varie.

Le schéma de principe de ce type de régulateur appelé régulateur à trois éléments est donné par la figure : II.2.2.3.b.

II.2.2.3.2.2. DEFAUTS DE LA REGULATION SIMPLE :

Une étude plus poussée montrerait que le régulateur précédent répondra de façon non satisfaisante lors des transitoires et à basse puissance.

.../...

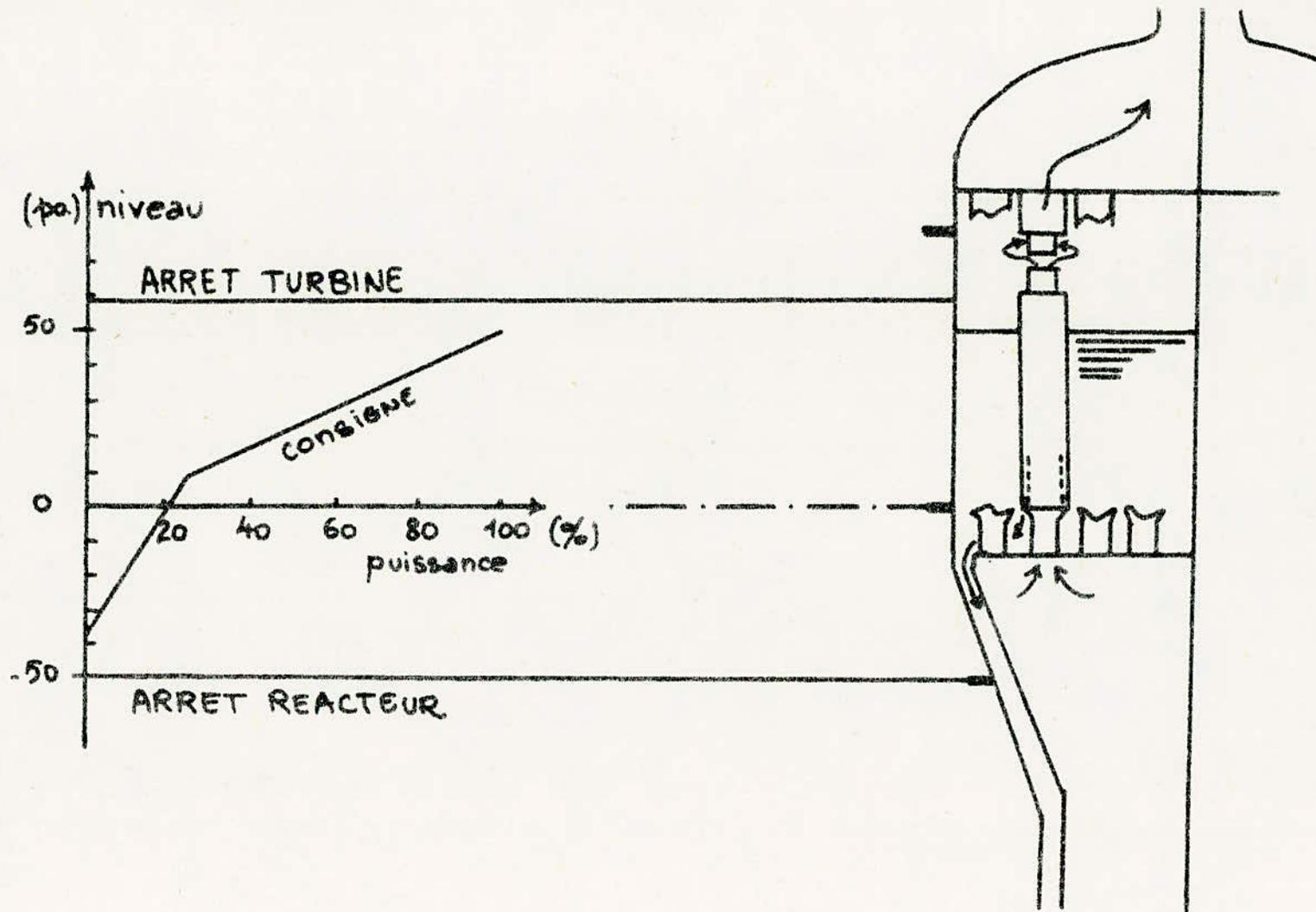


fig II 223a: Plage de fonctionnement du niveau dans le G.V.

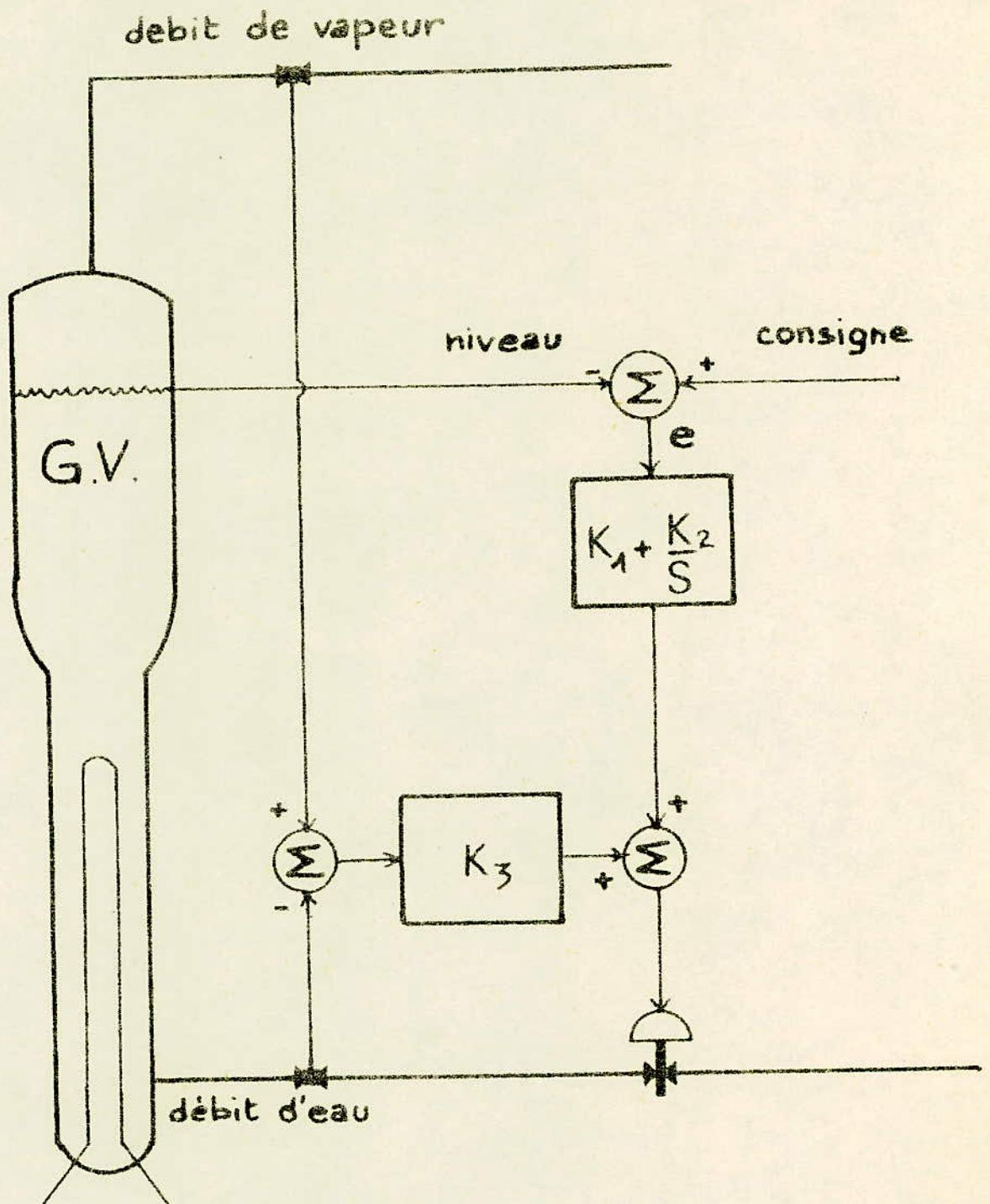


fig II.2.2.3b: Logique de régulation simple du niveau d'eau dans le générateur de vapeur.

En effet, imaginons, par exemple, que la puissance augmente et admettons que, lors de cette manoeuvre, les vannes d'eau d'alimentation restent fermées pendant que la vapeur produite est libre de sortir du générateur de vapeur. Lors de cette montée en puissance, il se produit une dilatation importante du mélange eau-vapeur contenu dans la colonne montante. On montre que cette dilatation affecte de façon importante le niveau d'eau dans l'anneau de recirculation. La figure II.2.2.3.c. montre en effet que, dans le cas considéré, le niveau d'eau dans l'anneau monte très haut bien que la masse dans le générateur de vapeur diminue. On serait par conséquent tenté de fermer les vannes d'eau alimentaire dès que la puissance augmente ce qui est contraire à l'action du régulateur précédent.

La figure : II.2.2.3.d. montre que lors d'une injection brutale d'eau alimentaire, le niveau monte initialement comme prévu, mais qu'il tombe ensuite pendant plusieurs secondes avant de remonter linéairement. La baisse de niveau est due à la contraction du mélange eau-vapeur par suite d'une arrivée d'eau alimentaire plus froide dans le bouilleur.

On peut montrer enfin, en se reportant à la figure II.2.2.3.e. que le niveau est plus affecté par les variations de débit d'eau alimentaire à basses puissances.

Compte tenu de toutes ces considérations concernant la dynamique du niveau, on en déduit qu'un régulateur classique à trois éléments serait pris en défaut lors des manoeuvres rapides et à basses puissances.

#### II.2.2.3.2.3. : REGULATEUR UTILISE DANS LA CENTRALE :

Pour tenir compte de l'ensemble des phénomènes décrits précédemment, le constructeur a été amené à concevoir un système plus complexe dont le schéma de principe est donné par la figure : II.2.2.3.f.

On y reconnaît la structure du régulateur classique dont les trois éléments accomplissent toute la besogne en régime permanent, soit la majeure partie du temps. Les nouveautés permettent une meilleure régulation à basse puissance et durant les transitoires.

.../...

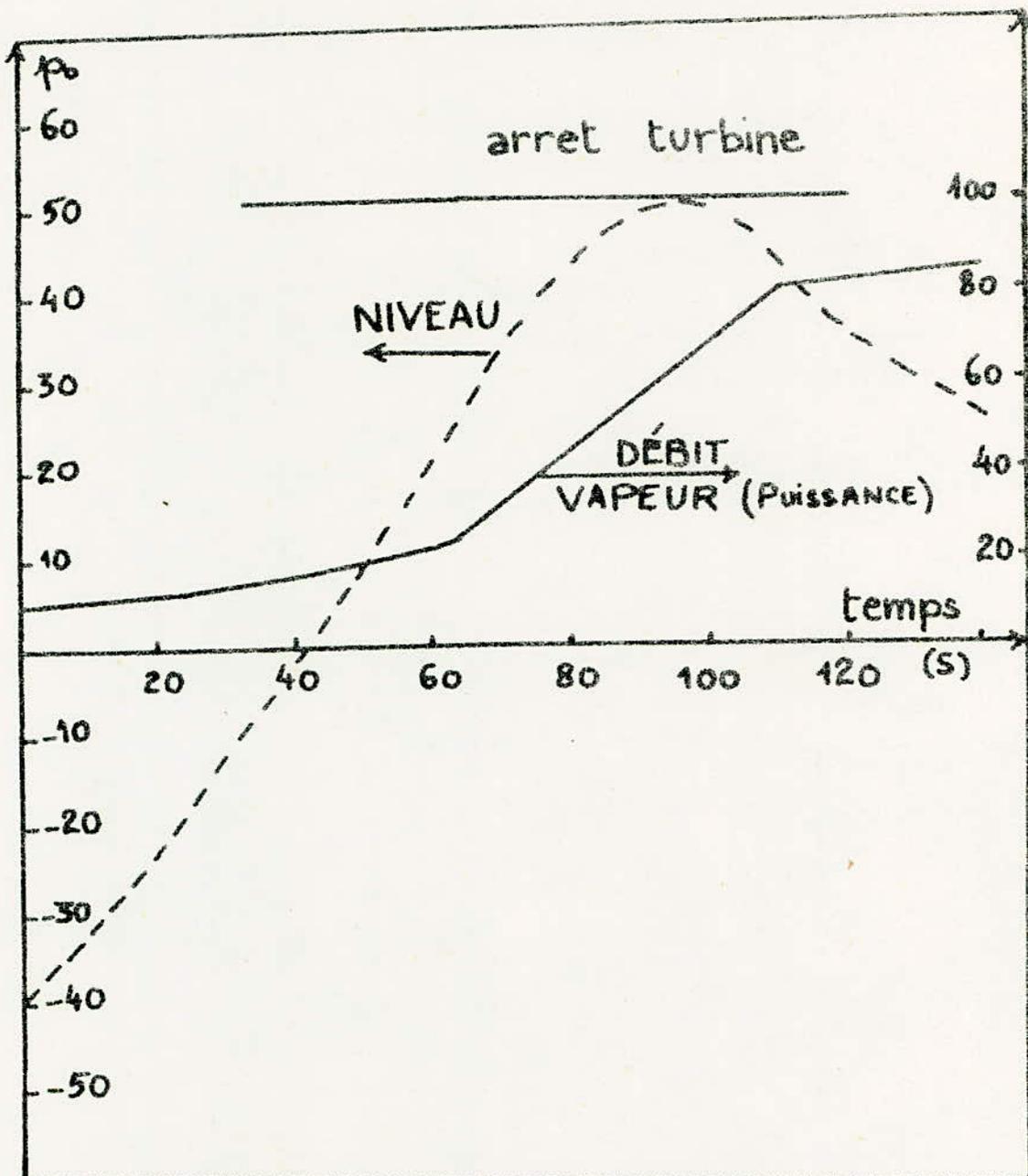


fig II.22.3.c: Dilatation dans le G.V mesurée par le niveau dans le ballon de vapeur  
 Note: durant le transitoire les vannes d'eau d'alimentation sont fermées.

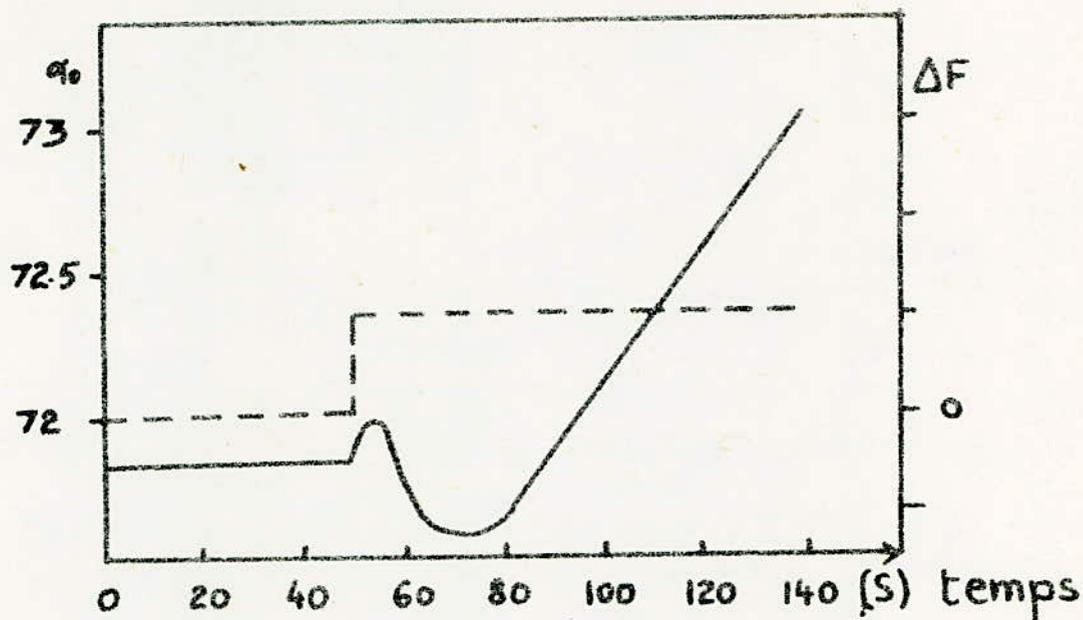


fig II.2.2.3.d: reponse du niveau à un echelon dans le debit d'eau d'alimentation ( $\Delta F$ )

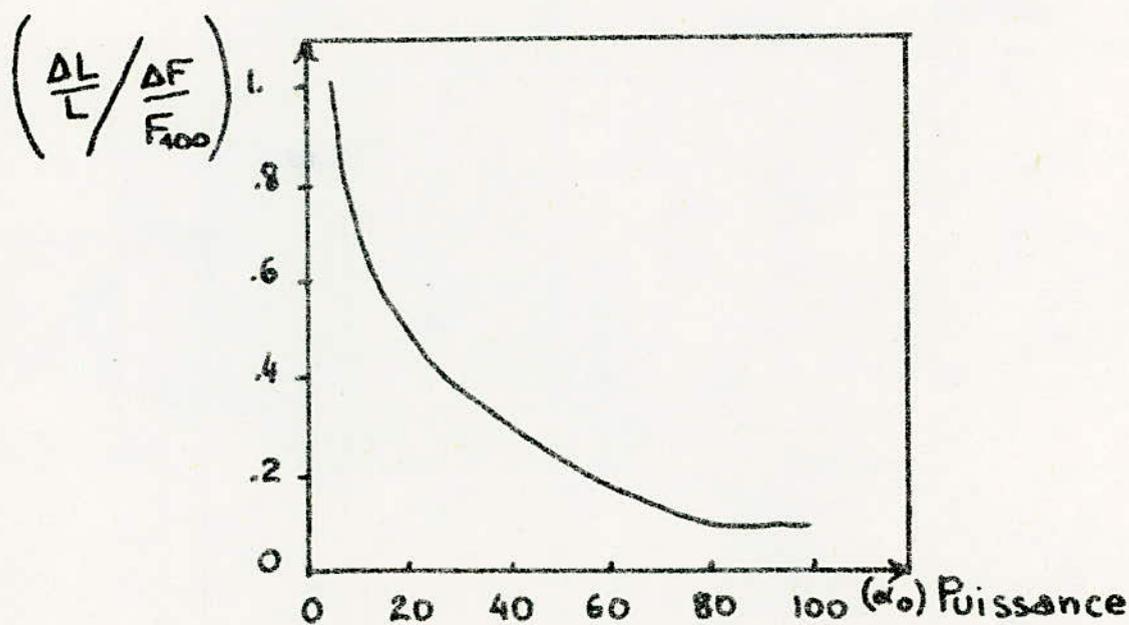


fig II.2.2.3.e: réponse relative du niveau ( $L$ ) à une perturbation ( $\Delta F$ ) du débit d'alimentation  $F_{100}$ .

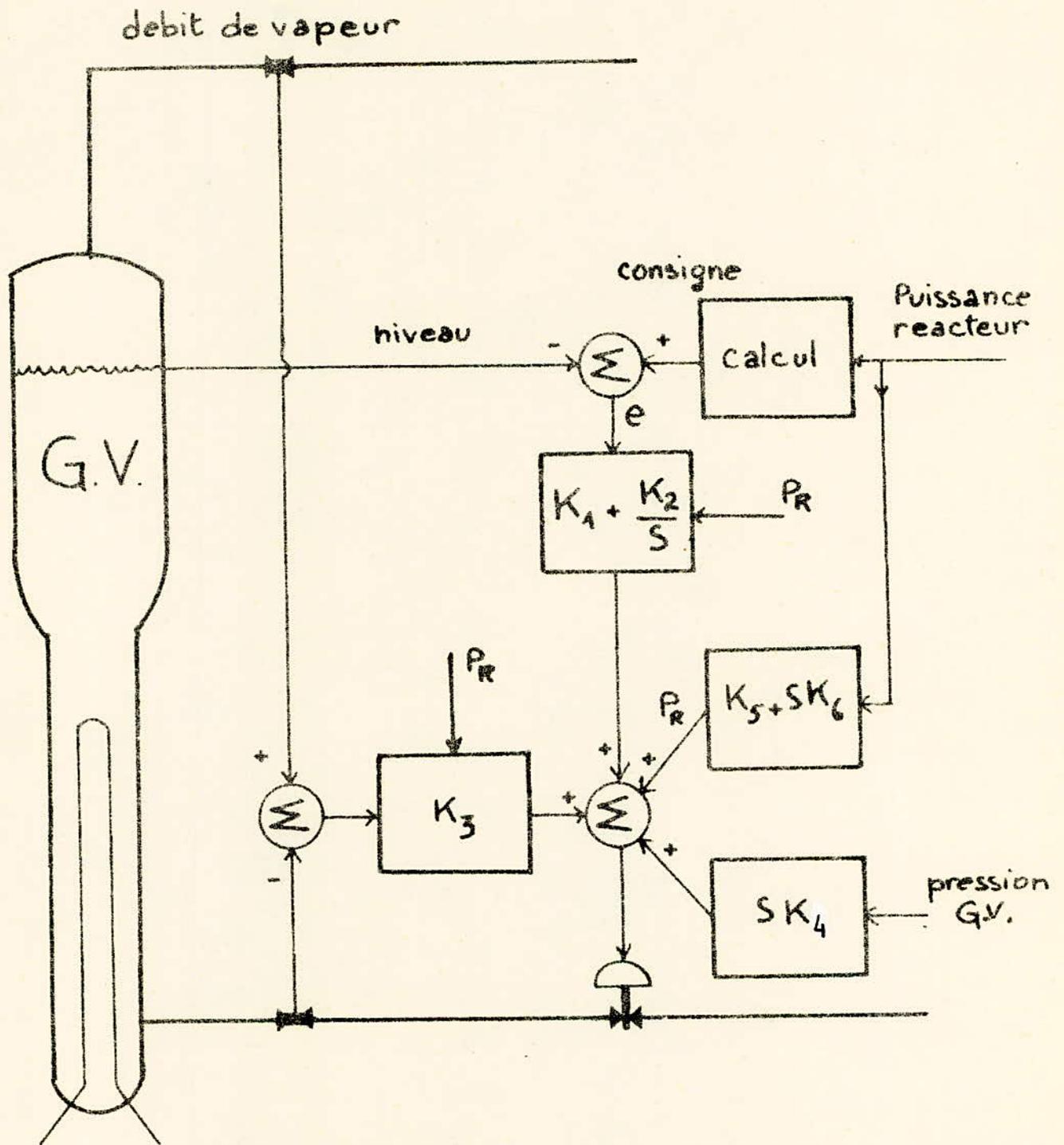


fig II.2.2.3.f: Logiciel du régulateur de niveau dans le générateur de vapeur.

Ces nouveautés sont sommairement décrites ici :

- a) Les gains  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  doivent être plus faibles aux puissances élevées qu'aux puissances faibles pour tenir compte de la plus grande sensibilité des variations de niveau aux basses puissances.
- b) Le niveau de consigne doit être tel que  $\frac{ANC}{AW}$  soit réduit lorsque la puissance augmente afin d'absorber les dilatations du mélange eau-vapeur lors des montées en puissance.
- c) La boucle comprenant les gains  $K_5$  et  $K_6$  est là uniquement pour compenser les effets sur le niveau des variations de densités du mélange eau/vapeur dans la colonne montante.

En effet, si l'eau se dilate lors des montées en puissance, elle se contracte lors des baisses de puissance. Des calculs ont montré qu'une baisse de puissance de 100 % à 0 % ferait baisser le niveau de 30 m !!! ...

La boucle précédente est prévue pour fermer la vanne d'eau alimentaire lors des montées en puissance et de l'ouvrir lors des baisses de charge (puissance).

- d) La boucle  $K_4$  permet d'anticiper et de corriger les variations de niveau dues aux chargements de pression dans le ballon de vapeur.

### II.2.2.3.3. : MODELISATION DU REGULATEUR UTILISE :

#### II.2.2.3.3.1. : INTRODUCTION :

La figure : II.2.2.3.1.g. : qui donne le détail des différents éléments composant le régulateur montre les signaux pris en compte dans la régulation. Il s'agit :

- du signal donnant la puissance du réacteur,
- du signal d'erreur de niveau,
- du signal d'erreur de débit,
- du signal d'anticipation.

.../...



### II.2.2.3.3.2. : SIGNAL DE PUISSANCE :

Entre l'instant où la puissance est mesurée au niveau des détecteurs et le moment où cette puissance est transmise aux générateurs de vapeur, il s'écoule un certain temps  $T_1$  somme :

- du temps égal à 6s mis par le flux de chaleur pour atteindre le collecteur de sortie,
- du temps égal à 4,7s que met le fluide caloporteur pour passer du collecteur de sortie à l'entrée des générateurs de vapeur,
- du temps égal à 4s que met le flux de chaleur pour être transmis du primaire au secondaire du générateur de Vapeur Via les tubes en U,
- du temps égal à 1s mis par l'eau alimentaire pour se transformer en Vapeur.

Compte tenu de ce qui précède, on déduit que  $T_1 = 20s$ , de sorte que la puissance neutronique retardée WNR transmise aux générateurs de Vapeur et la puissance neutronique normalisée WN issue des détecteurs au platine peuvent être reliés par la relation :

$$\frac{WNR}{WN} = \frac{1}{1 + T_1 p} \quad (1)$$

Le concepteur a pu établir que la puissance neutronique retardée WNR et la puissance WG transmise au générateur de vapeur peuvent être reliées par une corrélation du type :

$$W_G = 1,056 \times WNR - 0,056 \quad \text{pour } WNR > 0,5 \quad (2)$$

$$W_G = 0,944 \times WNR \quad \text{pour } WNR \leq 0,5 \quad (3)$$

Afin d'anticiper les gonflements et les contractions du fluide contenu dans les générateurs de vapeur le concepteur a introduit un terme calculé à partir du taux de changement de la puissance neutronique :

$$W'_N = \frac{W_N(n) - W_N(n-1)}{2} \quad (4)$$

Le terme proposé pour l'anticipation est de la forme :

$$W_A = K_2 \frac{W'_N}{1 + T_2 p} \quad (5)$$

.../...

$K_2 = -40$  étant le gain pour le terme de dilatation dû au taux de changement de la puissance aux générateurs de vapeur et  $T_2 = 20$  s une constante de temps.

Pour tenir compte de l'effet des variations de puissance sur le niveau, le concepteur a introduit un deuxième terme d'anticipation, fonction de la pression PB régnant dans le ballon. Le terme proposé est de la forme :

$$WP = K_3 \frac{dPB}{dt} = P_{K_3} \cdot PB \quad (6)$$

La relation précédente  $WP = K_3 \frac{dPB}{dt}$  provient d'une approximation qui décrit le comportement global de la pression par rapport au bilan d'énergie :

$$\frac{dPB}{dt} = 0,05 (E_{in} - E_{out}) \quad (7)$$

où :

PB = pression régnant dans le ballon (% valeur nominale)

$E_{in}$  = énergie qui rentre (% pleine puissance)

$E_{out}$  = énergie sortante (% pleine puissance)

A cause de l'effet négligeable de la pression PB sur le niveau, on prend généralement pour le gain  $K_3$  une valeur nulle.

Le signal de puissance W transmis au régulateur est donné par la relation suivante :

$$W = W_G + W_A + W_P \quad (8)$$

#### II.2.3.3.3.3. : SIGNAL D'ERREUR DE NIVEAU :

Le niveau mesuré NM est relié au niveau N réel par la relation :

$$NM = \frac{N}{1 + T_{3P}} \quad (9)$$

$T_3 = 1$  s étant une constante de temps

Le niveau de consigne  $N_C$  exprimé en mètres est programmé en fonction de la puissance W transmise aux générateurs de vapeur pour compenser l'effet des gonflements et des contractions des manoeuvres de puissance.

.../...

Le programme proposé est du type :

$$N_C = 1,4227 \times W - 0,1527 \quad \text{pour } W > 0,25 \quad (10)$$

$$N_C = 4,876 \times W - 1,016 \quad \text{pour } W \leq 0,25 \quad (11)$$

avec :

$$- 1,016 \leq N_C \leq 1,27$$

Notons au passage que pour des puissances inférieures à 15 % le niveau de consigne peut être fixé manuellement.

Le signal de commande appliqué au régulateur est constitué de deux signaux : un signal proportionnel, l'autre intégral, tout deux fonction de l'écart de niveau :

$$\Delta N = N_C - NM \quad (13)$$

Le terme proportionnel SP est donné par :

$$SP = K_4 \Delta N \quad (14)$$

Expression dans laquelle le gain  $K_4$  fonction linéaire de  $W$  dans le but de réduire les fluctuations à basses puissances est donnée par :

$$K_4 = 0,335 \times W + 0,065 \quad (15)$$

Le signal SI, lui aussi fonction de la puissance est donnée par :

$$SI = \frac{\Delta N}{T_{ip}} \quad (16)$$

avec :

$$- 0,2 \leq SI \leq + 0,2 \quad (17)$$

Expression dans laquelle  $T_i$  constante de temps d'intégration fonction de décroissant en fonction de la puissance  $W$  pour réduire les fluctuations à basses puissances est donnée par :

$$T_i = -62,5 \times W + 132,5 \quad \text{pour } W > 0,2 \quad (18)$$

$$T_i = -400 \times W + 200 \quad \text{pour } W \leq 0,2 \quad (19)$$

Compte tenu de ce qui précède, on déduit que le signal de commande, fonction de l'écart de niveau, appliqué au régulateur est :

$$SN = SP + SI \quad (20)$$

avec :

$$-1,0 \leq SN \leq 1,0 \quad (21)$$

.../...

II.2.3.3.3.4 : SIGNAL D'ERREUR DE DEBIT :

Compte tenu du temps de réponse  $T_V$  et  $T_E$  de l'instrumentation chargée de mesurer les débits de vapeur et d'eau alimentaire, respectivement, on déduit que :

$$Q_{VM} = \frac{1}{1 + T_{VP}} Q_V \quad (22)$$

$$Q_{EAM} = \frac{1}{1 + T_{EP}} Q_{EA} \quad (23)$$

Expression dans laquelle  $Q_V$ ,  $Q_{VM}$ ,  $Q_{EA}$ ,  $Q_{EAM}$ , représentent respectivement les débits massiques de vapeur réels et mesurés ainsi que les débits massiques d'eau alimentaire réels et mesurés.

Le signal de débit mesuré est donc :

$$\Delta Q = Q_{EAM} - Q_{VM} \quad (24)$$

Le signal d'erreur de débit  $\delta Q$  appliqué au correcteur est donné par l'expression :

$$\delta Q = \alpha K_5 \Delta Q \quad (25)$$

Expression dans laquelle le gain  $K_5$  est fixé à 0,6 et le facteur de pondération tenant compte du manque de précision dans la mesure du débit de vapeur lorsque ce dernier est faible est tel que :

$$\alpha = 1,0 \quad \text{pour } Q_V \geq 0,3 \quad (26)$$

$$\alpha = 10 Q_V - 20 \quad \text{pour } 0,2 \leq Q_V \leq 0,3 \quad (27)$$

$$\alpha = 0 \quad \text{pour } Q_V \leq 0,2 \quad (28)$$

II.2.3.3.3.5. : SIGNAL DE COMMANDE APPLIQUE AU REGULATEUR :

Compte tenu de ce qui précède, on déduit que le signal de commande appliqué au régulateur est donné par :

$$S = SW + SN - \delta Q \quad (29)$$

avec :  $0 \leq Y \leq 1,1$

.../...

Ce signal commande l'ouverture des vannes d'eau alimentaire.

Celle-ci ayant un temps de réponse T de l'ordre de 2s, on déduit que leur taux d'ouverture ou de fermeture Y est donné par :

$$\frac{dY}{dt} = \frac{S - Y}{T} \quad (31)$$

Le taux d'ouverture ou de fermeture est limité à 5 % de sorte que :

$$- 0,05 \leq \frac{dY}{dt} \leq 0,05 \quad (32)$$

Le débit normalisé d'eau alimentation est pris égal à l'ouverture

Y :

$$QEA = Y \quad (33)$$

II.2.2.4. : REGULATION DE PRESSION AU NIVEAU DES GENERATEURS DE VAPEUR -II.2.2.4.1 : INTRODUCTION :II.2.2.4.1.1 : ROLES DU REGULATEUR DE PRESSION :

Le régulateur de pression est chargé :

- 1 - De pressuriser et dépressuriser le générateur de vapeur lors des phases de réchauffage ou de refroidissement.
- 2 - De maintenir la pression au niveau des collecteurs de vapeur aussi proche que possible du point de consigne ( $P_c = 4600 \text{ Kpa}$  ).
- 3 - De protéger les générateurs de vapeur et la turbine contre les fortes pressions.

II.2.2.4.1.2. : LES DIFFERENTS MODES DE FONCTIONNEMENT :

Il existe trois modes de fonctionnement :

- 1 - Mode réchauffage,
- 2 - Mode refroidissement,
- 3 - Mode fixe,

En mode fixe, la centrale peut fonctionner :

- soit en mode "TURBINE PRIORITAIRE"
- soit en mode "REACTEUR PRIORITAIRE"

II.2.2.4.2. : REGULATION EN MODE RECHAUFFAGE :

Le mode "réchauffage" est utilisé uniquement pour rétablir les conditions de fonctionnement en puissance. Pour ce faire on augmente lentement la puissance du réacteur de façon à chauffer et pressuriser le circuit primaire.

L'énergie cédée au générateur de vapeur permet de chauffer et de pressuriser le secondaire.

Lorsque la pression de consigne ( $P_c = 4600 \text{ Kpa}$ ) du générateur de vapeur est atteinte, le régulateur passe en mode fixe. Lors de cette phase on peut utiliser les vannes de décharge à l'atmosphère (ASDV) et les vannes de contournement au condenseur (CSDV).

.../...

II.2.2.4.3. : REGULATION EN MODE REFROIDISSEMENT :

Le mode "refroidissement" est utilisé lorsque le réacteur et la turbine sont arrêtés. Dans ce cas, on obtient une dépressurisation lente du générateur de vapeur, en utilisant les vannes de contournement au condenseur ou en cas d'indisponibilité de celles-ci les vannes de décharge à l'atmosphère.

II.2.2.4.4. : REGULATION EN MODE DE FIXE :

En mode fixe la centrale peut fonctionner soit en turbine prioritaire, soit en réacteur prioritaire.

II.2.2.4.4.1. : REGULATION EN MODE TURBINE PRIORITAIRE :

En mode turbine prioritaire, mode de fonctionnement préférentiel, on assure une régulation de pression en agissant sur la puissance du réacteur. Dans ce cas, la puissance du réacteur doit être aussi proche que possible d'un point de consigne  $J_{sp}$  calculé à partir de mesures de pression  $P_M$ , de la puissance actuelle de la turbine  $J_T$  et de la puissance thermique livrée à l'usine d'eau lourde  $J_H$ .

La figure : II.2.2.4.a : donne le schéma de principe du régulateur en mode turbine prioritaire, à partir duquel on peut déduire que la puissance de consigne du réacteur est donnée par :

$$J_{sp} = J_T + J_H + K_1 (P_C - P_M) + K_2 \int (P_C - P_M) dt$$

ou

$P_C$  = pression de consigne en Kpa

$P_M$  = pression mesurée en Kpa

$J_T$  = puissance de la turbine ( % PP)

$J_H$  = puissance livrée à l'usine d'eau lourde (% PP)

$K_1$  = 0,036 (% PP/Kpa)

$K_2$  =  $K_1/100$  ( % PP/Kpa.s)

$J_{Lo}$  = limite inférieure de la puissance du réacteur  
fixée par l'opérateur -

$J_{HL}$  = limite supérieure de la puissance du réacteur  
fixée par l'opérateur.

.../...

La régulation comme le montre cette figure est basée sur une boucle de régulation et une boucle d'anticipation. Le terme d'anticipation est la somme de  $J_T$  et  $J_H$ . Supposant une variation de l'une ou de l'autre on n'attend pas que la pression  $P_M$  varie pour ajuster la puissance du réacteur. La boucle de rétroaction agit plus lentement et apporte les corrections mineures pour que  $P_M$  égale la consigne  $P_c$ .

On utilise une régulation proportionnelle et intégrale pour cette boucle.

Si la puissance demandée au réacteur est hors d'une plage de fonctionnement délimitée par  $J_{Lo}$  et  $J_{Hi}$ , la régulation de pression passe au mode réacteur prioritaire.

#### II.2.2.4.4.2. : REGULATION EN MODE REACTEUR PRIORITAIRE :

Ce mode est utilisé :

- aux basses puissances lorsque la pression aux générateurs de vapeur est pratiquement insensible aux variations de puissance nucléaire.
- aux puissances limites lorsqu'on désire éviter toute manoeuvre de la puissance du réacteur.

Dans ce cas, on peut agir soit sur les vannes d'admission à la turbine soit sur les vannes de décharge à l'atmosphère soit sur les vannes de contournement au condenseur, soit sur les vannes de sécurité.

##### a) UTILISATION DES VANNES D'ADMISSION A LA TURBINE :

Pour que les vannes d'admission à la turbine puissent remplir leur rôle, il conviendra de leur spécifier un taux d'ouverture  $\frac{ds}{dt}$ .

La figure : II.2.2.4 b montre que ce taux d'ouverture est donnée par la relation :

$$\frac{ds}{dt} = K_1 (P_c - P_M) + K_2 \frac{d}{dt} (P_c - P_M) + K_3 \frac{dJ_R}{dt}$$

où :

$$K_1 = 0,01 \text{ (\%/KPa.s)}$$

$$K_2 = 0,1 \text{ (\%/KPa)}$$

$$K_3 = 0,75$$

$$J_R = \text{puissance du réacteur}$$

.../...

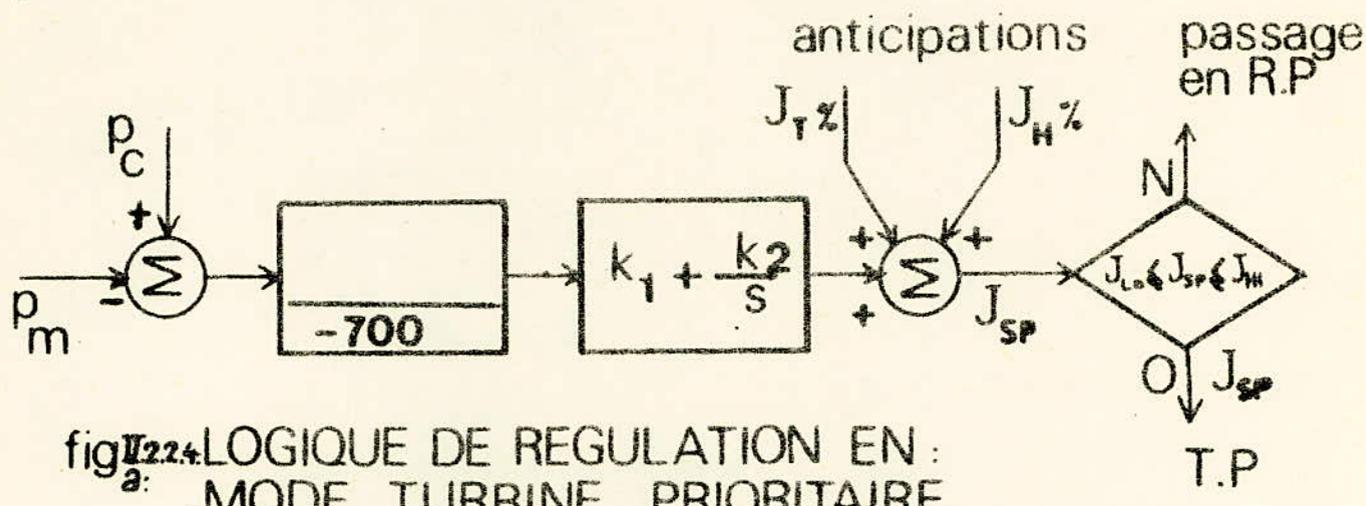


fig 224. LOGIQUE DE REGULATION EN :  
a. MODE TURBINE PRIORITAIRE.

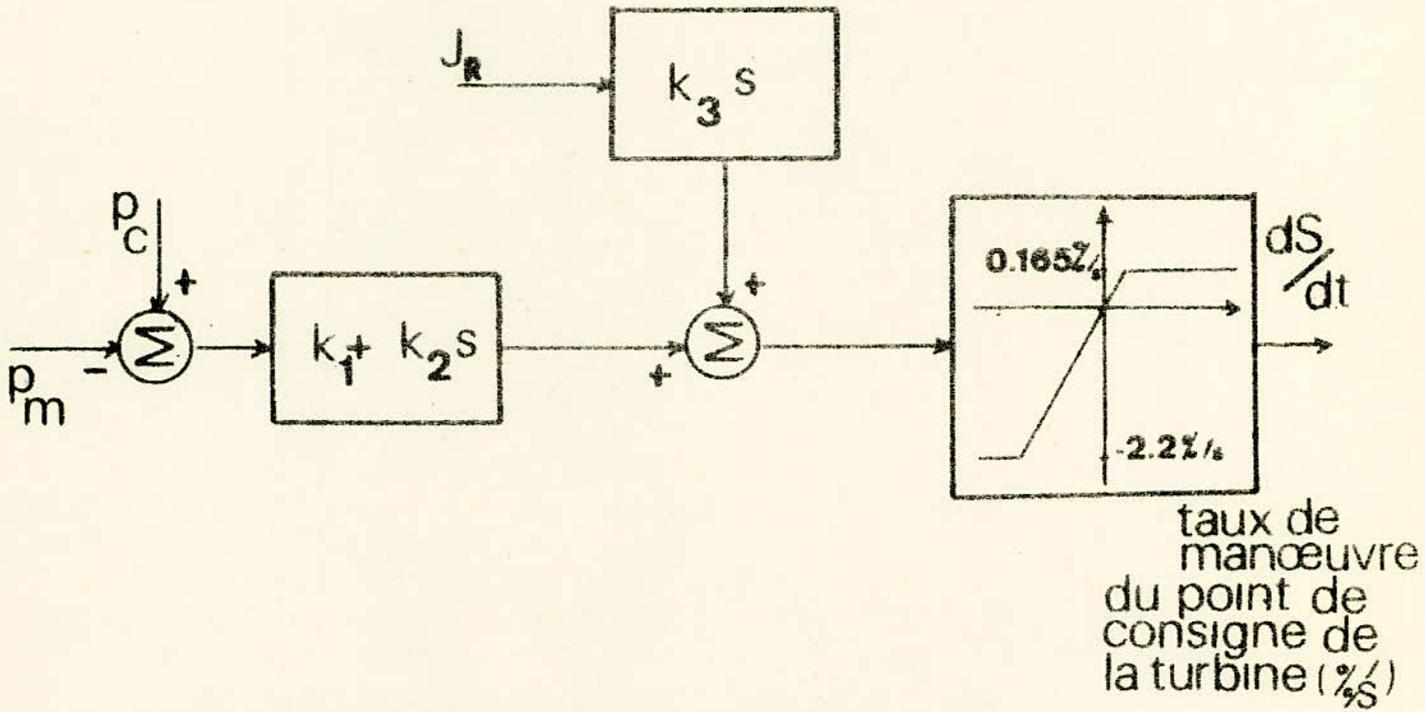


fig 224. MODE REACTEUR PRIORITAIRE.

Le taux de manoeuvre  $\frac{ds}{dt}$  est limité à 1/6 (%/s) et -2,2 (%/s).  
 De même que pour la régulation en mode turbine, la régulation est basée sur une boucle de rétroaction et une boucle d'anticipation. Puisque l'on calcule un taux, il n'est pas surprenant que l'on calcule la dérivée de  $J_R$  et  $P_M$ .  
 La boucle d'anticipation reflète les variations de la puissance du réacteur directement sur la turbine, tandis que la boucle de rétroaction, agissant lentement, apporte les corrections mineures pour que  $P_M$  égale  $P_C$ .

b) UTILISATION DES ASDV :

Les vannes de délestage à l'atmosphère (ASDV) ont une capacité de 10 % du plein débit vapeur. Elles veillent en tout temps et ne s'ouvrent que si la pression  $P_M$  dépasse la consigne  $P_C$  d'un certain seuil  $P_{O1}$ . La figure II.2.2.4 c montre comment est calculé le signal de position demandé aux vannes.

$$S = K_1 (P_M - P_C - P_{O1})$$

avec :

$$P_{O1} = 70 \text{ Kpa}$$

$$K_1 = 2,86 \text{ ( \% ouverture/KPa)}$$

$$S = \text{position d'ouverture demandée ( \% ouverture)}.$$

La régulation est essentiellement de type proportionnelle en ce sens que l'ouverture de la vanne est proportionnelle à l'erreur de pression.

c) UTILISATION DES CSDV :

Les vannes de contournement au condenseur (CSDV) ont une capacité de 77 % du débit vapeur nominal. Elles s'ouvrent dès que la pression du générateur de vapeur dépasse la consigne d'un seuil ( $P_{O2}$ ). La figure II.2.2.4 d présente la logique de ce mode.

On y retrouve la boucle de rétroaction similaire à celle des vannes de décharge à l'atmosphère (ASDV). Une boucle d'anticipation permet de minimiser les transitoires de pression dans le générateur de vapeur lorsque le bilan d'énergie est brusquement détérioré lors des incidents à la turbine où à l'usine d'eau lourde.

.../...

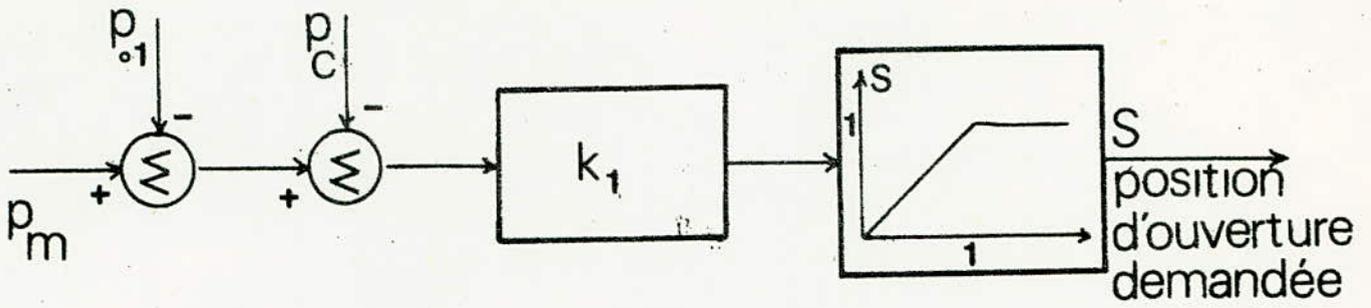


fig II.2.2.4.c: LOGIQUE DE REGULATION PAR LES ASDV

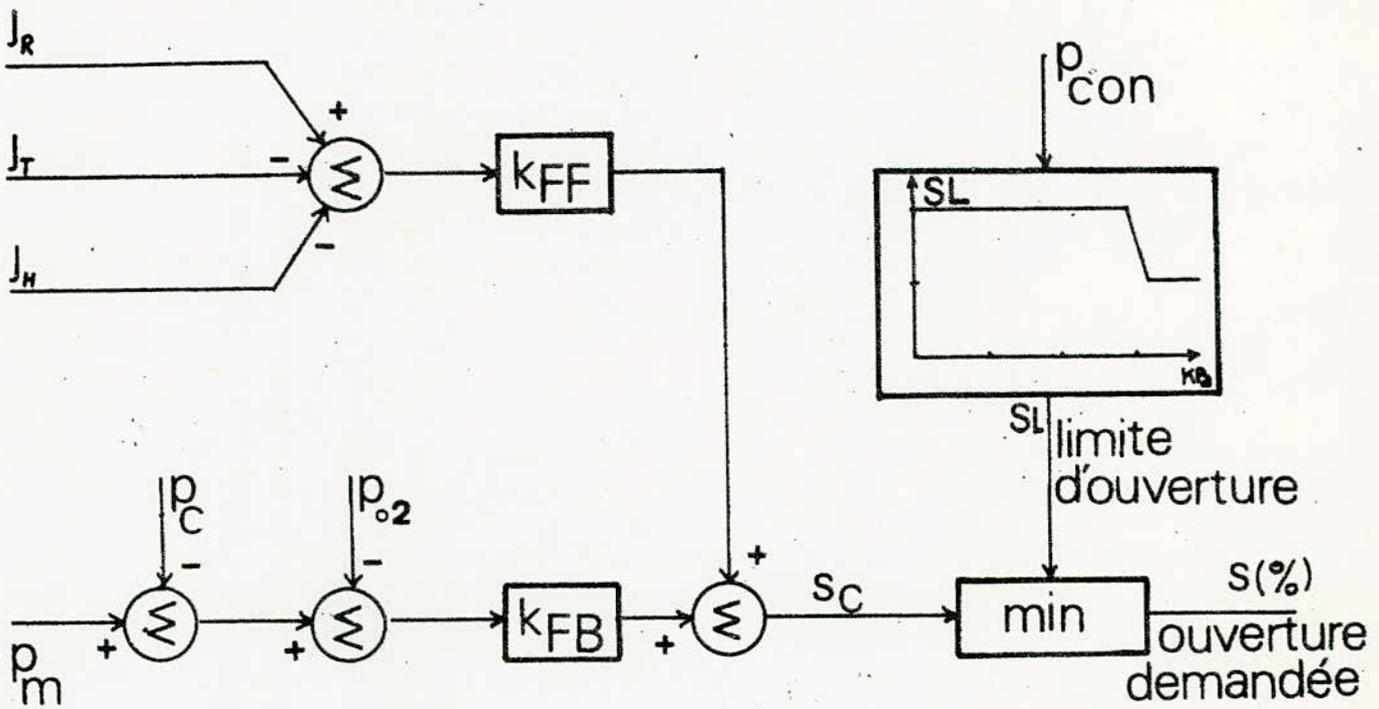


fig II.2.2.4.d: LOGIQUE D'UTILISATION DES CSDV

L'ouverture effective des vannes de contournement au condenseur est donnée par la relation :

$$S (\%) = \text{Minimum de } (S_C \%, S_L \%)$$

Dans cette relation  $S_C$  représente l'ouverture demandée aux CSDV :

$$S_C (\%) = KFB (P_M - P_C - P_{O2}) + KFF (J_R - J_T - J_H).$$

où :

$$P_{O2} = 100 \text{ kPa}$$

$$KFB = 0,4 \text{ \% ouverture /KPa}$$

$$KFF = 1,25 \text{ \% ouverture/\%PP}$$

et  $S_L$  la limite d'ouverture des CSDV. L'ouverture limite  $S_L$  n'est pas fixe, elle est programmée en fonction de la pression ( $P_{CON}$ ) régnant dans le condenseur.

$$S_L = \begin{cases} 1 & \text{si } P_{COM} \leq 14 \text{ Kpa} \\ - 0,5 P_{CON} + 8 & \text{si } 14 < P_{CON} \leq 16 \text{ Kpa} \end{cases}$$

d) SOUPAPES DE SECURITE :

Si l'écart de pression  $\Delta P = P_M - P_C$  dépasse 400 Kpa, les soupapes de sécurités s'ouvrent automatiquement.

Le schéma synoptique général du régulateur de pression est donnée par la figure II.2.2.4.

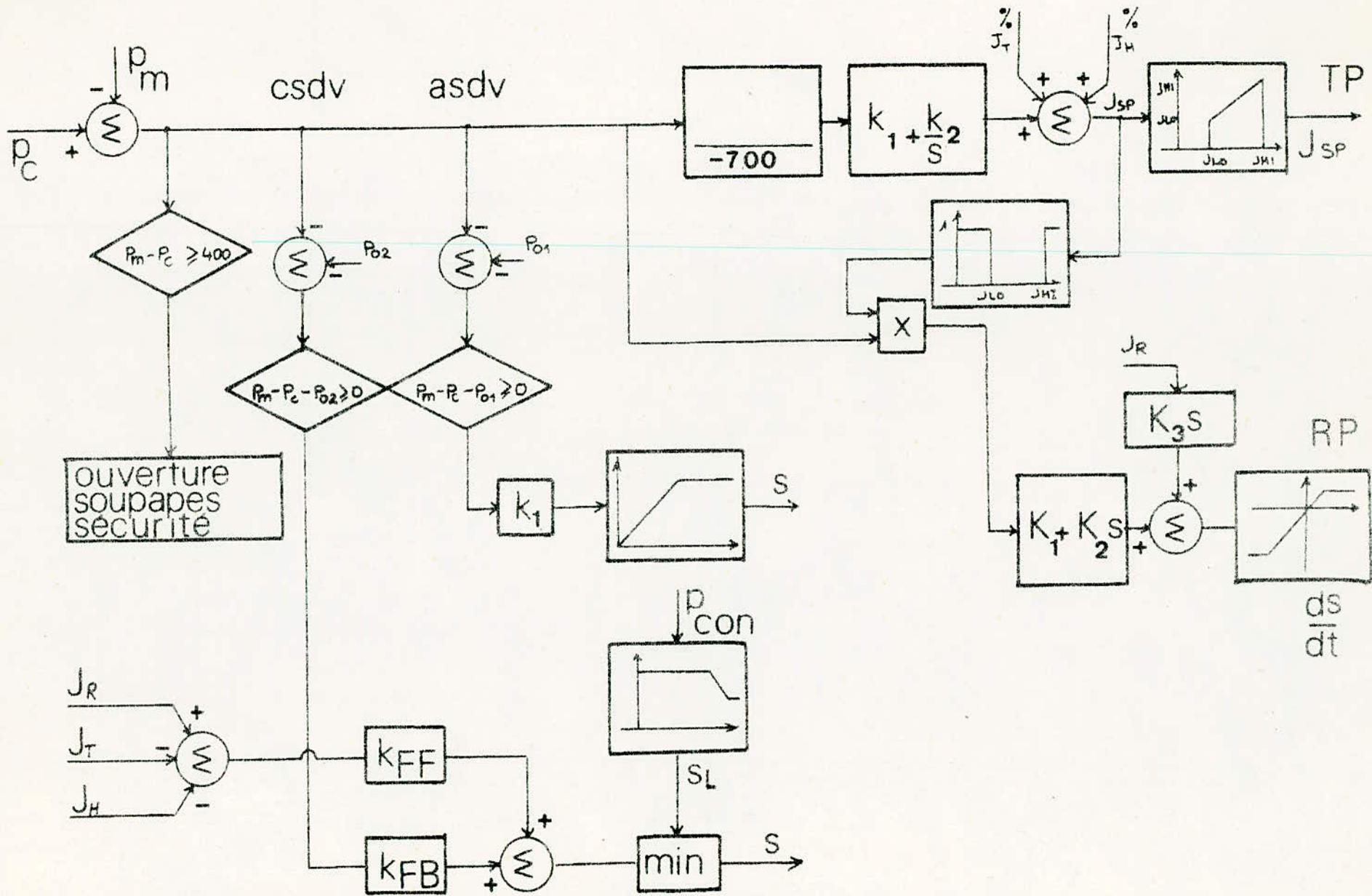


fig II.2.2.4: regulation de pression au niveau des GV

II. 3. REALISATION :II. 3.1. INTRODUCTION :

Le but assigné à notre travail est l'étude analogique des régulations dans une centrale électronucléaire.

- Nous commencerons par définir ce que l'on entend par simulation analogique.
- Nous passerons ensuite à la présentation des caractéristiques des composants électroniques utilisés qui sont essentiellement soit des amplificateurs soit des multiplieurs-diviseurs.
- Dans une troisième partie, nous présenterons les méthodes de résolution d'équations ou de système d'équations différentielles.
- La quatrième partie sera consacrée à la présentations des principaux générateurs de fonctions réalisés ainsi que de l'ensemble des circuits.

II. 3. 2. PRINCIPE DU CALCUL ANALOGIQUE :

L'Etude analogique d'un phénomène physique consiste à remplacer la grandeur physique  $\phi_{phy}$  que l'on désire étudier par une grandeur électrique dite grandeur machine  $\phi_{Mach}$  qui peut être soit un courant soit une tension.

Afin que la grandeur électronique ainsi obtenue puisse être exploitable, il conviendra de faire une correspondance entre les deux grandeurs  $\phi_{phy}$  et  $\phi_{Mach}$  précédemment introduites.

Cette correspondance est réalisée par la définition d'une unité machine et d'un facteur d'échelle.

II. 3.2.1. UNITE MACHINE :

L'unité machine permet de fixer une tension de référence, utilisée pour étudier une correspondance entre les grandeurs  $\phi_{Mach}$  et  $\phi_{phy}$ .

Dans notre cas nous avons pris comme unité machine UM la valeur :

$$1 \text{ UM} = 10\text{V}$$

II.3.2.2. FACTEUR D'AMPLITUDE :

Afin que l'amplitude des signaux électriques représentant les grandeurs physiques étudiées soient situées dans un domaine d'amplitude limité du côté bas par le bruit propre des circuits électroniques utilisés et du côté haut par la saturation de ces mêmes circuits, on est conduit à définir un facteur d'échelle K qui tient compte de la valeur maximale  $\phi_{max}$  de la grandeur étudiée.

Le facteur K est défini par la relation :

$$K = \frac{1}{\phi_{max}}$$

.../...

### II. 3.2.3. CHOIX DE L'ECHELLE DES TEMPS :

Si l'on tient compte du fait que la vitesse d'évolution des phénomènes physiques étudiés peut varier de quelques micro-secondes à quelques heures et que la réponse des appareils permettant de visualiser les phénomènes étudiés est généralement limitée, on comprendra alors, la nécessité qu'il y a d'effectuer un changement d'échelle des temps. Ce changement doit tenir compte des composants électroniques étudiés.

T réel et T mach étant respectivement le temps réel et le temps machine, on peut introduire un facteur  $\alpha$  tel que :

$$T \text{ mach.} = \alpha T \text{ réel}$$

- Dans le cas où  $\alpha > 1$ , la solution est ralentie dans un rapport  $\alpha$ .

- Si  $\alpha < 1$ , la solution est accélérée dans un rapport  $\alpha$ .

Compte tenu de la relation précédente, on pourra écrire :

$$\frac{d}{dT_{\text{réel}}} = \frac{d}{d(T_{\text{mach}}/\alpha)} = \alpha \frac{d}{dT_{\text{mach}}}$$

On montrerait de même que :

$$\frac{d^n}{dT_{\text{réel}}^n} = \alpha^n \frac{d^n}{dT_{\text{mach.}}^n}$$

Dans notre cas, les phénomènes étudiés ne nécessitant pas de changement de temps nous avons travaillé en temps réel.

### II. 3. 3. CARACTERISTIQUES DES CIRCUITS ELECTRONIQUES UTILISES :

#### II. 3.3.1. INTRODUCTION :

Les quelques lignes qui précèdent nous ont permis de présenter ce qu'on entend par calcul analogique. Ceci étant fait, nous allons présenter le contenu de ce paragraphe.

La plupart des opérations analogiques effectuées dans la réalisation du simulateur ont été faites en utilisant essentiellement :

- L'amplificateur opérationnel,
- Le multiplieur-diviseur.

#### II.3.3.2. L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL :

##### II.3.3.2.1. INTRODUCTION :

Comme son nom l'indique l'amplificateur opérationnel est un circuit intégré conçu pour effectuer la plupart des opérations mathématiques que sont la sommation, l'intégration etc...

.../...

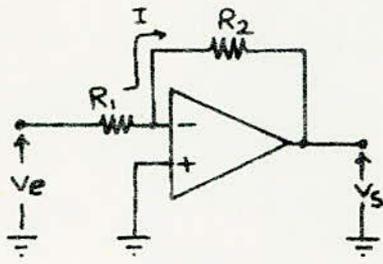


fig 2.1:  
Ampli inverseur.

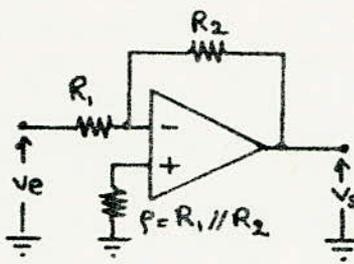


fig 2.2:  
Ampli inverseur avec  
correction de courant  
de décalage.

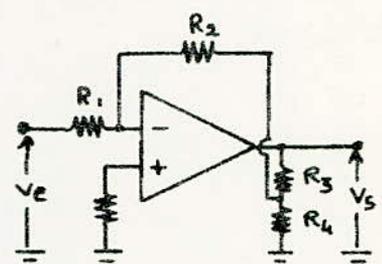


fig 2.3:  
Ampli inverseur à grand  
Gain.

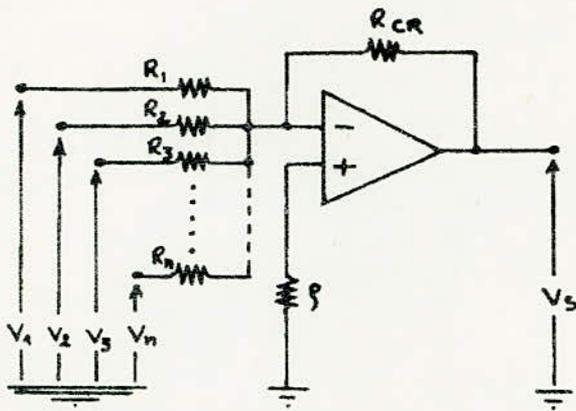


fig b:  
Circuit sommateur inverseur

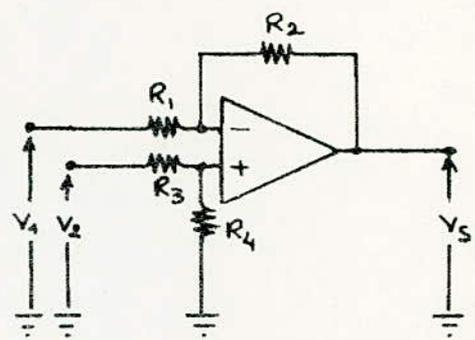


fig e:  
Amplificateur de différence.

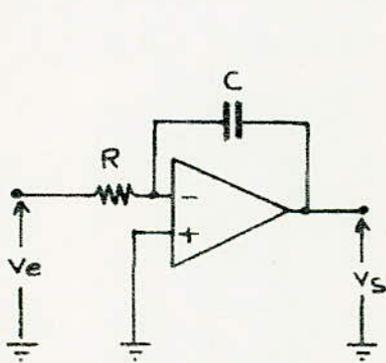


fig d.1:  
Amplificateur intégrateur.

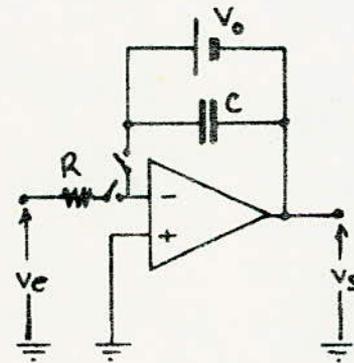


fig d.2:  
Intégrateur muni d'un  
dispositif pour fixer  
la condition initiale.

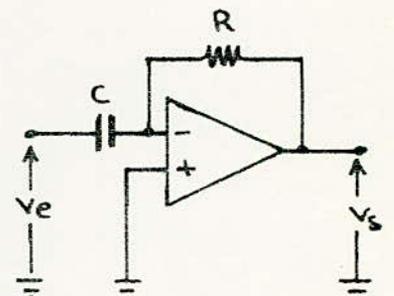


fig e.1:  
Ampli dérivateur.

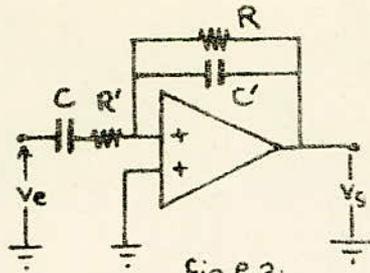


fig e.2:  
Ampli dérivateur avec compensation.

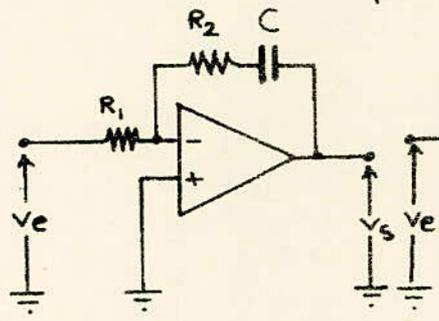


fig f:  
Action proportionnelle  
et intégrale (P.I.).

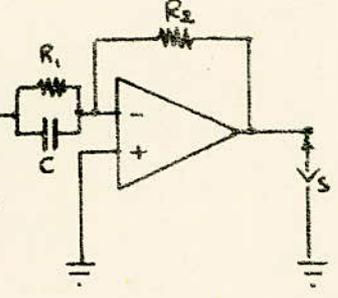


fig g:  
Action proportionnelle  
et dérivée (P.D.).

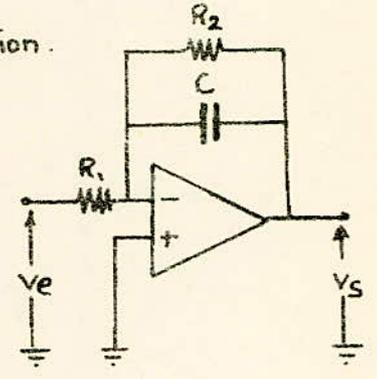


fig h:  
Filtre passe bas.

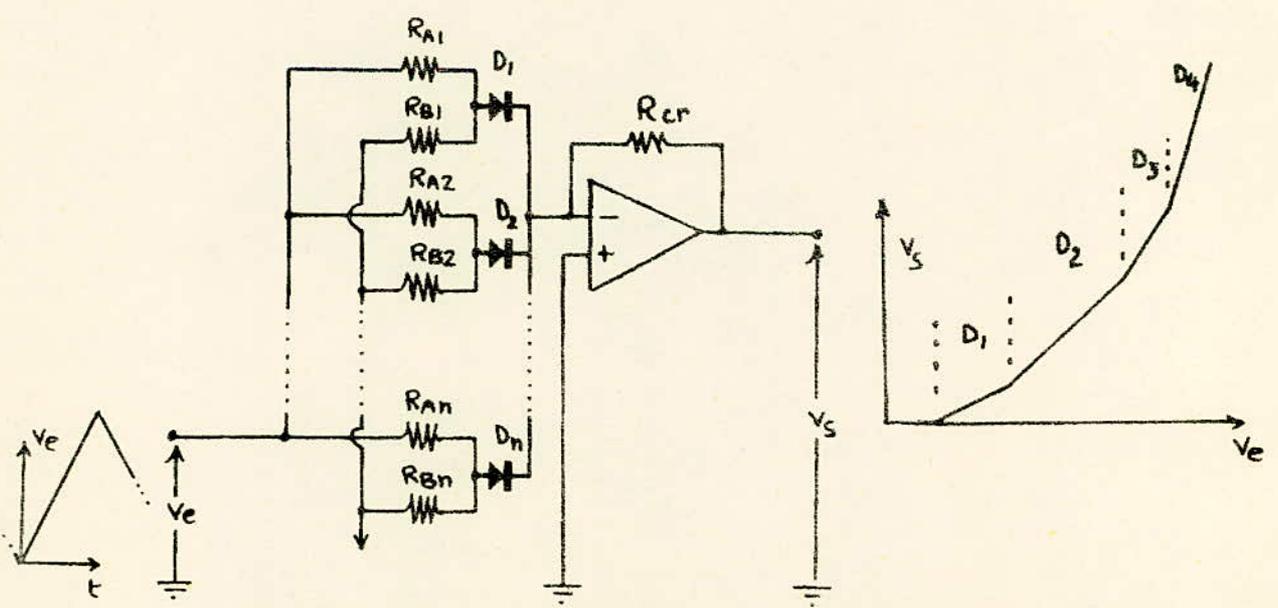


fig i  
Générateur de fonction à diodes.

Dans notre cas, nous avons fait appel à l'amplificateur opérationnel pour réaliser les opérations suivantes :

- L'inversion,
- La sommation,
- La différence,
- L'intégration,
- Le filtrage,
- La génération de fonctions.

C'est la raison pour laquelle nous contenterons de décrire uniquement ces opérations dans la suite.

Dans la pratique on supposera toujours que l'amplificateur opérationnel est idéal c'est-à-dire qu'il est caractérisé par :

- Un gain infini,
- Une impédance d'entrée infinie,
- Une impédance de sortie nulle.

II.3.3.2.2. AMPLI INVERSEUR :

Les figures a donnent les schémas de principes possible d'ampli inverseurs.

La résistance  $\rho$  introduite dans les schémas a2 et a3 est prévue pour limiter les courants de décalage à l'entrée introduits par une dissymétrie des éléments constituant l'ampli opérationnel.

L'ampli donné figure a3 permet d'obtenir des gains importants.

Dans le cas où les amplis utilisés sont idéaux, un calcul élémentaire montre que :

pour les montages a1 et a2

$$G_v = - \frac{R_2}{R_1}$$

et pour le montage a3 :

$$G_v = - \frac{R_2}{R_1 R_4} \left( R_3 + R_4 + \frac{R_3 R_4}{R_2} \right)$$

II.3.3.2.3. AMPLI SOMMATEUR :

La figure b donne le schéma de principe d'un ampli sommateur inverseur.

Dans le cas où l'ampli utilisé est idéal, un calcul élémentaire montre que :

$$V_S = - R_{CR} \left( \frac{V_1}{R_1} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right)$$

.../...

II. 3.3.2.4. AMPLI DE DIFFERENCE :

Le besoin se fait sentir au niveau des comparateurs, d'effectuer la différence entre deux tensions.

Pour atteindre cet objectif, il suffira de monter l'ampli opérationnel suivant le schéma de principe de la figure C.

On montre que dans le cas idéal :

$$V_s = V_2 - V_1$$

$$\text{si } \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_3}{R_4} = 1$$

II.3.3.2.5. INTEGRATEUR :

La figure D1 donne le schéma de principe d'un intégrateur.

La tension de sortie se met sous la forme :

$$V_s = - \frac{1}{RC} \int_0^T V_e dt + V_s(0)$$

$V_s(0)$  étant la tension initiale aux bornes du condensateur.

La relation précédente montre que la tension  $V_s$  dépend de  $V_s(0)$  d'où la nécessité de prévoir un système permettant de fixer la condition initiale avant l'intégration.

La figure D2 donne un schéma possible d'intégrateur permettant de fixer la condition initiale.

II.3.3.2.6. AMPLI DERIVATEUR :

La figure e1 donne le schéma de principe d'un dérivateur.

Dans le cas idéal on pourra montrer que :

$$V_s = - RC \frac{dV_e}{dt}$$

Dans la pratique, du fait de la tendance que ce montage dérivateur à osciller, on associe aux éléments R et C deux éléments de compensation R' et C' montés conformément à la figure e2.

II.3.3.2.7. FILTRES -II. 3.3.2.7.1. INTRODUCTION :

Dans les problèmes d'asservissement on fait souvent appel à des filtres du type :

- Filtre à action proportionnelle et intégrale (PI),
- Filtre à action proportionnelle et dérivée (PD),
- Filtre passe bas.

C'est la raison pour laquelle nous nous proposons de décrire de façon très succincte les schémas permettant d'obtenir de tels filtres.

.../...

II.3.3.2.7.2. FILTRE A ACTION PI :

La figure f donne le schéma de principe d'un filtre à action PI dont la fonction de transfert T (P) s'écrit :

$$T (P) = - \frac{R_2}{R_1} \left( 1 + \frac{1}{R_2 C P} \right)$$

II.3.3.2.7.3. FILTRE A ACTION PD :

La figure g donne le schéma de principe d'un filtre à action PD.

La fonction de transfert T(P) s'écrit :

$$T (P) = - \frac{R_2}{R_1} ( 1 + R_1 C_1 P )$$

II. 3.3.2.7.4. FILTRE PASSE BAS :

Le filtre passe bas s'obtient en réalisant le schéma de principe de la figure h. Dans ce cas, la fonction de transfert T(P) s'écrit :

$$T (P) = - \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + R_2 C P}$$

II.3.3.2.8. GENERATEURS DE FONCTIONS :

En simulation analogique, il est nécessaire de disposer de générateurs de fonctions de formes variées.

La figure i donne un schéma permettant de synthétiser une fonction à l'aide d'un ampli opérationnel associé à des diodes.

On utilise dans ce cas le fait qu'une courbe quelconque peut être obtenue par juxtaposition de segments de droite.

Il y va de soit que la courbe synthétisée sera d'autant plus précise que le nombre de segments de droite est élevé.

Les segments de droite correspondent à une partie de la caractéristique directe des diodes utilisées.

II.3.3.3 : MULTIPLIEUR - DIVISEUR :II.3.3.3.1. : MULTIPLIEUR :

Le multiplieur utilisé est le MC 1595 L dont les caractéristiques et les principes d'utilisation sont donnés par les notes d'applications MOTOROLA.

La figure II.3.3.3.1. qui donne le schéma réel d'un MC 1595 L montre que ce dernier est constitué de quatre amplificateurs différentiels.

Le schéma complet du multiplieur est donné par la figure II.3.3.3.2.  
Ce multiplieur réalise le produit de deux tensions analogiques  $V_x$  et  $V_y$  à un facteur d'échelle près  $K$  :

$$V_o = KV_xV_y$$

$K$  est donné par la relation :

$$K = \frac{R_L}{2R_xR_yI_3}$$

Nous avons choisi :

$$R_x = R_y = 15 \text{ K } \Omega$$

$$R_L = 40 \text{ K } \Omega$$

$$I_3 = 1 \text{ mA}$$

Ce qui donne :

$$K \approx \frac{1}{10}$$

Précisons que ce multiplieur présente :

- a) Une excellente linéarité
  - 2 % d'erreur maximale à l'entrée  $x$
  - 4 % d'erreur maximale à l'entrée  $y$
- b) Une excellente stabilité vis à vis de la température.
- c) Une bande passante à - 3db de l'ordre de 1 MHz.
- d) Quatre potentiomètres permettant le réglage :
  - de la tension d'offset à l'entrée  $x$ ,
  - de la tension d'offset à l'entrée  $y$ ,
  - de la tension d'offset à la sortie,
  - du facteur d'échelle  $K$ .

#### II.3.3.3.2. DIVISEUR :

La division est obtenue en plaçant le multiplieur (MC1595L) en contre réaction sur un ampli opérationnel.

La figure II.3.3.3.3. donne le schéma de principe du diviseur utilisé.

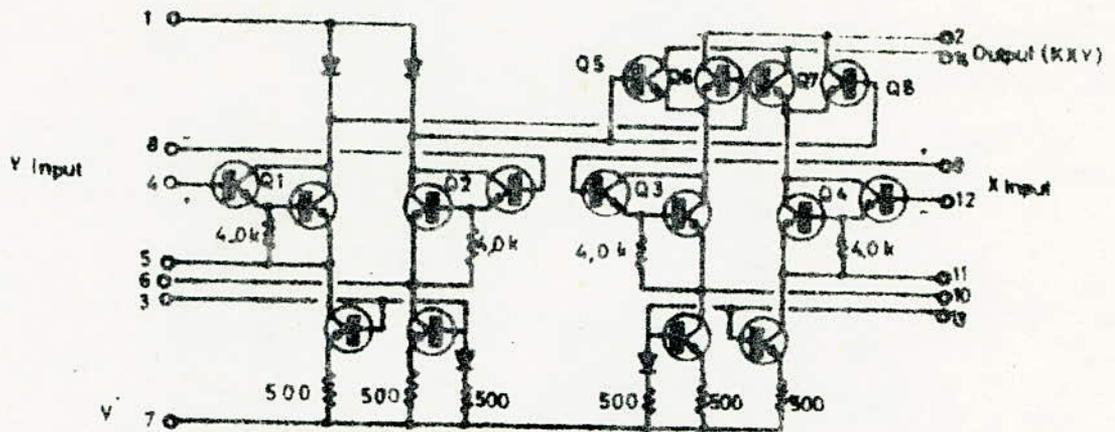
Comme l'amplificateur opérationnel est supposé idéal, son entrée inverseuse, sera une masse virtuelle. Nous pourrons donc écrire :

$$-\frac{V_z}{R_2} = + \frac{KV_xV_y}{R_1}$$

ou encore :

$$V_y = - \frac{R_1}{KR_2} \frac{V_z}{V_x}$$

.../...



SCHEMA REEL DU MULTIPLICATEUR MC 1595  
FIG. II.3.3.3.A

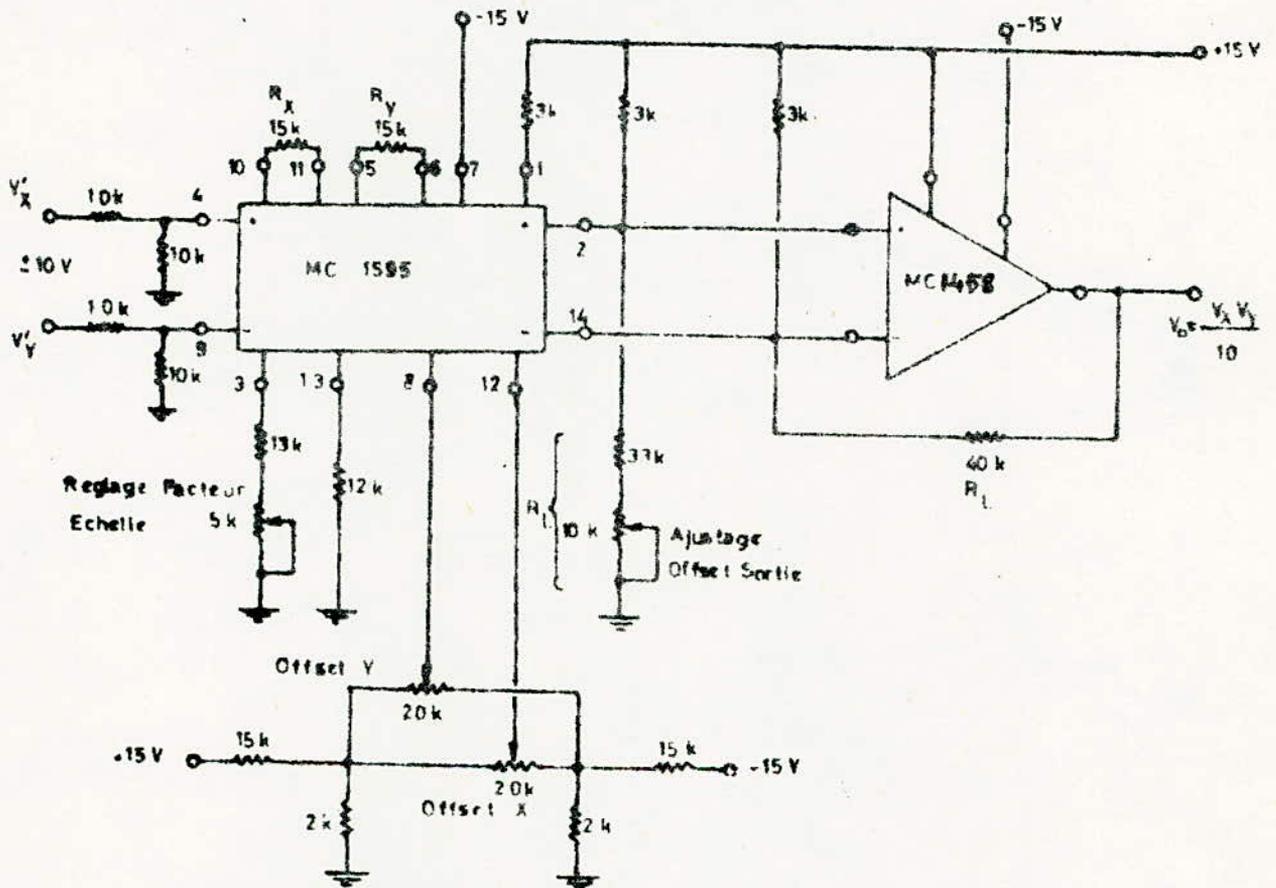
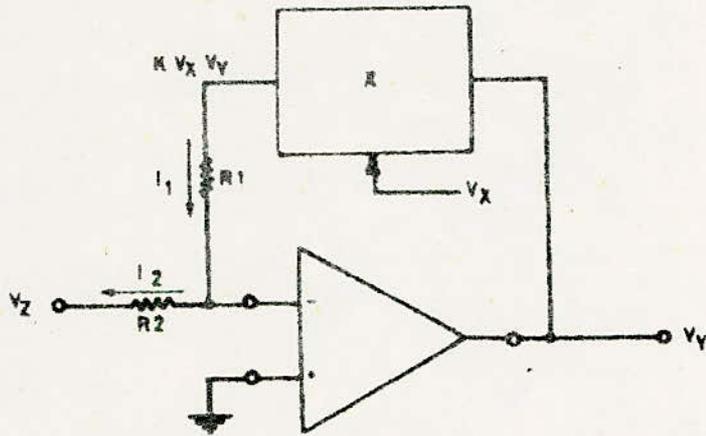


FIG. II.3.3.32: Schéma de montage complet du multiplieur.



SCHEMA DE BASE D'UN CIRCUIT DIVISEUR

FIG. II.3.3.3

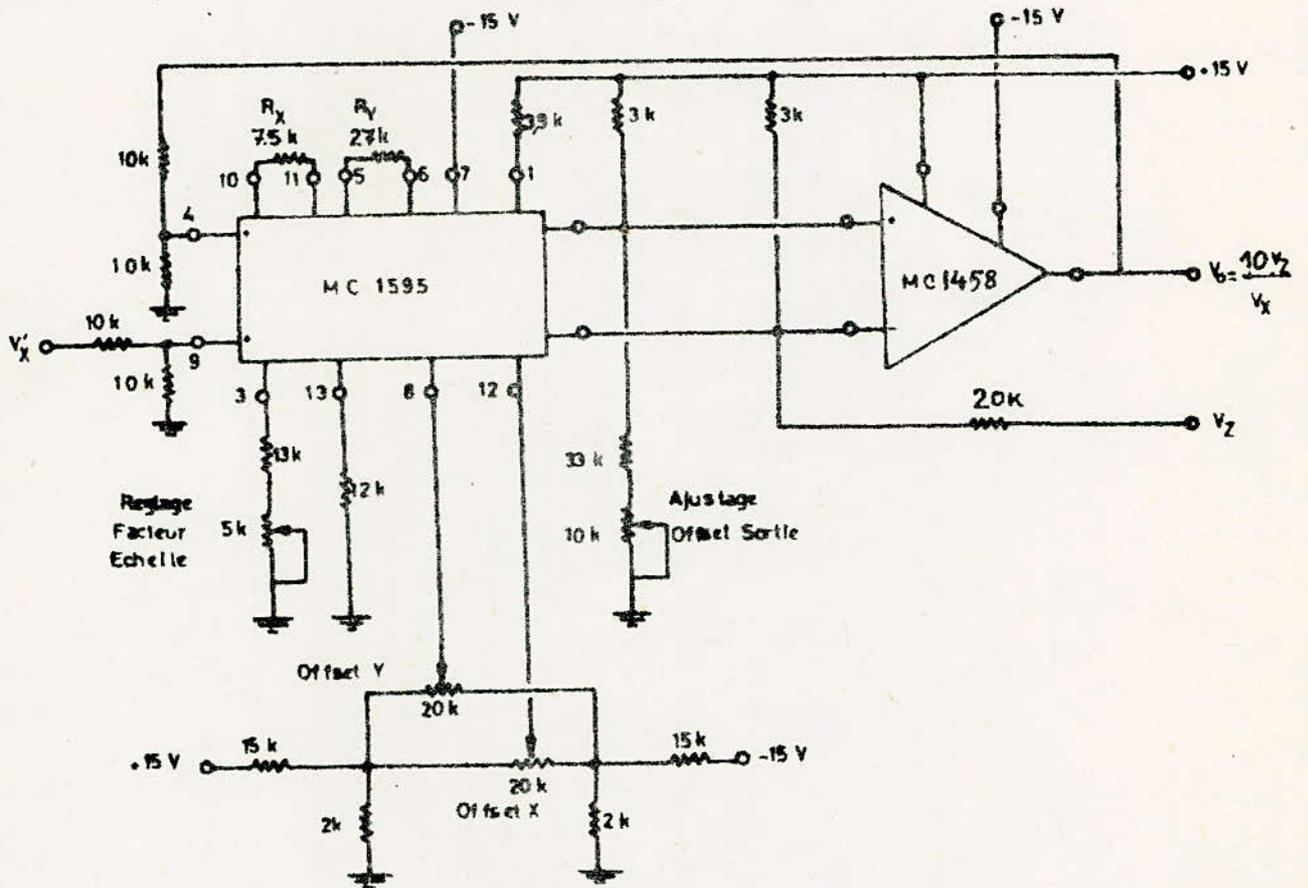


FIG II.3.3.34: Schéma de montage complet du diviseur.

Ce qui donne :

$$V_Y = - \frac{V_Z}{V_X}$$

Si  $R_1 = KR_2$

On obtient ainsi le rapport des tensions  $V_Y$  et  $V_X$  au signe près.

Un étage changeur de signe permet de rétablir le signe.

Le schéma électronique du diviseur est donné par la figure II.3.3.3.4.

#### II.3.4. RESOLUTIONS D'EQUATIONS DIFFERENTIELLES :

##### II.3.4.1. INTRODUCTION :

Dans un calculateur analogique, il est généralement nécessaire de disposer de circuits permettant de résoudre des équations ainsi que des systèmes d'équations différentielles.

Nous nous proposons de décrire dans la suite :

- Un montage permettant de résoudre une équation différentielle du second ordre à coefficient constant.
- Un montage permettant de résoudre un système d'équations du premier ordre couplées.

##### II. 3.4.2. : RESOLUTION D'UNE EQUATION DIFFERENTIELLE DU SECOND ORDRE :

La figure II.3.1. permet de résoudre une équation différentielle du second ordre du type :

$$\frac{d^2S(t)}{dt^2} + 2 \zeta \omega_0 \frac{dS(t)}{dt} + \omega_0^2 S(t) = \omega_0^2 S(t)$$

expression dans laquelle  $\omega_0$  et  $\zeta$  sont respectivement la fréquence propre et le coefficient d'amortissement du système.

Le principe utilisé pour la résolution consiste, à partir de la dérivée d'ordre le plus élevée soit  $\frac{d^2S(t)}{dt^2}$  pour obtenir par deux intégrations successives  $\frac{dS(t)}{dt}$  et  $S(t)$ .

Ces deux grandeurs, une fois multipliées par des coefficients appropriés sont sommées avec le second membre.

La sortie du sommateur précédent est bouclée au niveau du point où est disponible l'information  $\ddot{S}(t)$ .

On notera au passage que les deux intégrateurs sont munis de circuits permettant de fixer les conditions initiales.

.../...

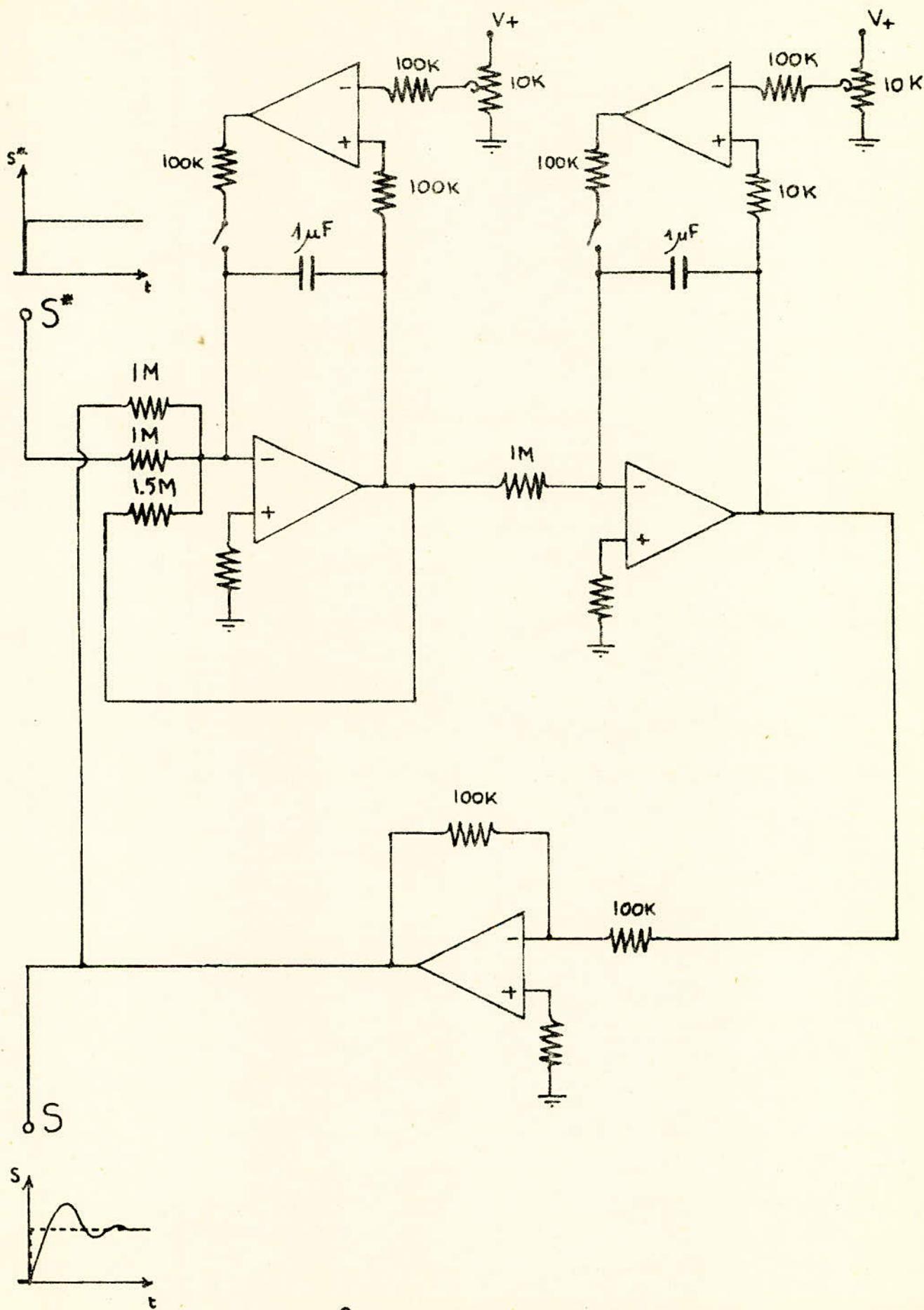


Fig II.3.1: Simulation des vannes dans les B.L.

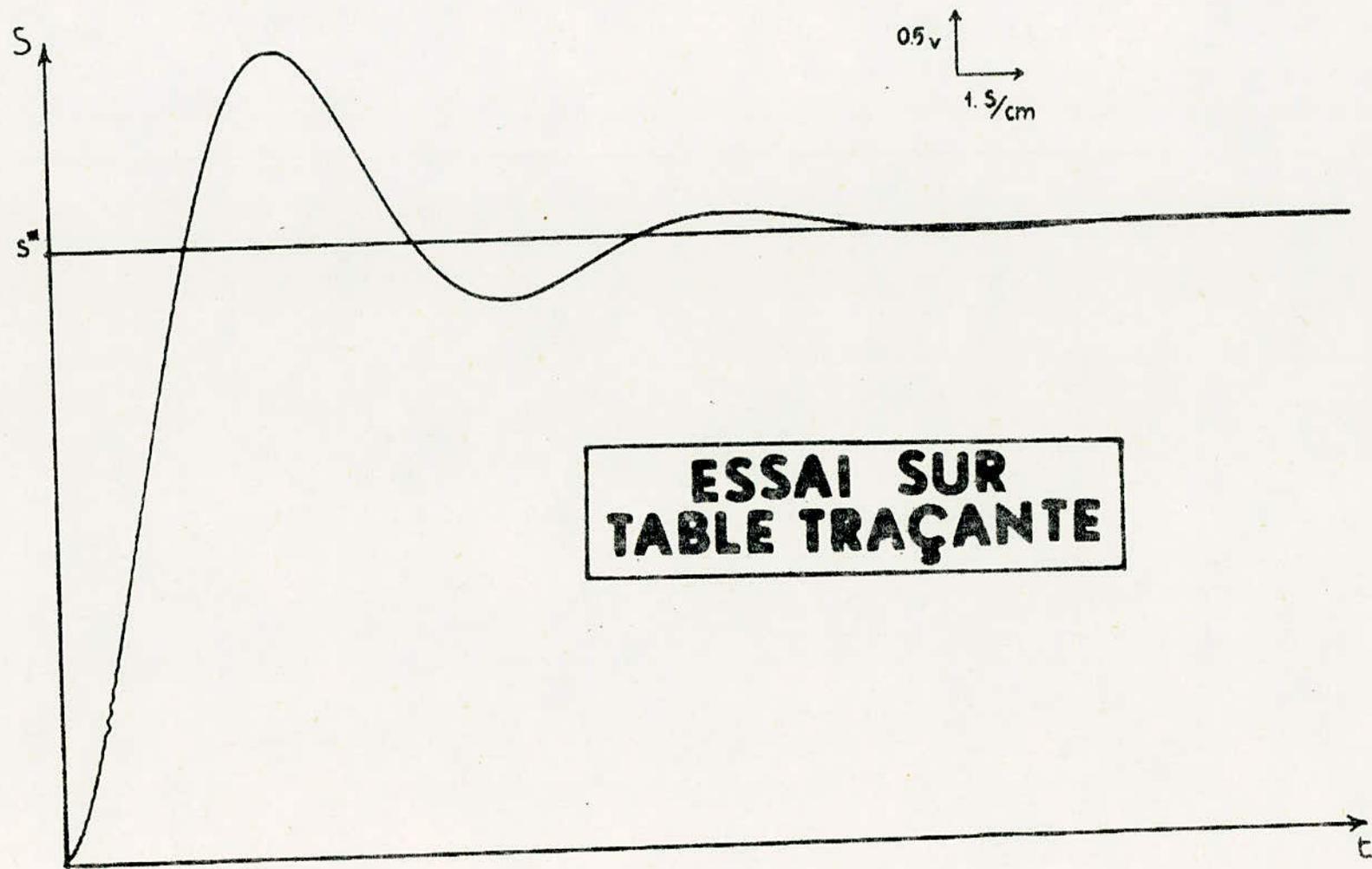


Fig II.3.1.E: REPONSE DU CIRCUIT SIMULANT LES VANNES  
DES BARRES LIQUIDES A UNE DEMANDE D'OUVERTURE  
DE 50%.

II.3.4.3 : RESOLUTION DE SYSTEMES D'EQUATIONS DIFFERENTIELLES COUPLEES :

Dans le cadre de notre travail, nous avons été amené à résoudre le système d'équations différentielles suivant :

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\Delta P(t) \cdot n(t)}{1} - \frac{B}{1} n(t) + \lambda c(t)$$

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{B}{1} n(t) - \lambda c(t)$$

La définition des paramètres est donnée au paragraphe II.2.2.2.2..

La figure II.3.1' donne le schéma permettant la résolution du système précédent.

Le principe exposé au paragraphe précédent nous permet de comprendre facilement le fonctionnement d'un tel ensemble.

On notera au passage l'utilisation d'un multiplieur destiné à effectuer le produit des deux variables que sont  $Wn(t)$  et  $c(t)$ .

II.3.5. : REALISATION PRATIQUE :

Dans le cadre du travail que nous nous sommes fixés, nous avons été amenés à réaliser :

- un circuit permettant de résoudre une équation différentielle du second ordre,

Cette équation est prévue pour simuler l'ouverture  $S(t)$  d'une vanne sous l'effet d'un signal de commande  $S^*(t)$ .

L'étude de la dynamique de la vanne est utilisée dans le système de contrôle de la réactivité par les barres liquides comme il a été précisé au paragraphe II.2.2.2.3.

- un circuit permettant de résoudre les équations de la cinétique.
- un circuit permettant de simuler le contrôle de la réactivité par les barres liquides.
- un circuit permettant de simuler le contrôle de niveau dans les générateurs de vapeur.
- un circuit permettant de simuler le contrôle de pression à la sortie des générateurs de vapeur.

...../....

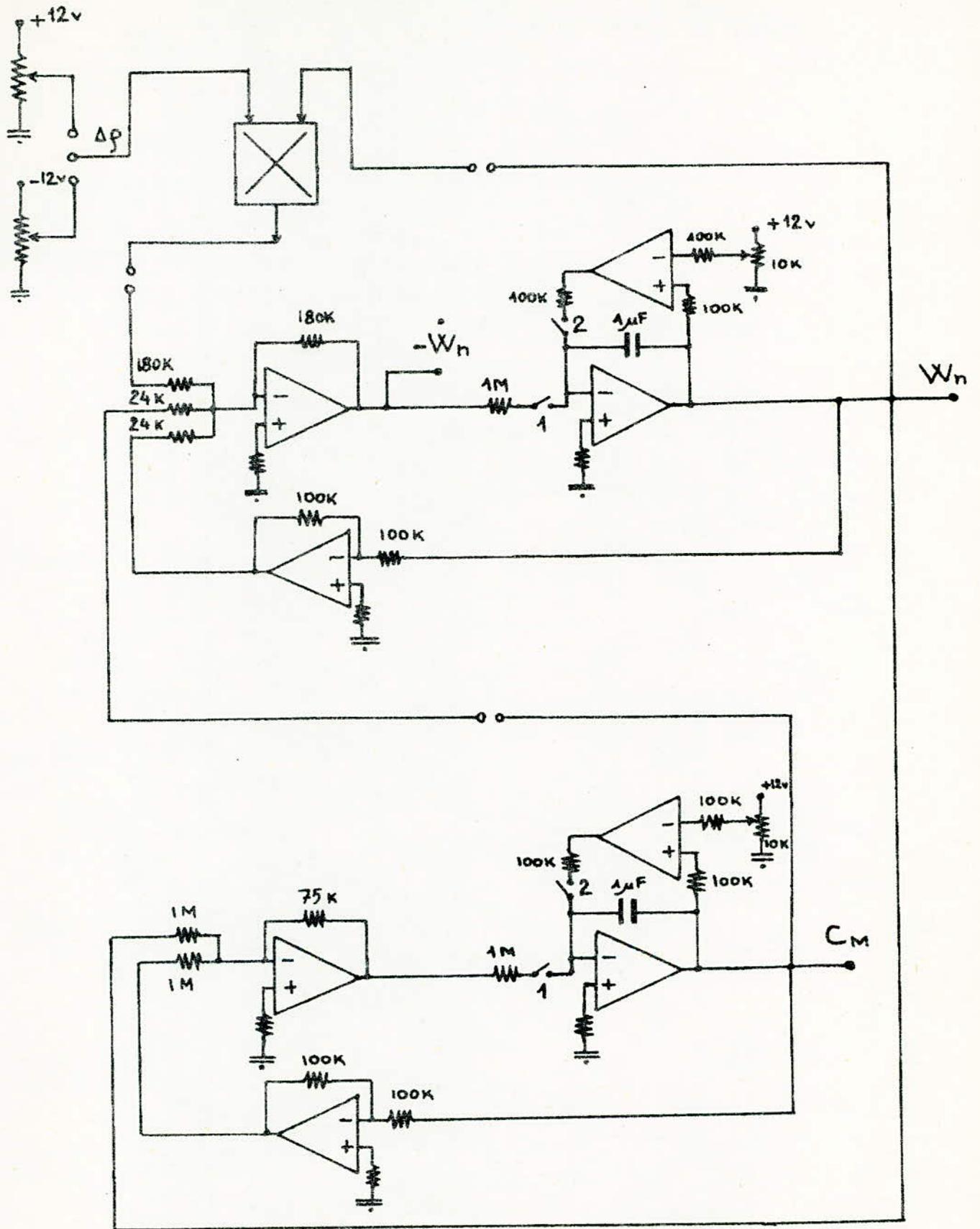


fig II.3.1: Schéma simulant la cinétique du réacteur.

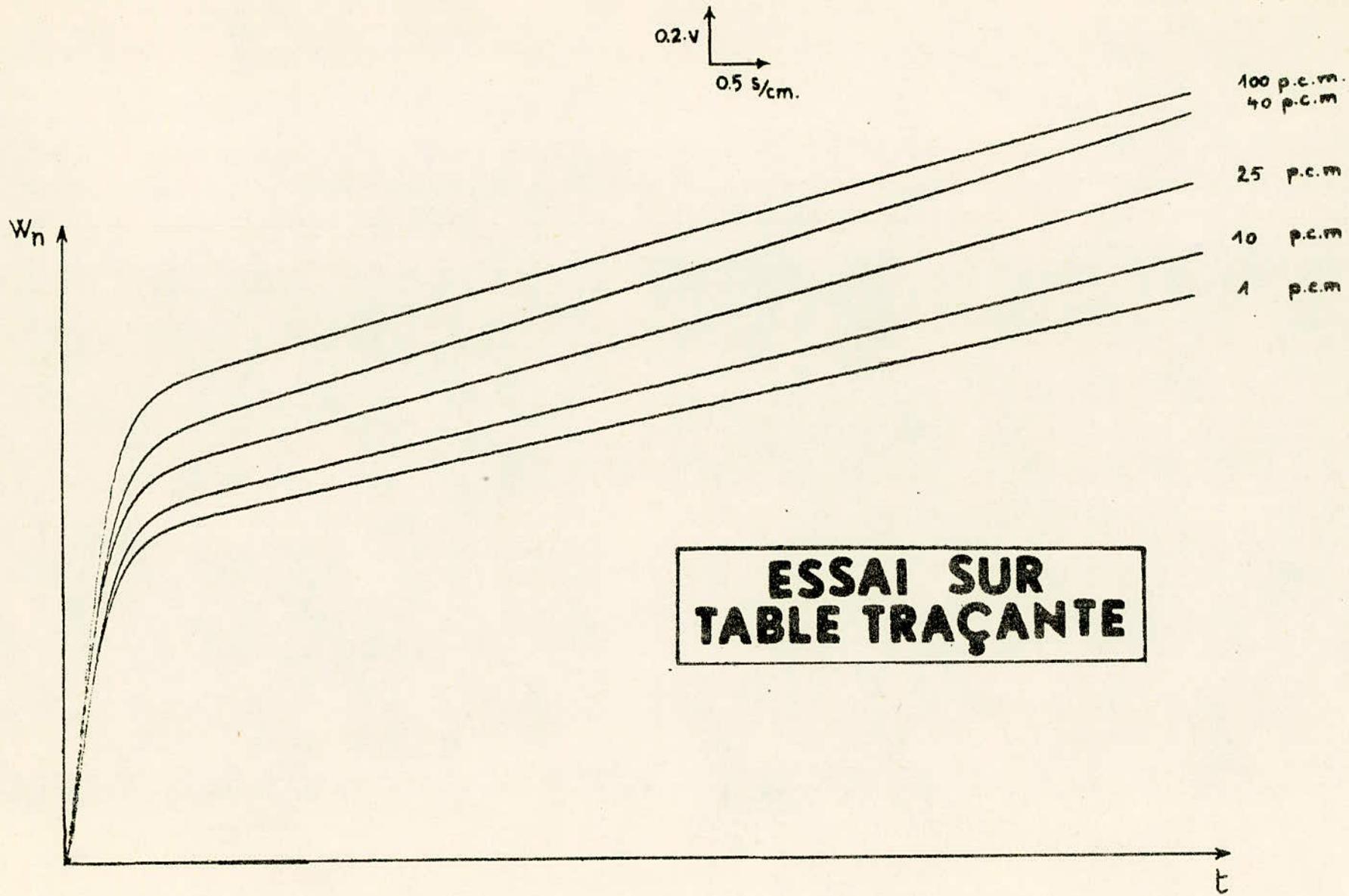


Fig II.31.E<sub>1</sub>: Cinétique du réacteur : Evolution de la puissance neutronique, en regime surcritique

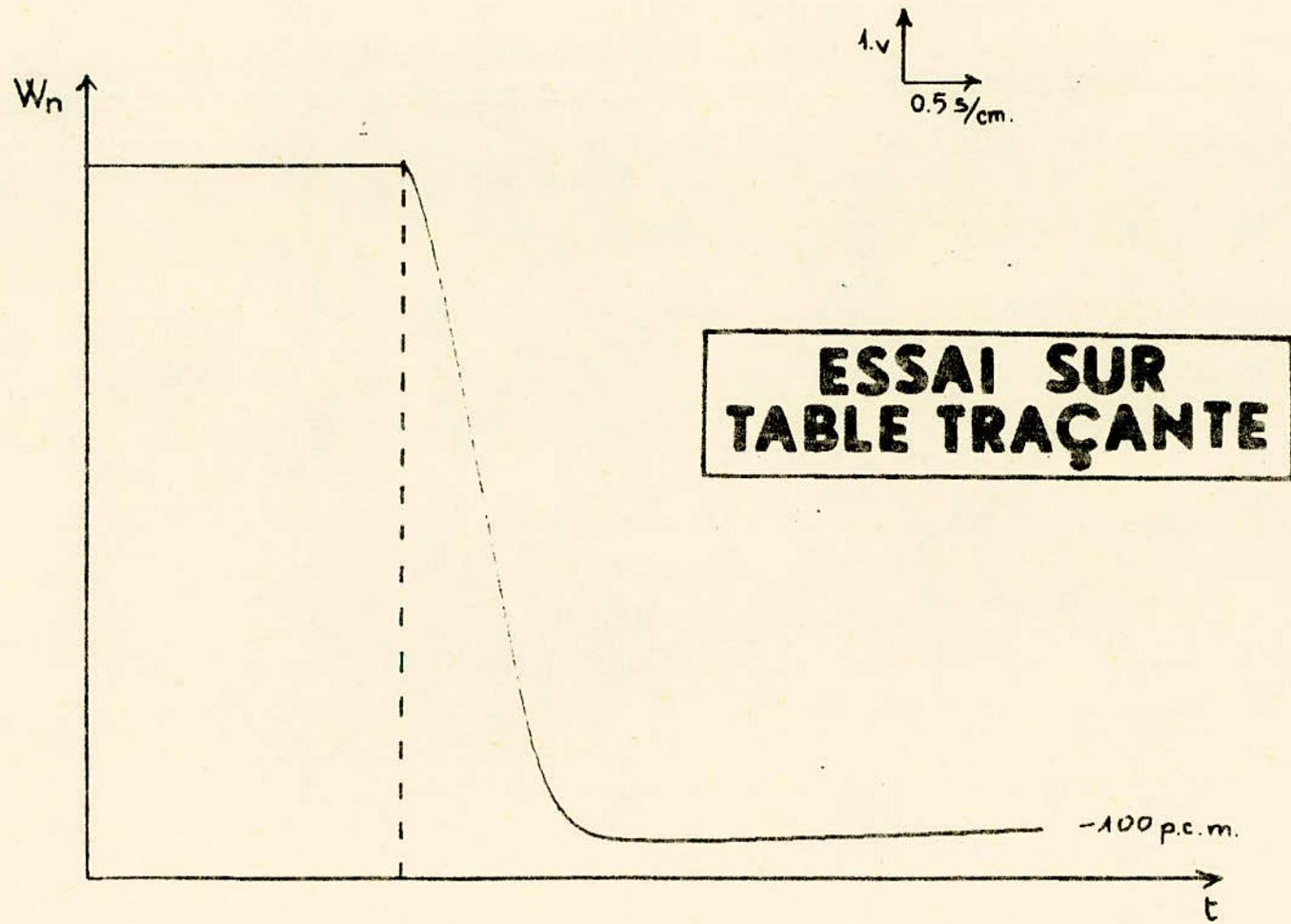


Fig: II.3.1'.E<sub>2</sub>: Cinétique du réacteur: Evolution de la puissance neutronique en regime sous-critique.

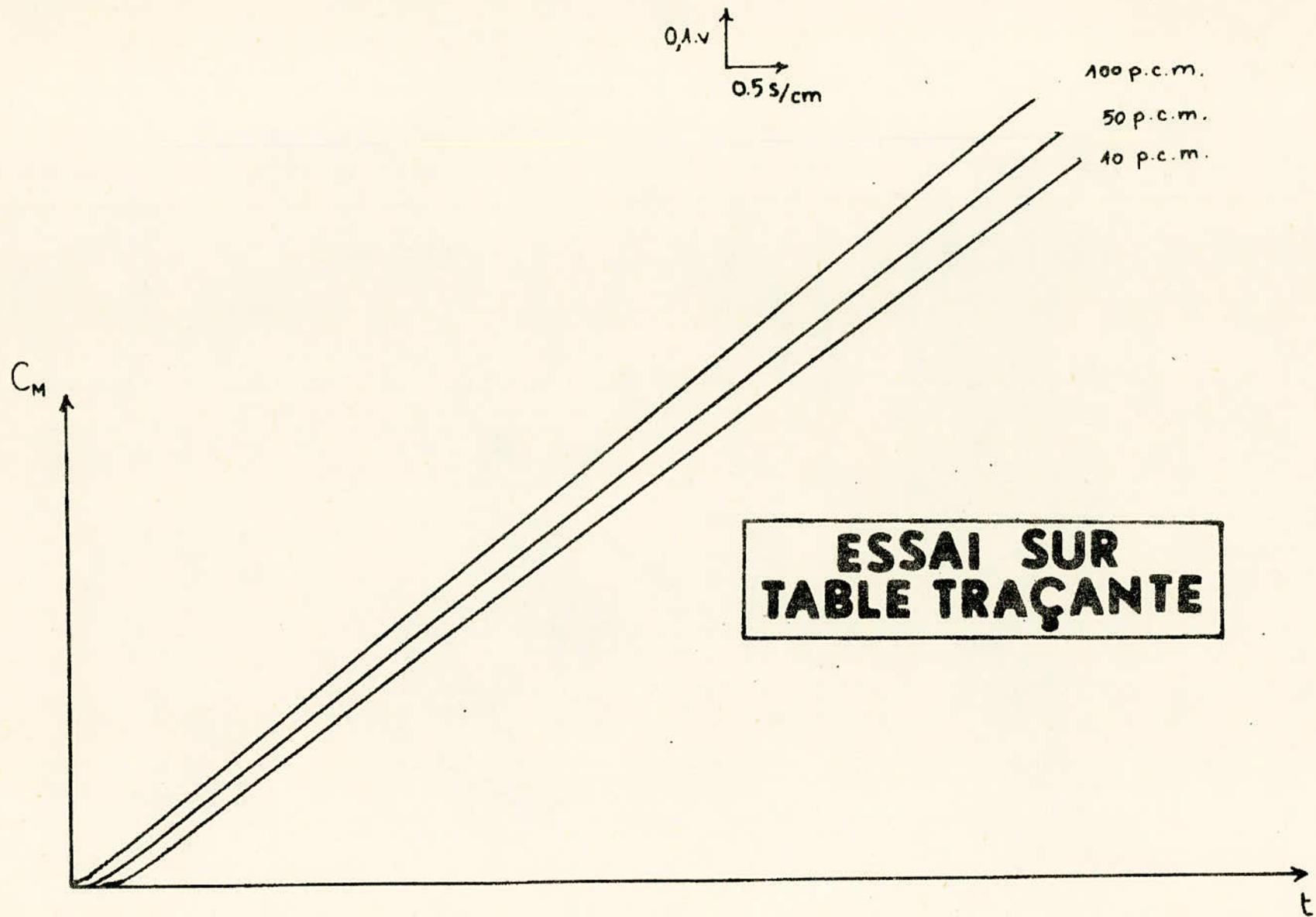


Fig: II.3.1'E<sub>3</sub>: Cinétique du réacteur: Evolution de la concentration en précurseurs en régime surcritique.

Etant donné que l'ensemble des circuits précédemment inventoriés font appel à des générateurs de fonctions, nous avons préféré et ce, pour des raisons de clarté de l'exposé commencé par présenter l'ensemble des générateurs de fonctions réalisés avant de passer à la description des schémas d'ensemble.

Pour ne pas alourdir la présentation, nous avons préféré donner les schémas de principe associés aux résultats obtenus lors des tests.

Nous présenterons en fin de ce document le schéma de principe de l'alimentation réalisée.

Comme nous l'avons précisé au paragraphe II.3.2.2., nous rappelons que toute simulation analogique nécessite le choix d'un facteur d'échelle grandeur qui est associée à la valeur maximale de la grandeur physique étudiée.

Le facteur d'échelle a été choisi en tenant compte des valeurs maximales des paramètres étudiés fixées dans le tableau suivant:

VARIABLE	SYMBOLE	VALEUR MAXIMALE
Réactivité .....	$\Delta\rho(t)$	100 pcm.
Réactivité de perturbation ..	$\Delta\rho_E(t)$	100 pcm.
Réactivité des B.L. ....	$\Delta\rho_z(t)$	670 pcm.
Réactivité des B.S. ....	$\Delta\rho_s(t)$	1000 pcm.
Réactivité des B.C. ....	$\Delta\rho_c(t)$	1500 pcm.
Réactivité de rétroaction .....	$\Delta\rho_f(t)$	400 pcm.
Flux neutronique .....	$n(t)$	2 neutrons / cm <sup>3</sup>
Taux de variation du flux neutronique ..	$dn(t)/dt$	2,5 neutrons / cm <sup>3</sup>
Concentration en précurseurs .....	$C(t)$	200 Précurseurs / cm <sup>3</sup>
Taux de variation de la concentration en précurseurs. ....	$dC(t)/dt$	2 précurseurs/cm <sup>3</sup> .sec.
Taux de variation de la réactivité de régulation .....	$d\Delta\rho_z(t)/dt$	140 pcm. / sec.
Taux de variation de la réactivité des BS	$d\Delta\rho_s(t)/dt$	11 pcm / sec.
Taux de variation de la réactivité des BC	$d\Delta\rho_c(t)/dt$	8 pcm / sec.
Ecart de puissance .....	$ E_p(t) $	10 %
Ouverture des vannes des BL. ....	$S(t)$	100 %
Ecart de pression .....	$\Delta P$	500 Kpa.
Pression dans le condenseur .....	$P_{con}$	25 Kpa.
Ouverture des soupapes de sécurité .....		100 %
Ouverture des ASDV et des CSDV .....		100 %
Puissance .....	$W$	120 %
Niveau dans le G.V. ....	$N_c, N_m$	1,5 m.
Débit de vapeur .....	$Q_v$	100 %
Débit d'eau alimentaire .....	$Q_{EA}$	100 %
Ouverture de la vanne commandant le débit d'eau alimentaire .....	$Y$	100 %

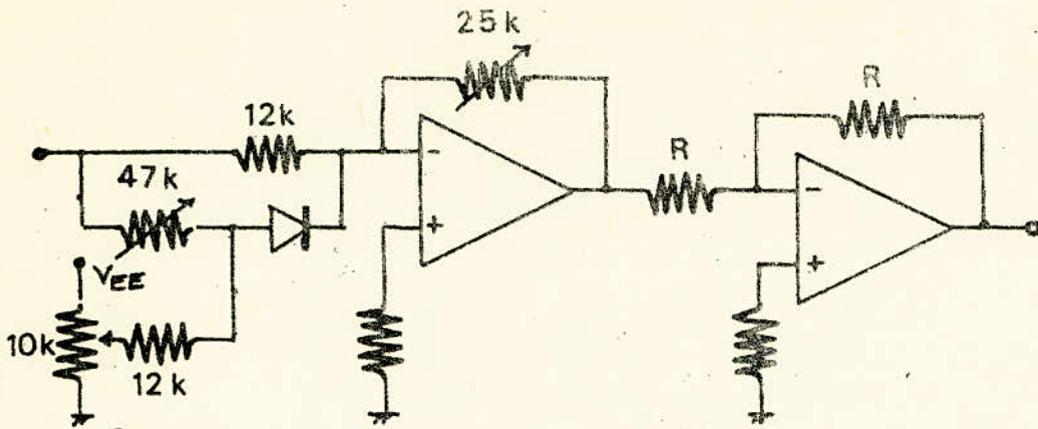


fig 1.a:  
CORRELATEUR

donnant la puissance transmise au G.V  
WG en fonction de la puissance  
neutronique retardée WNR

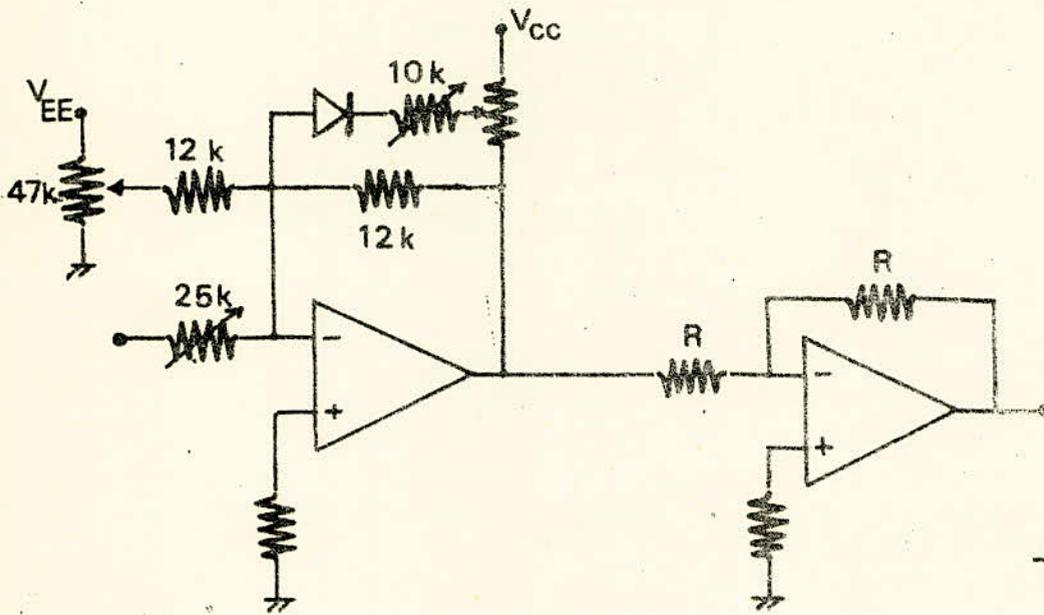
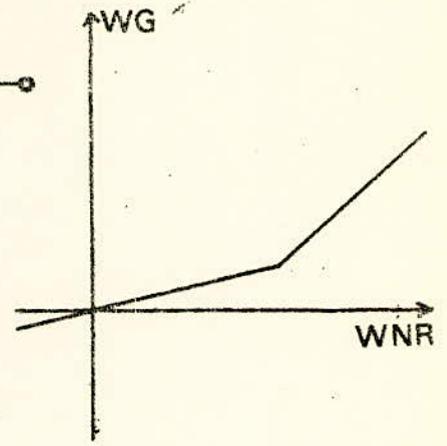
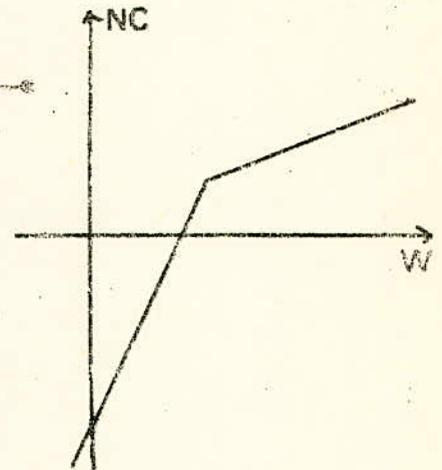


fig 2.a:

programme de niveau de consigne NC  
en fonction de la puissance transmise  
au regulateur W



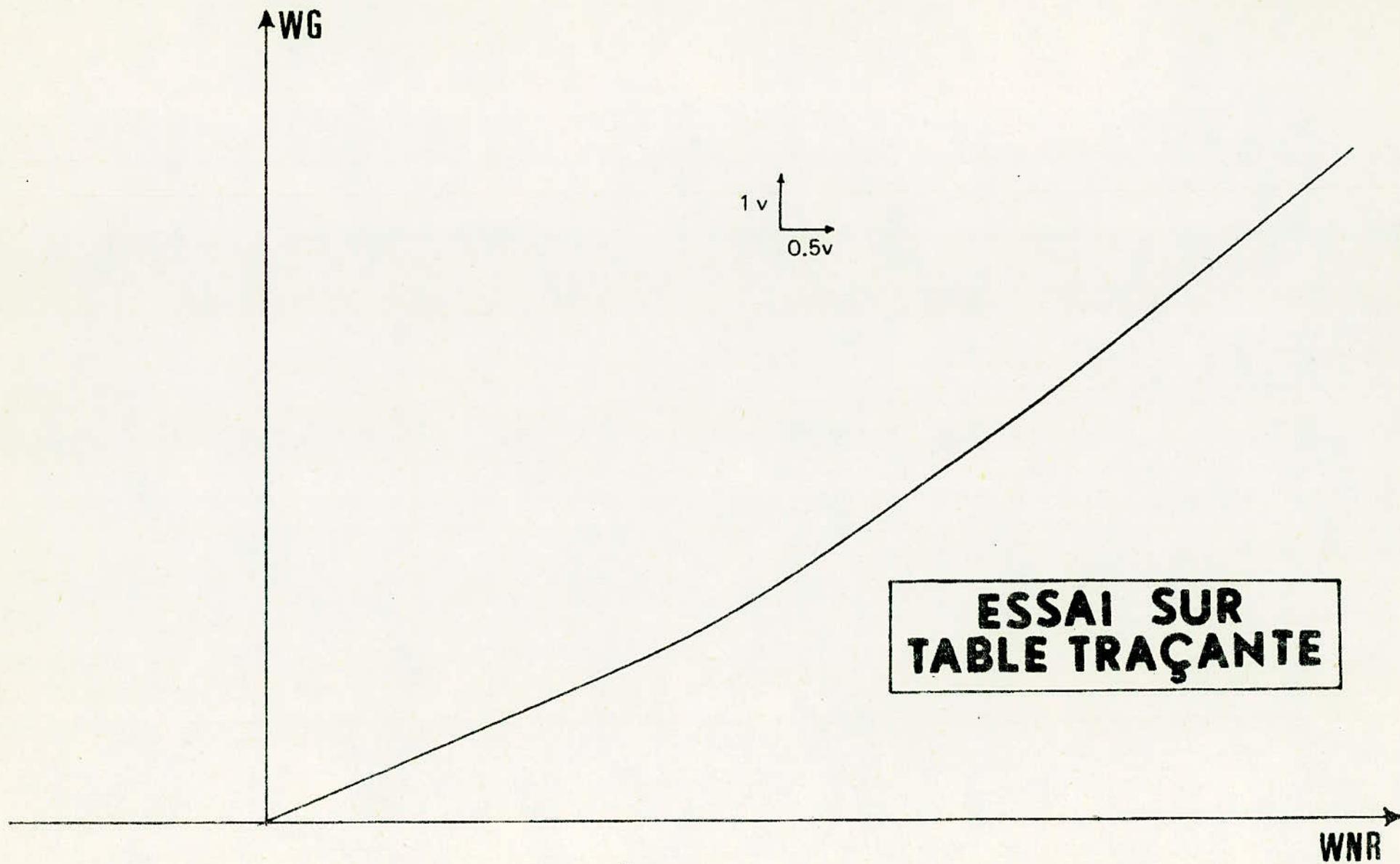


fig 1.b

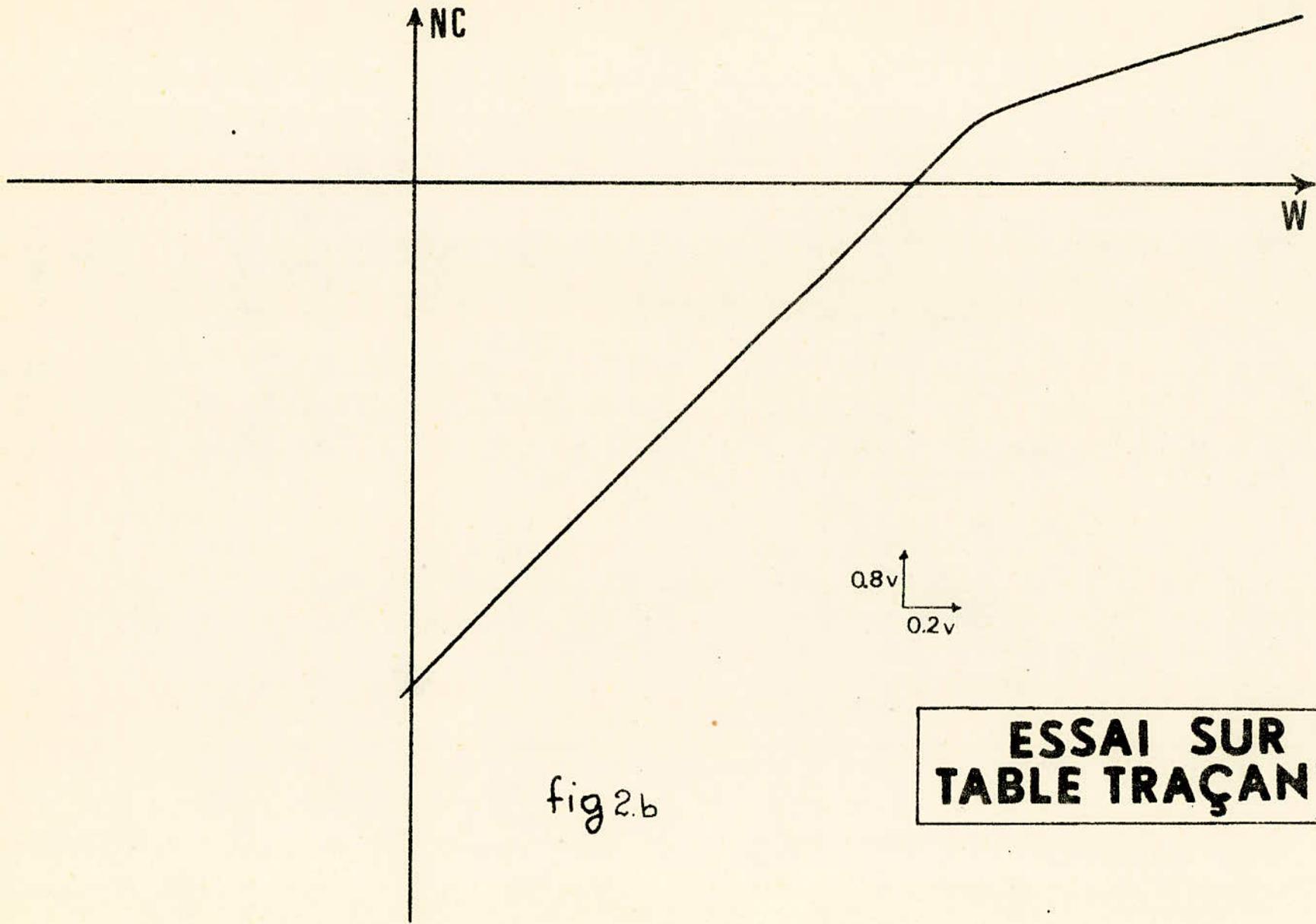


fig 2.b

**ESSAI SUR  
TABLE TRAÇANTE**

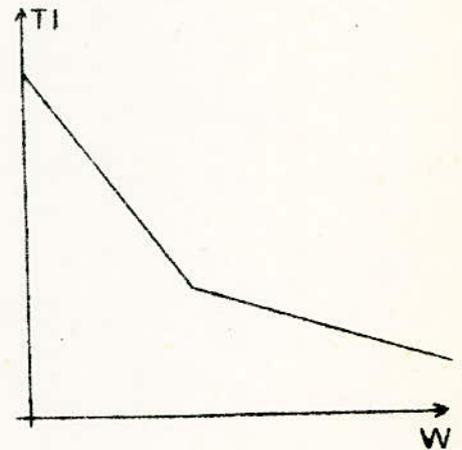
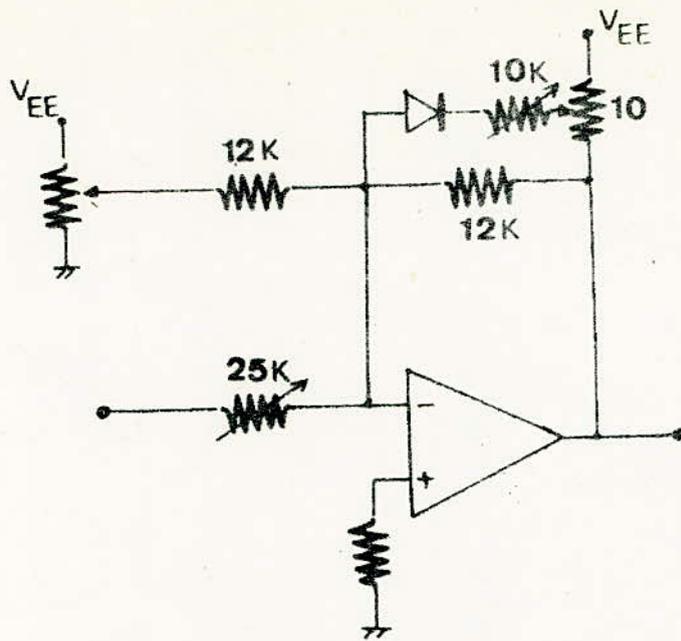


fig 3a: constante d'intégration  $TI$  fonction de  $W$

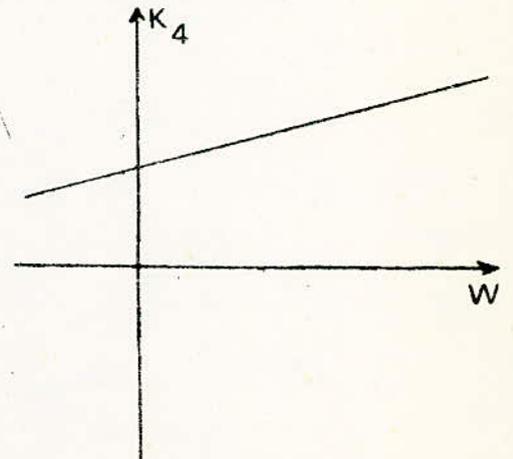
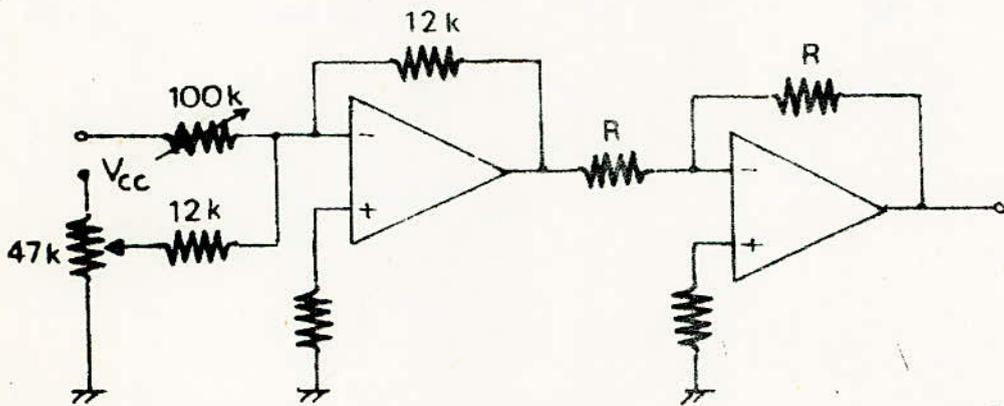


fig 4.a:  $K_4$  fonction linéaire de  $W$

**ESSAI SUR  
TABLE TRAÇANTE**

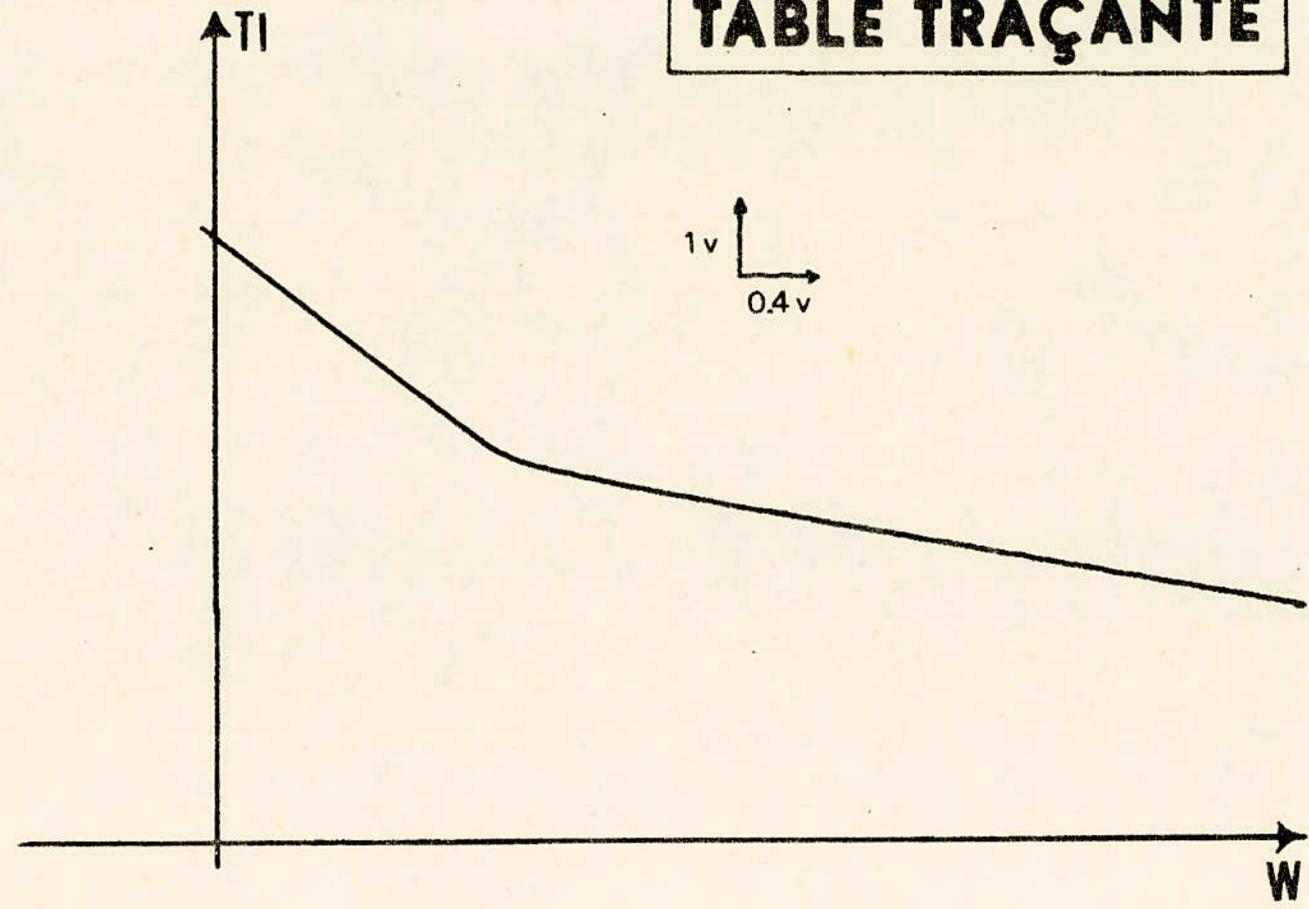


fig 3.b.

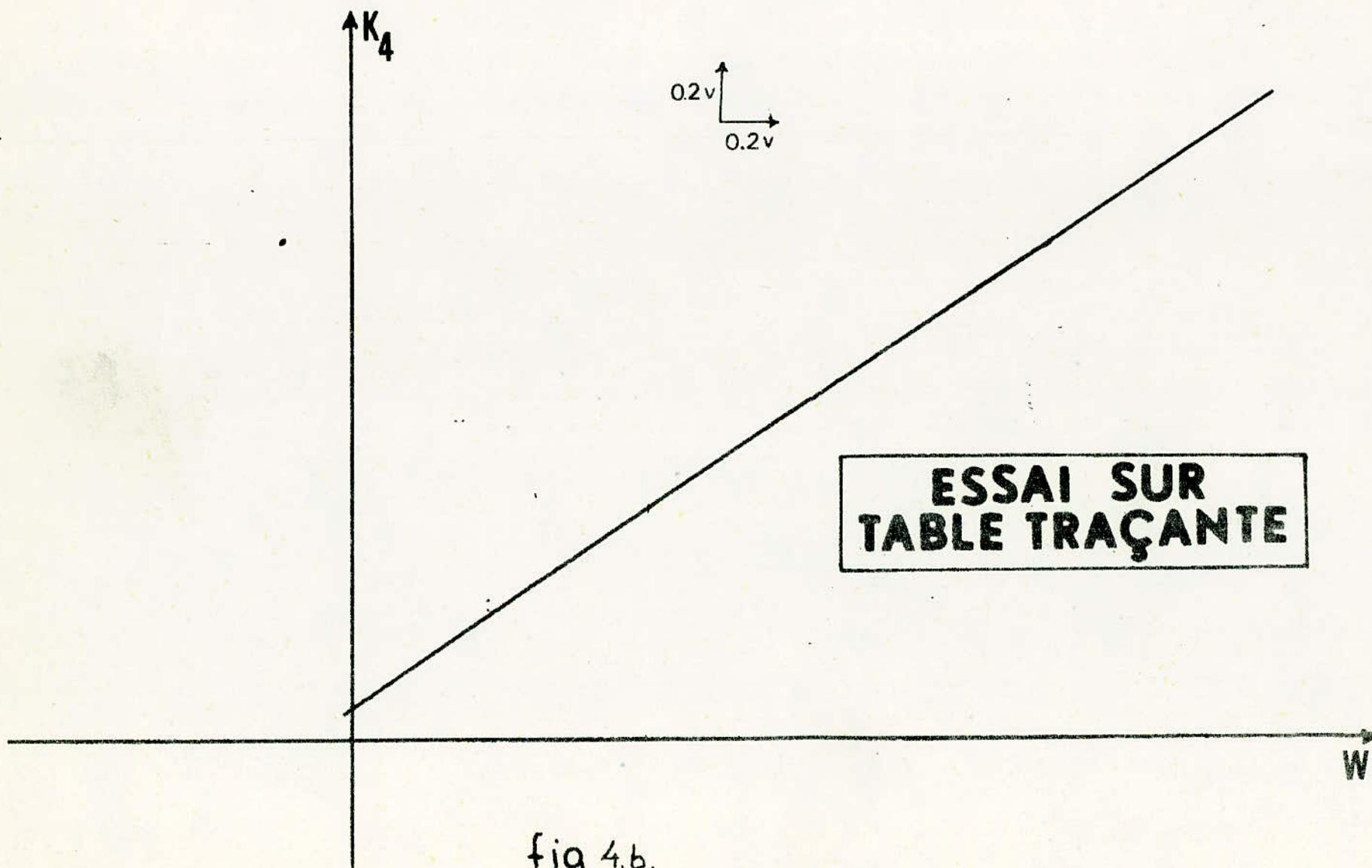


fig 4.b.

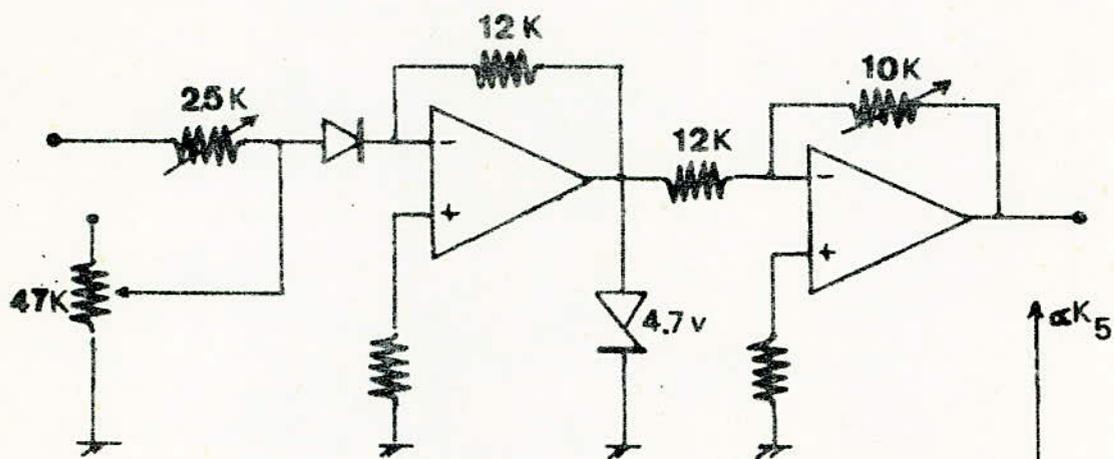


fig 5.a:  $\propto K_5$  fonction du débit de vapeur QV

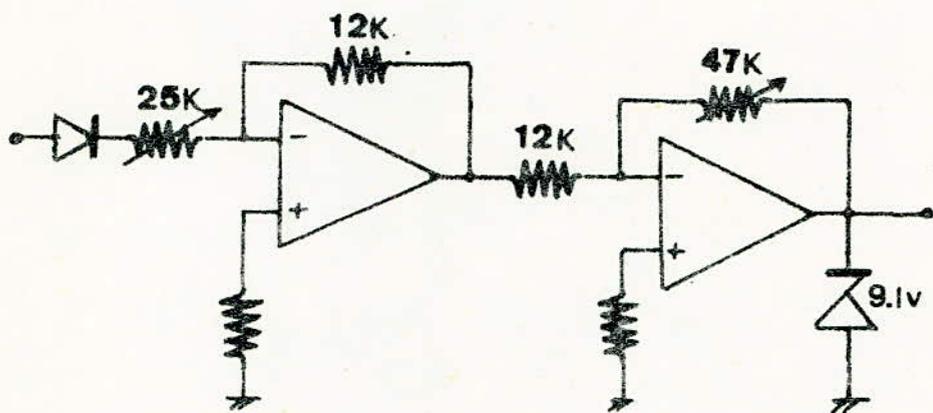
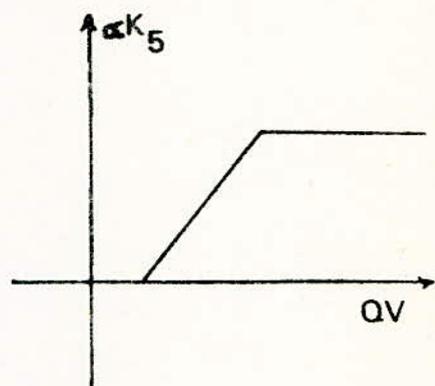
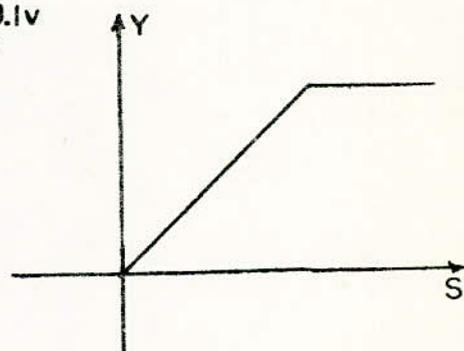


fig 6.a: signal de commande appliqué au régulateur  $Y = f(S)$



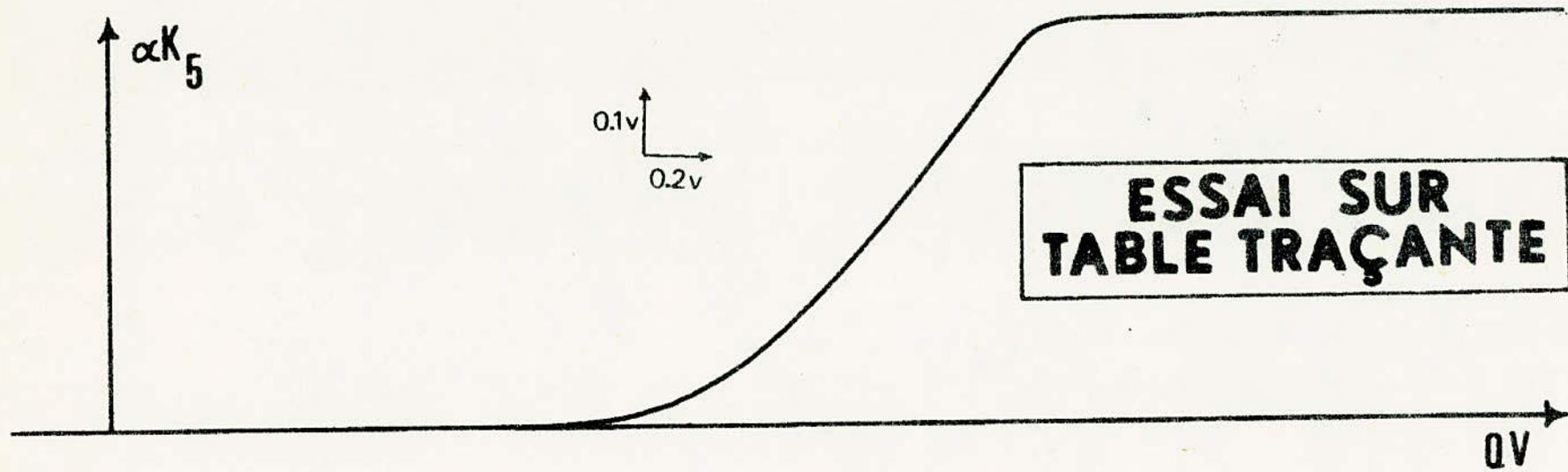


fig 5.b.

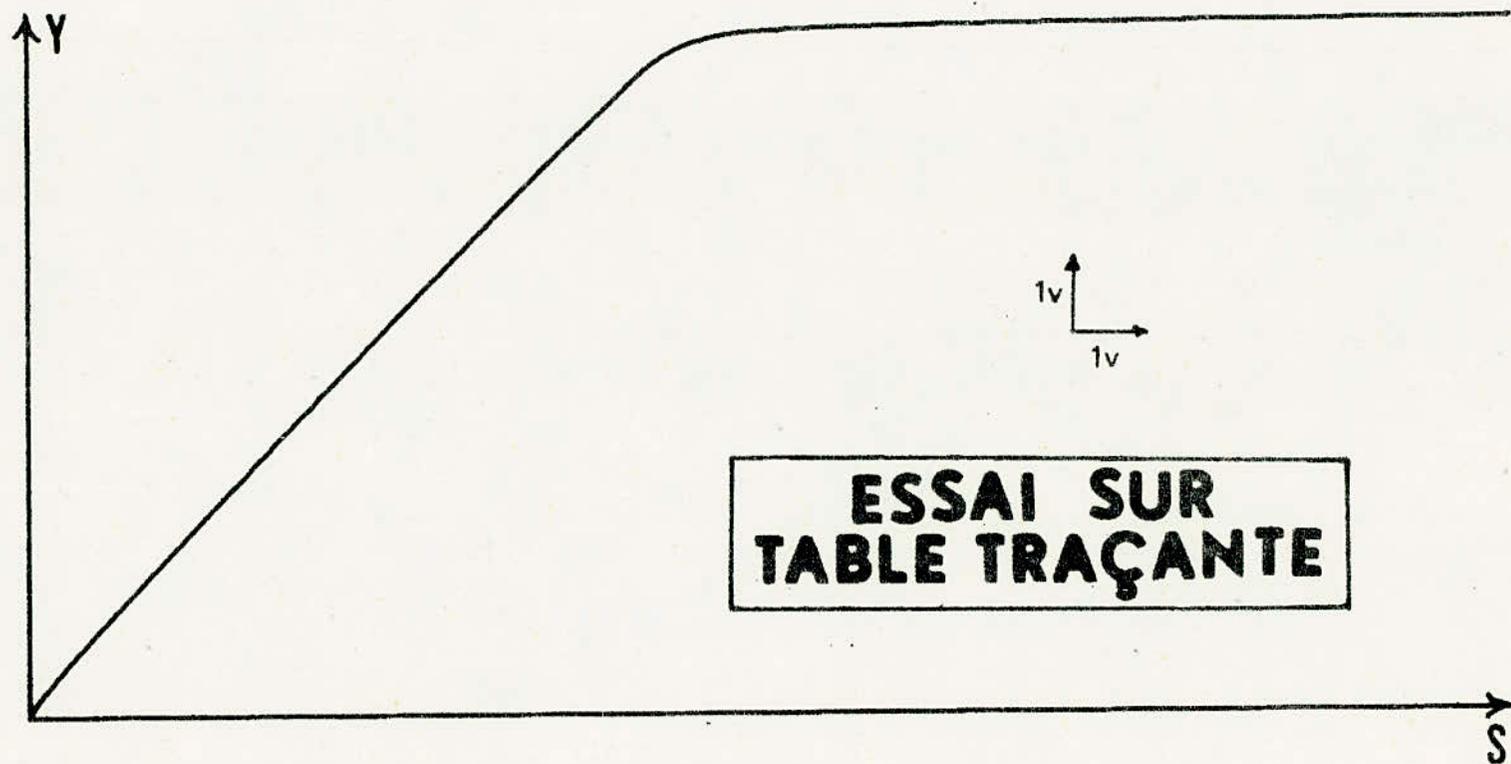


fig 6.b.

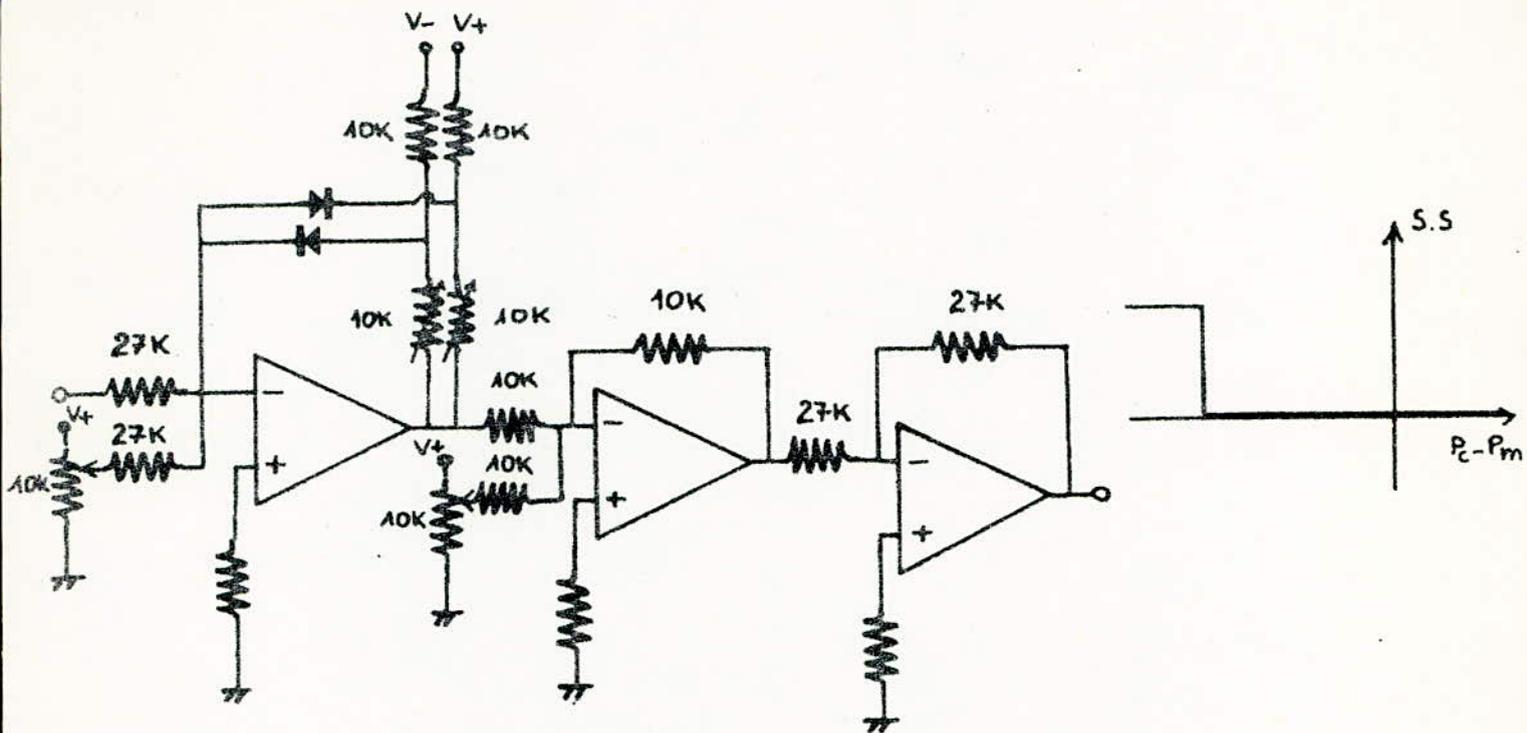


fig 7.a: Signal commandant l'ouverture des soupapes de sécurité.

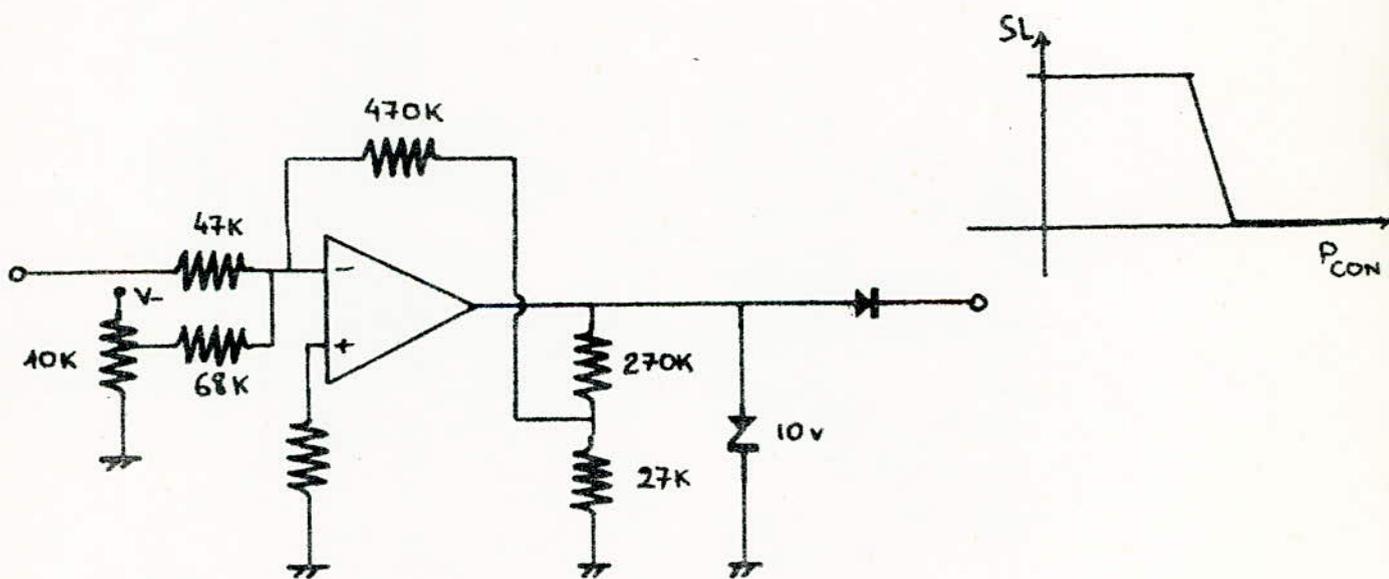


fig 8.a: Programme liant la limite d'ouverture des vannes CSDV à la pression qui règne dans le condenseur.

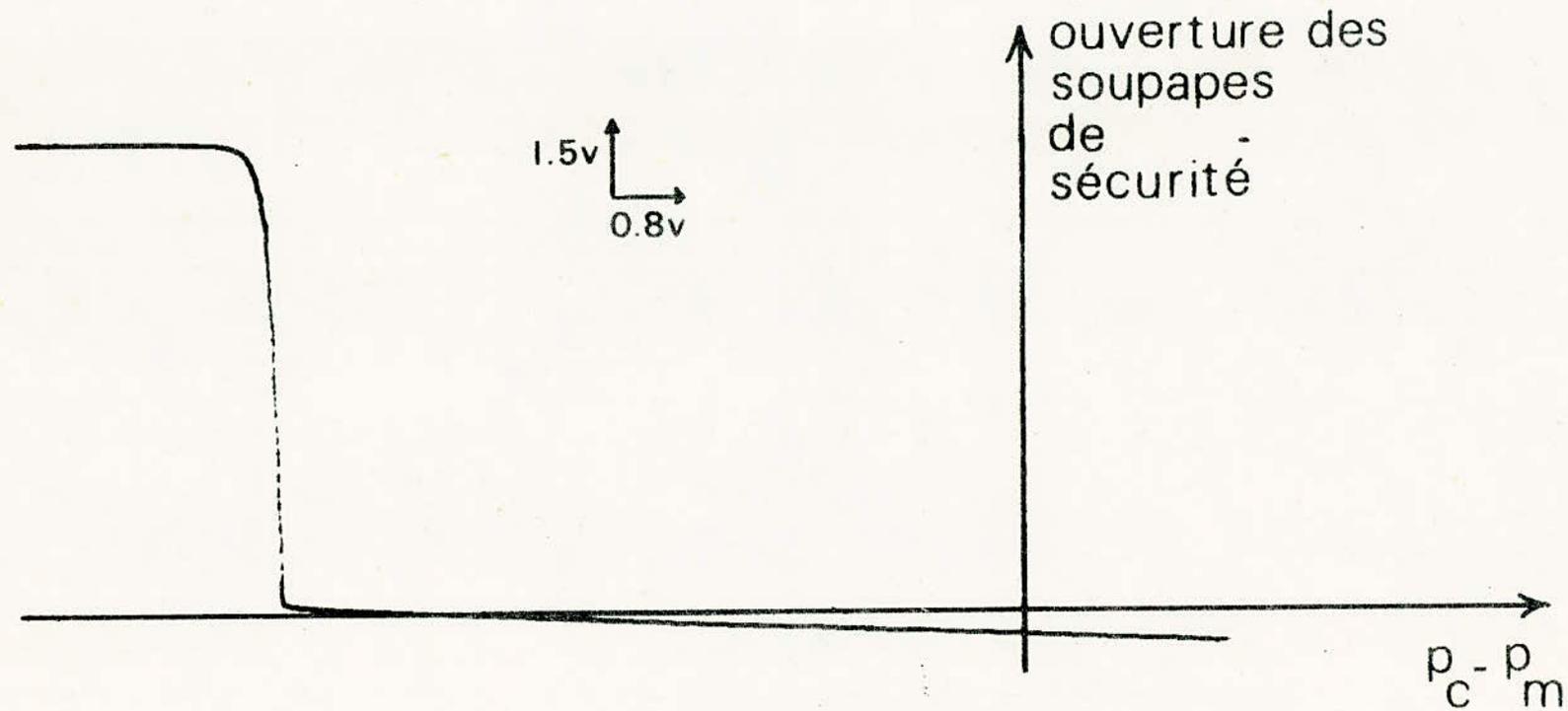


fig 7.b.

**ESSAI SUR  
TABLE TRAÇANTE**

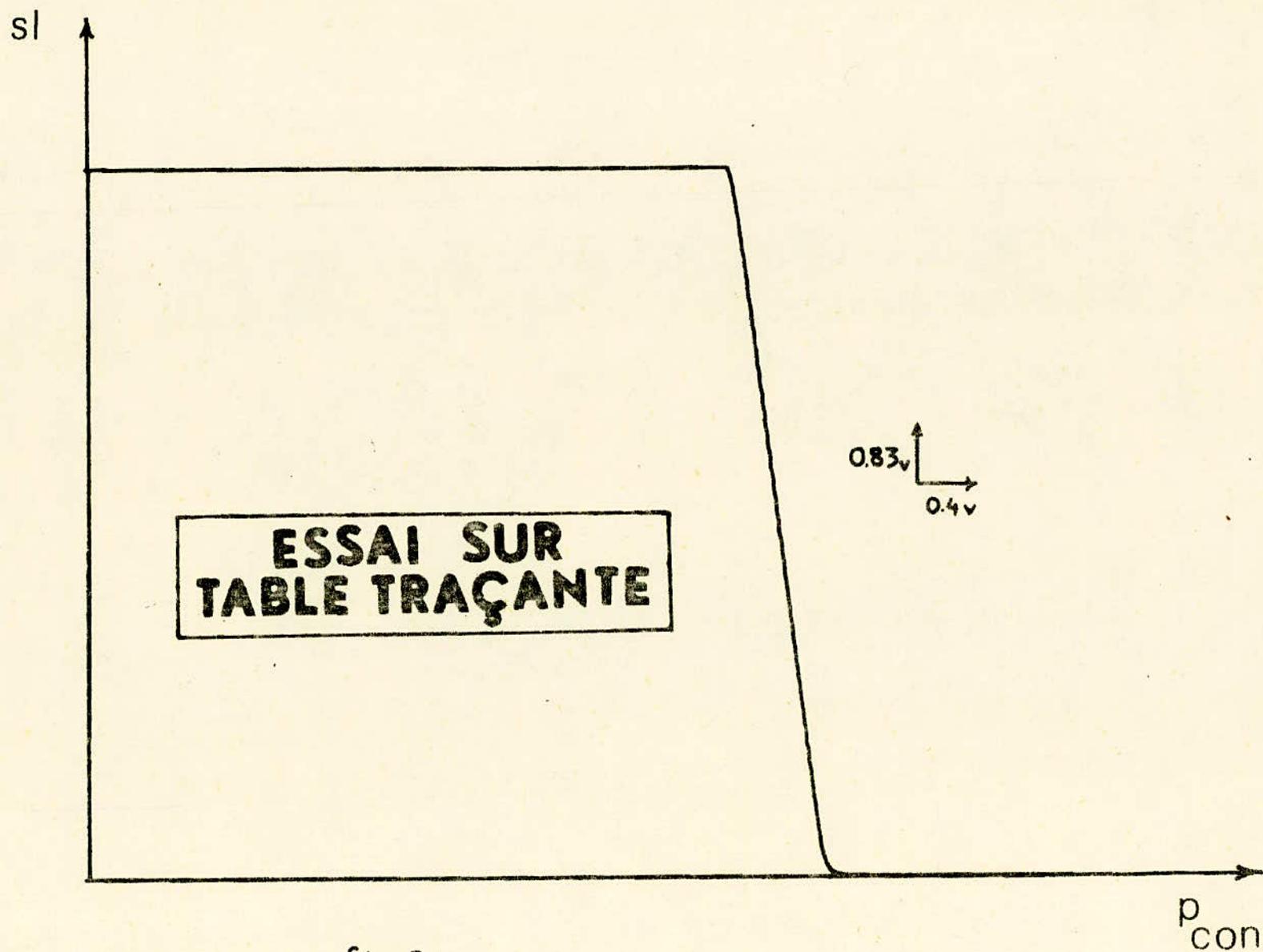


Fig 8.b.

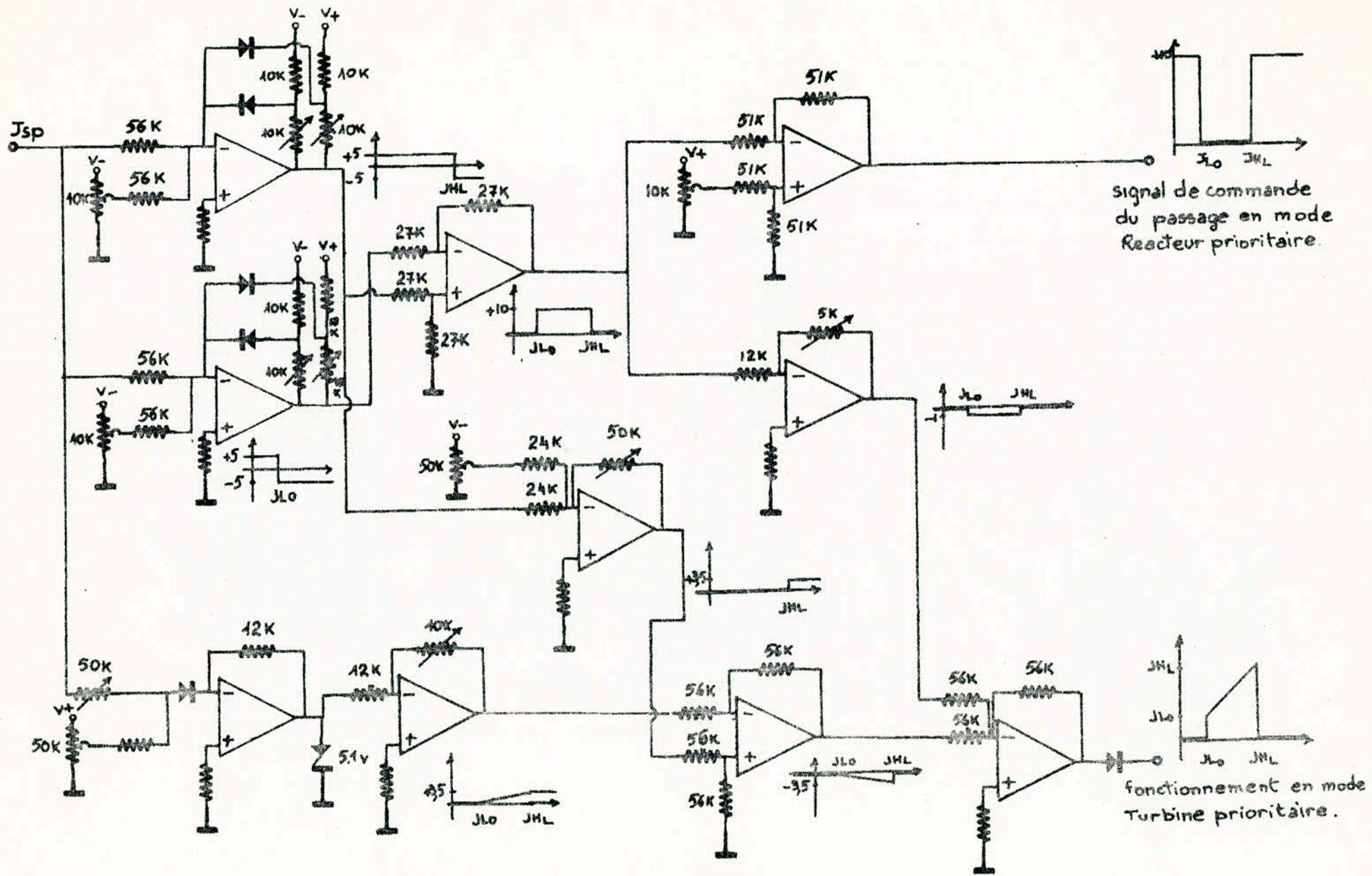


fig 9.a

LOGIQUE DE COMMANDE.

signal de  
commande  
du  
passage  
en R. P

**ESSAI SUR  
TABLE TRAÇANTE**

1,6 v  
0,4 v

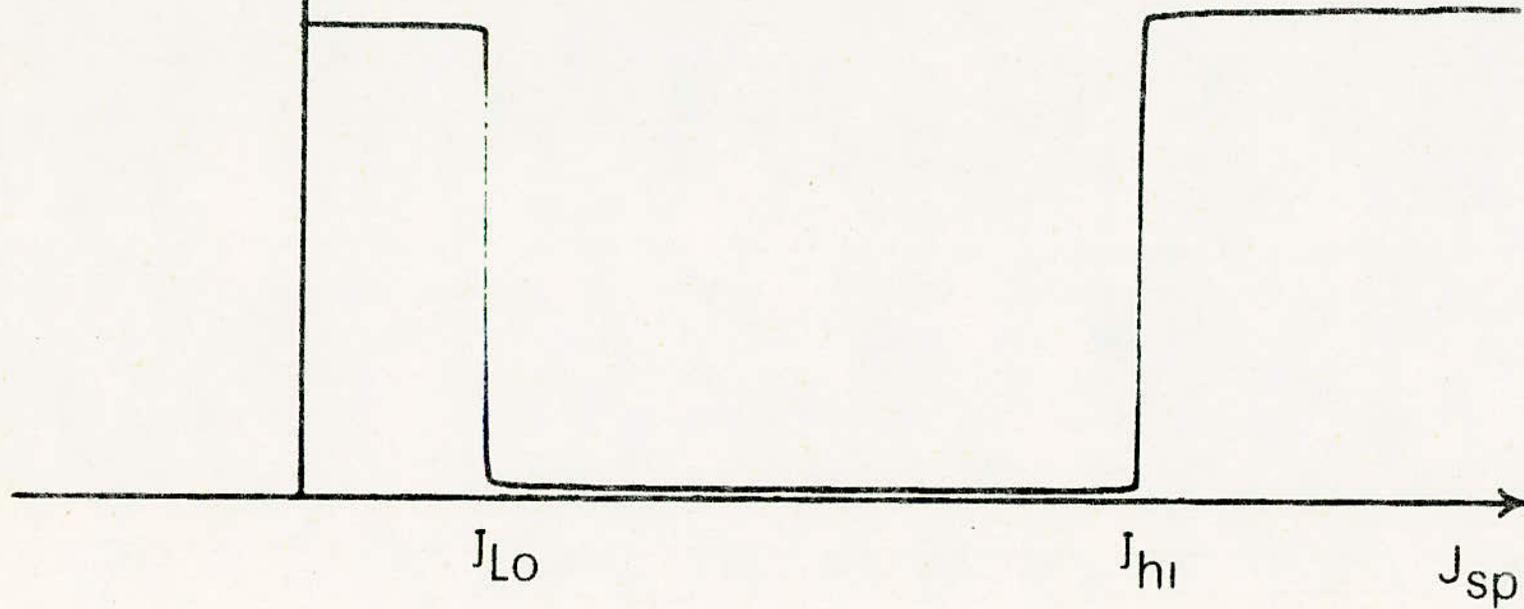


fig 9.b<sub>1</sub>.

**ESSAI SUR  
TABLE TRAÇANTE**

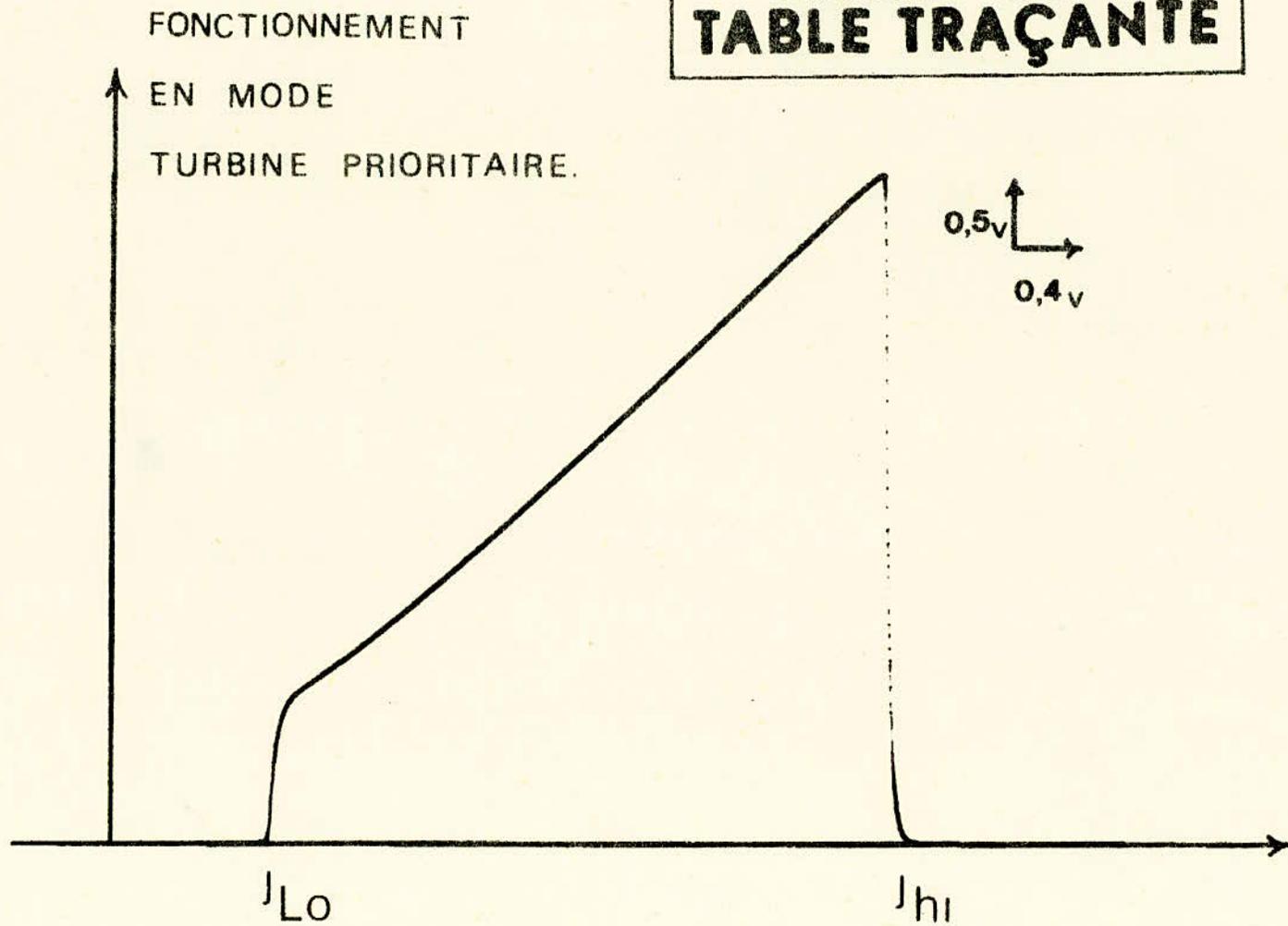


fig 9.b<sub>2</sub>

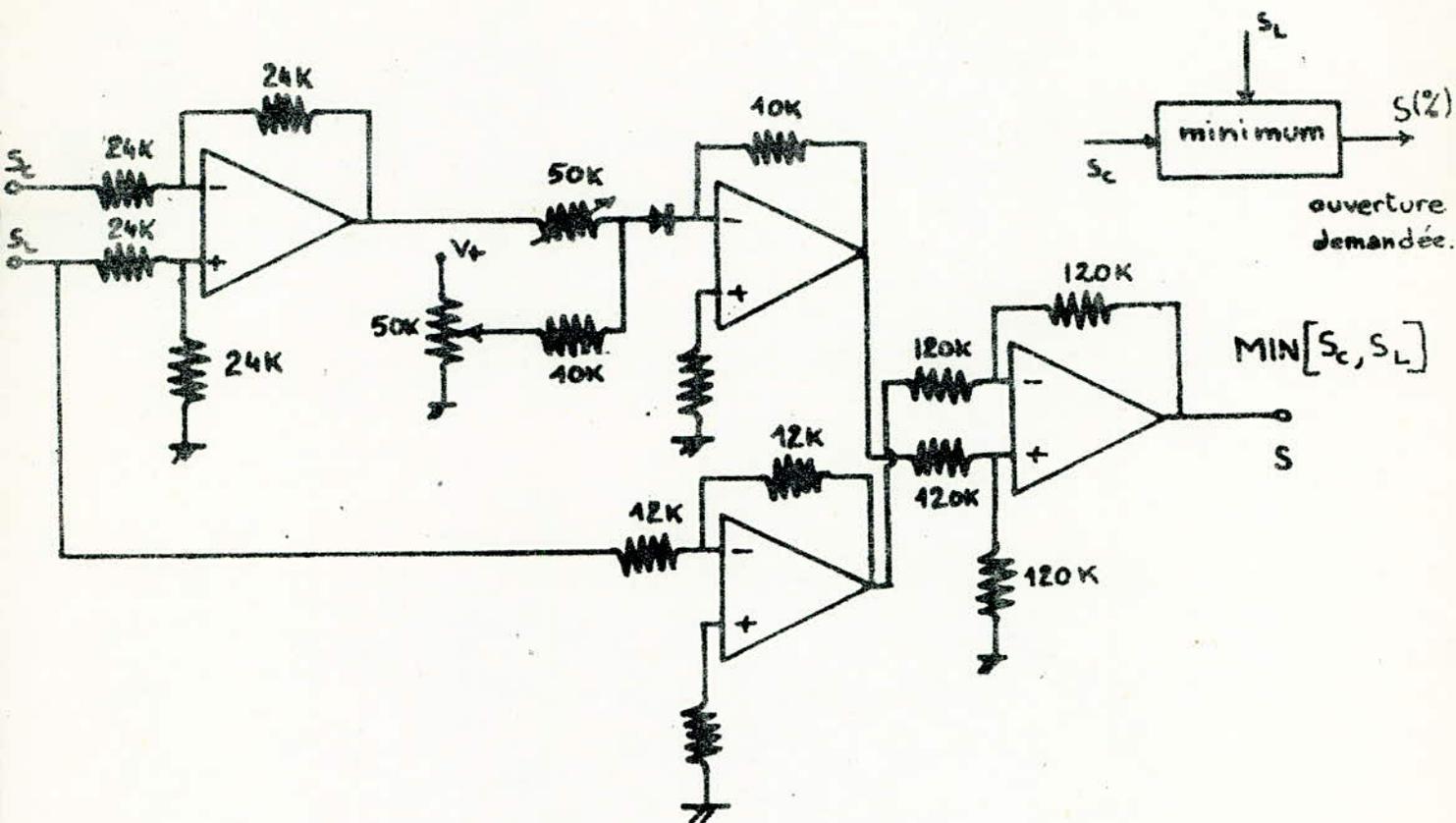


fig 10

Montage réalisant la fonction "minimum"

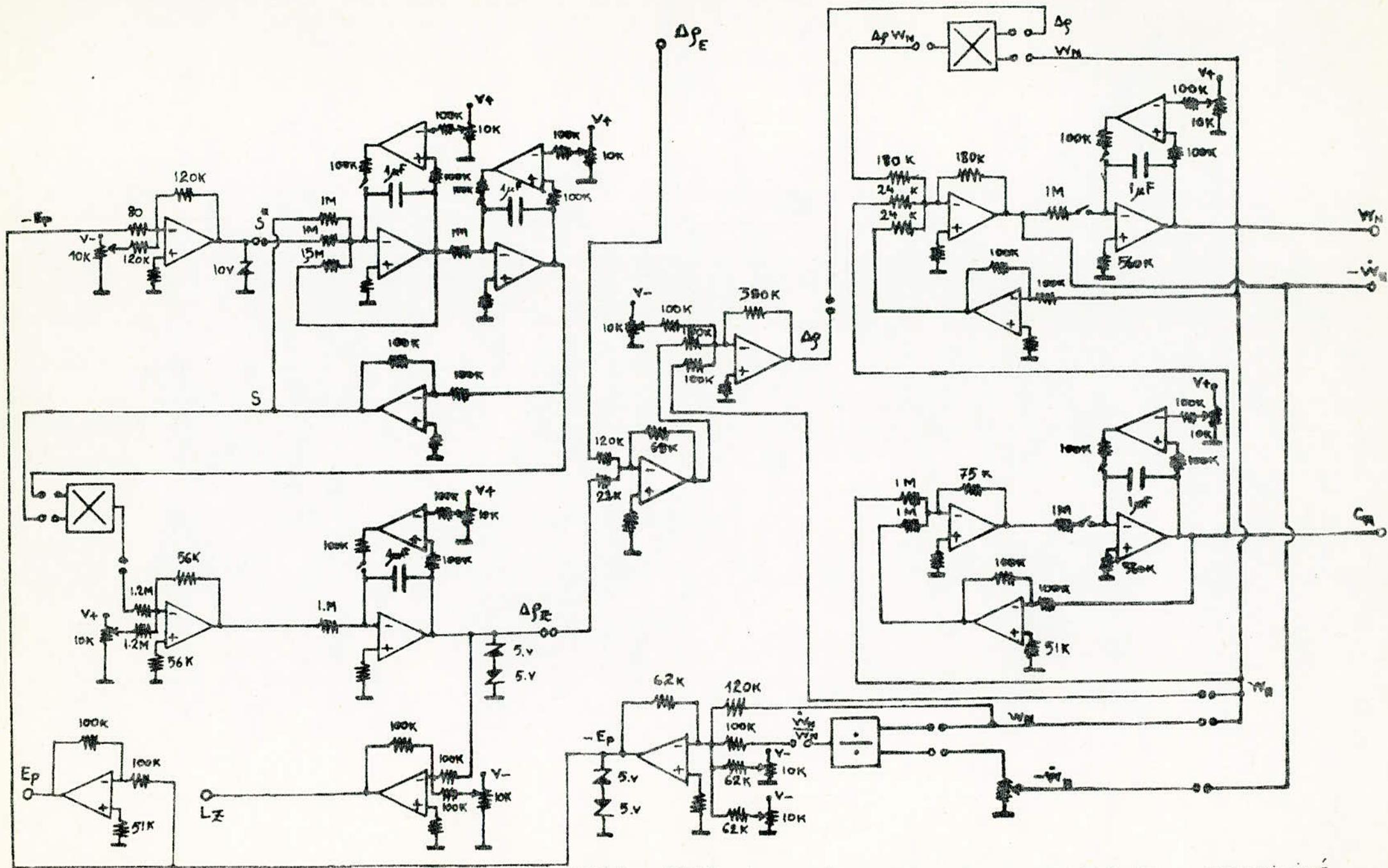


Fig. II.3.2: SCHEMA DU SIMULATEUR DU CONTROLE DE LA REACTIVITE PAR LES BARRES LIQUIDES.

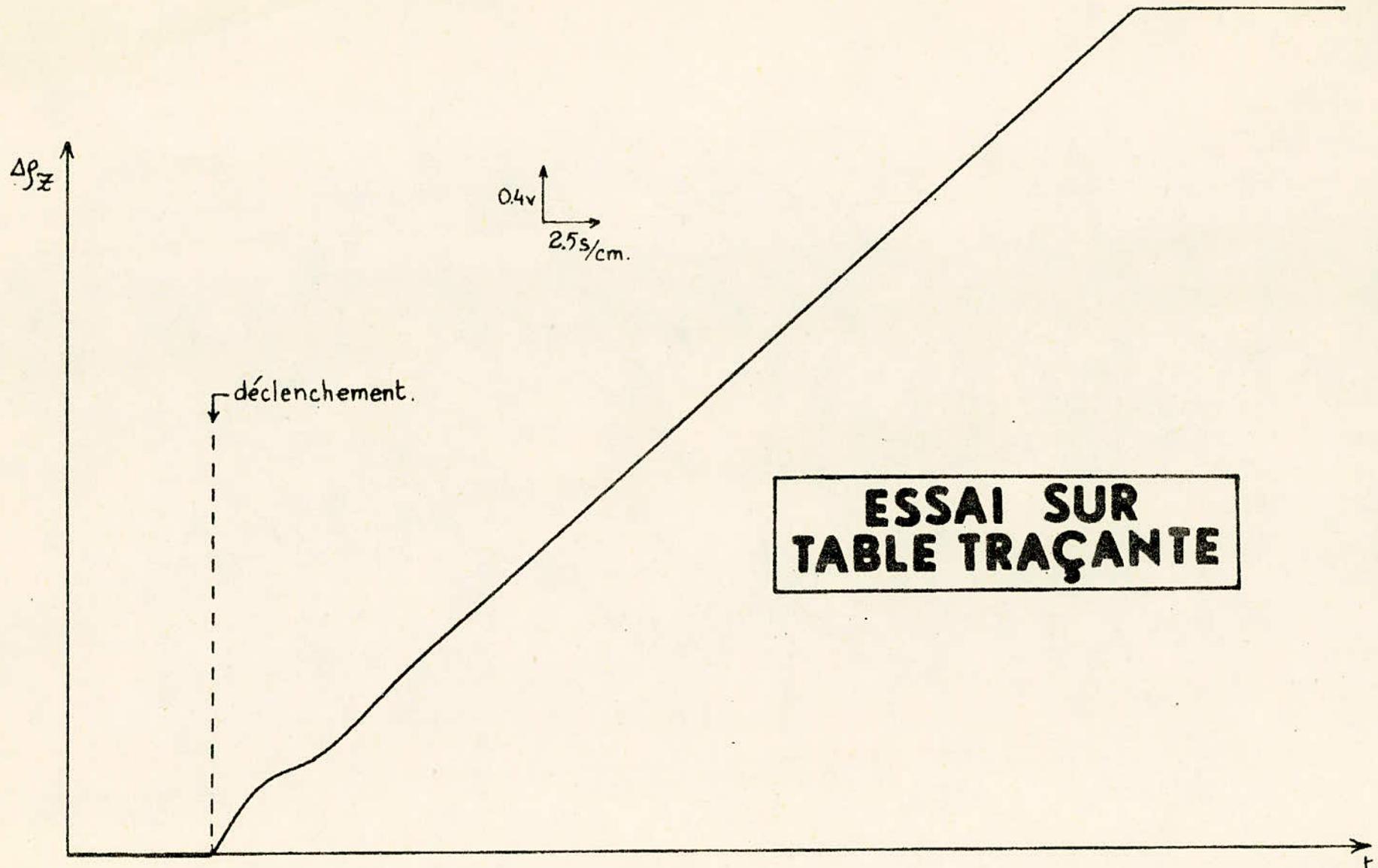


fig II.3.2.E<sub>1</sub>: Evolution de la réactivité pour une demande d'ouverture  $S^*$  de 50%

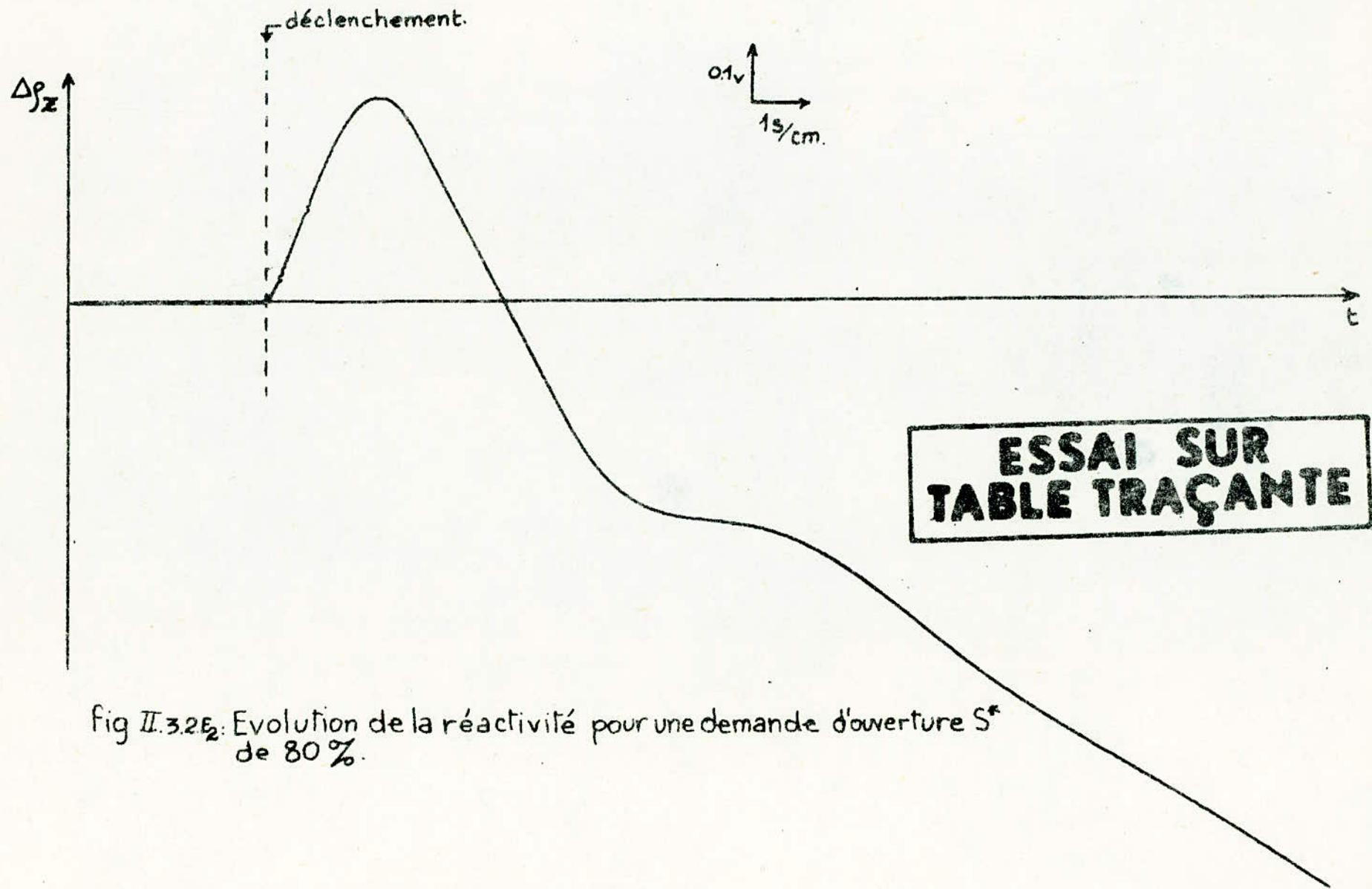


fig II.3.2E<sub>2</sub>: Evolution de la réactivité pour une demande d'ouverture  $S^*$  de 80%.

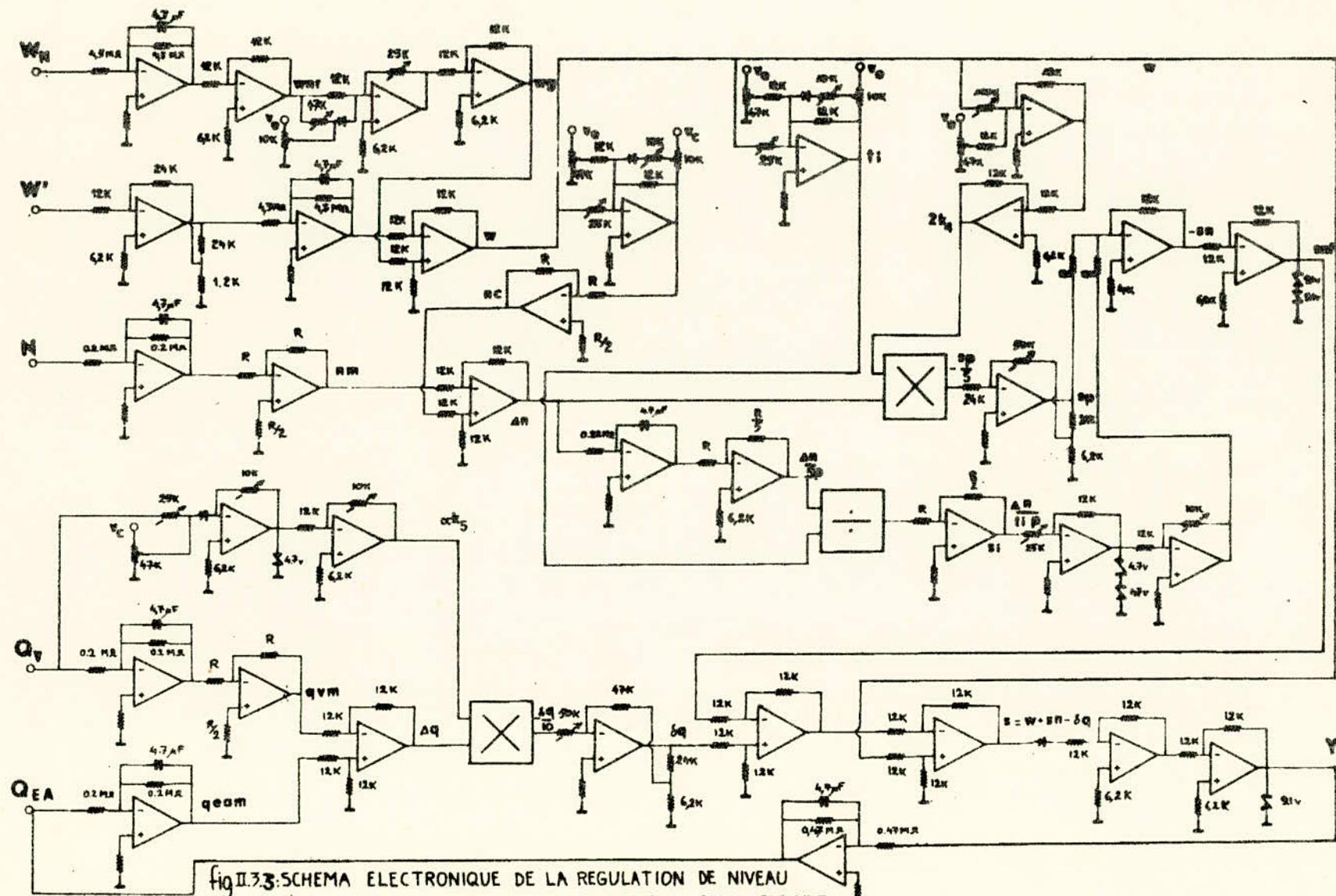


fig II.3.3: SCHEMA ELECTRONIQUE DE LA REGULATION DE NIVEAU  
 D'EAU DANS LE GENERATEUR DE VAPEUR DU CANDU 600 MWE.

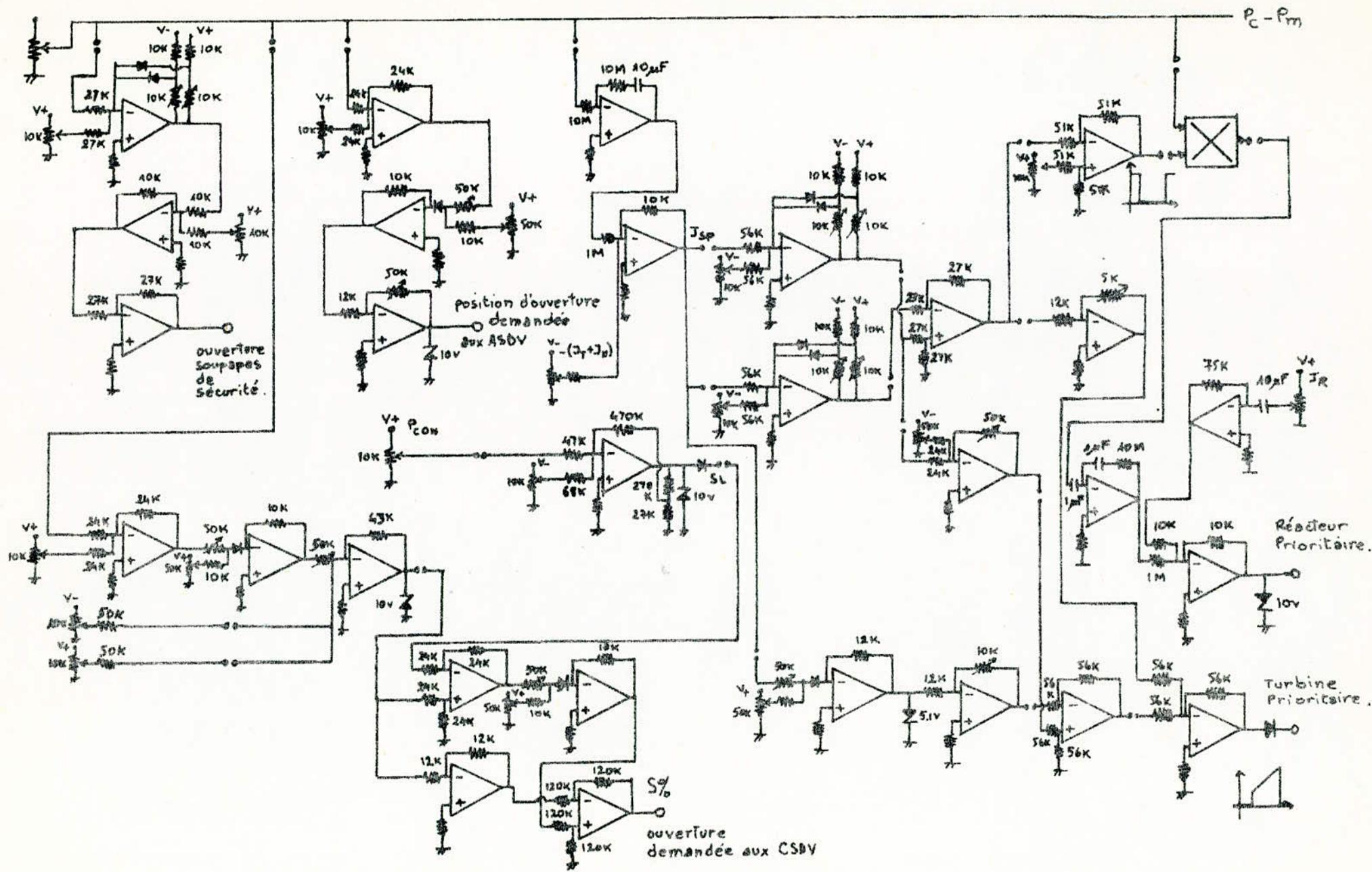


fig II.3.4:

Schéma général de la régulation de pression au niveau du générateur de vapeur et logique de commande du mode de fonctionnement.

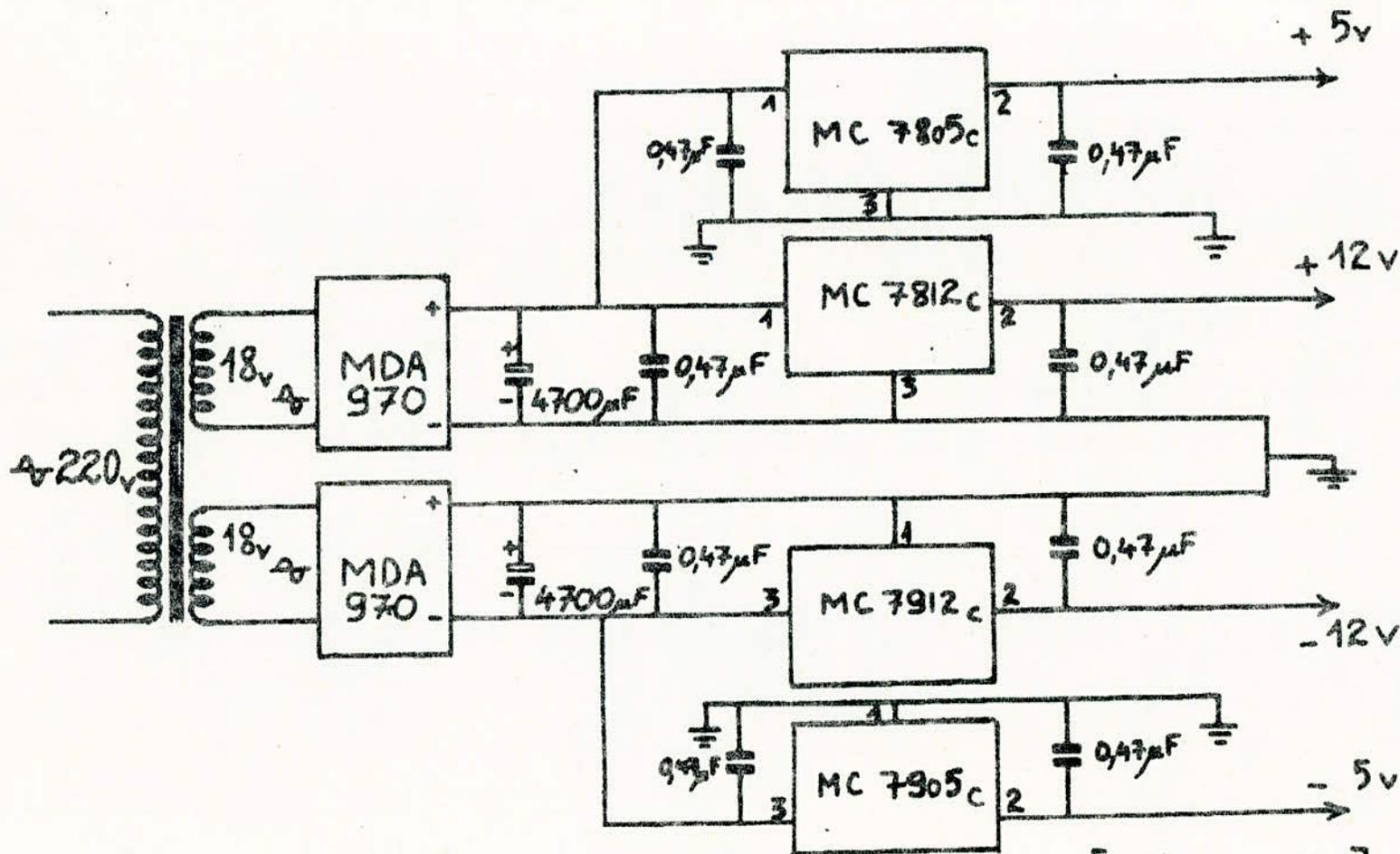


fig II.35: Schéma de l'alimentation stabilisée.  $[+12\text{v}, -12\text{v}]$   
 $[+5\text{v}; -5\text{v}]$

## CONCLUSION

Comme nous l'avons indiqué au niveau de l'introduction, l'objectif que nous nous sommes fixés dans le cadre de notre travail d'ingénieur est l'étude des régulations avec une application : Contrôle et régulation dans les Centrales Electronucléaires de puissance du type " CANDU 600 MWe ".

Au terme de ce travail, une question importante se pose :

Avons-nous atteint l'objectif que nous nous sommes fixés ?

Sans vouloir répondre à une telle question de façon directe, nous pouvons tirer la conclusion suivante :

Dans le cadre de notre travail, nous n'avons pas étudié les asservissements en tant que tel : à savoir que nous ne nous sommes pas intéressés à étudier les caractéristiques des systèmes asservis en étudiant par exemple leur stabilité, leur précision, etc...

Nous avons surtout axé notre travail sur l'étude de systèmes asservis tels qu'ils sont conçus réellement sur les Centrales Electronucléaires de puissance.

Il ressort de ce qui vient d'être dit qu'une étude systématiquement des asservissements d'une façon générale reste à faire.

Une telle étude devrait permettre en utilisant un modèle différent de celui que nous avons pris de montrer que par un choix judicieux des éléments des régulateurs réalisés, il sera possible d'optimiser dans une certaine marge les performances du système.

Une comparaison finale des deux modèles pourrait conduire à des conclusions très intéressantes. Une telle étude est déjà programmée et sera mise en oeuvre sous peu.

Nous pouvons noter pour terminer que sur le plan strictement personnel, le projet réalisé nous a permis d'utiliser et de maîtriser l'utilisation d'une gamme importante de circuits électroniques.

Afin que notre travail puisse avoir une valeur sur le plan strictement pédagogique, nous avons été amenés à concevoir notre réalisation de façon à ce qu'elle puisse être utilisée comme support efficace à un cours théorique dans le domaine du contrôle industriel.

## BIBLIOGRAPHIE

-----

- G. NEY - Automatique linéaire : UNIVERSITE DE PARIS "Ecole Supérieure d'Electricité".
- DANIEL DINDELUX- Technique de la Régulation Industriel chez EYROLLES
- F de CARFORT  
C FOULARD - Asservissements linéaires continus chez DUNOD
- J-ch-GILLE  
P-DECAULME - Théorie et calcul des asservissements linéaires chez  
M-PELEGRIN DUNOD
- Document de  
l'hydro-Quebec - Aperçus des fondements et règles du contrôle de la  
puissance du réacteur CANDU 600 MWe ( 1 Janvier 1979 )  
par P.MERCIER.  
- Système de commande de la centrale de Gentilly - 2  
par Jean BOUCHART d'Orval.
- Y. LOISELET - L'Amplificateur opérationnel dans les asservissements  
chez DUNOD.
- MOTOROLA - Linéair Intégrated circuits DATA BOOK.

