



**Extension des méthodes de modélisation
auto-adaptatives et du filtrage de Kalman-Bucy :
Application à la commande numérique d'un réacteur
d'épitaxie**

Christophe Rabut

► **To cite this version:**

Christophe Rabut. Extension des méthodes de modélisation auto-adaptatives et du filtrage de Kalman-Bucy : Application à la commande numérique d'un réacteur d'épitaxie. Automatique / Robotique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 1975. Français. NNT : . tel-00176573

HAL Id: tel-00176573

<https://theses.hal.science/tel-00176573>

Submitted on 4 Oct 2007

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

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

THÈSE

présentée

A L'UNIVERSITÉ PAUL SABATIER DE TOULOUSE

en vue de l'obtention

du titre de DOCTEUR-INGENIEUR

par

Christophe RABUT

Ingénieur E. N. S. A. E.

EXTENSION DES MÉTHODES DE MODÉLISATION AUTO-ADAPTATIVES ET DU FILTRAGE DE KALMAN-BUCY APPLICATION A LA COMMANDE NUMÉRIQUE D'UN RÉACTEUR D'ÉPITAXIE

Soutenue le 10 Juillet 1975 devant la Commission d'examen :

Y. SEVELY

Président

J. MERIC

J. COUOT

G. LHOTE

G. ALENGRIN

J.-P. BABARY

} Examineurs

Le risque est de réussir sans comprendre.

ALAIN

L'illusion consiste à croire que la machine est un homme artificiel.

Ivan ILLICH

A V A N T - P R O P O S

La recherche que voudrait concrétiser ce mémoire a été effectuée au sein du Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes⁺, dans le cadre d'un contrat de la Délégation Générale de la Recherche Scientifique et Technique⁺⁺, en collaboration avec la Radiotechnique Compelec⁺⁺⁺ ; elle m'a permis de réaliser de riches contacts professionnels et humains.

Je voudrais donc remercier personnellement tous ceux que j'ai rencontrés à cette occasion, et qu'il serait malheureusement long et fastidieux d'énumérer ici : les membres de l'équipe SPRUP et des autres équipes, les services de secrétariat, de documentation, d'informatique, d'entretien, et plus généralement tout le personnel du laboratoire qui, chacun pour sa part, a contribué à créer l'atmosphère d'entraide et de travail dans laquelle cette recherche a pu être menée à bien. Que les ingénieurs, les techniciens de la Radiotechnique sachent combien j'ai apprécié leur collaboration chaleureuse, plus particulièrement les opérateurs qui, bien que l'automatisation bouleverse leur vie professionnelle, m'ont toujours accordé leur confiance et leur sympathie. Que tous ceux qui m'ont côtoyé et aidé se retrouvent ici : le travail accompli ensemble et les liens noués sont le gage de leur collaboration, même anonyme, à cet ouvrage.

Je tiens aussi à remercier nommément Monsieur LAGASSE, Directeur du laboratoire, Monsieur BABARY, Responsable Scientifique de l'équipe, Monsieur LHOTE, qui assure pour la R.T.C. la direction du contrat, et Monsieur SEVELY, Président du jury ; leur responsabilité, leur soutien ou leur aide m'ont été particulièrement précieux tout au long de ce travail.

- ⁺ L.A.A.S. 7, Avenue Colonel Roche - 31400 TOULOUSE
- ⁺⁺ D.G.R.S.T. Contrats "Automatisation" n°s 73.7.1023 et 74.7.1249
- ⁺⁺⁺ R.T.C. Route de la délivrande - 14000 CAEN.

R E S U M E

Un réacteur d'épithaxie est un processus industriel, utilisé dans la fabrication de semi-conducteurs, dont les caractéristiques sont légèrement évolutives. Des considérations mécaniques interdisant la mesure des variables de sortie en cours de réaction, toute commande ne peut être réalisée qu'en boucle ouverte, au niveau d'une manipulation ; par contre, une commande en boucle fermée est possible au niveau de plusieurs manipulations consécutives.

Pour réaliser cette commande, il a fallu transformer et généraliser les méthodes classiques de modélisation auto-adaptative. De façon à faciliter le calcul des variables de commande, c'est le processus inverse et non le processus direct qui a été modélisé. De plus, une utilisation souple du filtrage de KALMAN-BUCY, mécanisme d'adaptation utilisé, permet d'en étendre l'emploi à des processus plus généraux.

Simulations et essais sur le site ont permis de valider l'ensemble de la commande.

I N D E X

Les renvois correspondent aux paragraphes où la notion considérée est expliquée ou abordée pour la première fois. Entre crochets, correspondent éventuellement les références bibliographiques qui s'y rattachent.

Nous distinguerons la modélisation, qui consiste à concevoir un modèle aussi proche que possible du processus étudié, et l'identification, qui consiste à déterminer les coefficients, ou paramètres, du modèle, de façon à ce que celui-ci corresponde à l'état du processus.

auto-adaptive : voir modélisation

commande : § 12, § 21

dopage : § 11.1

épitaxie : § 11.1 [1-1], [1-2], [1-3], [1-4]

filtrage de KALMAN-BUCY : § 21.4, § 22 [2-1], [2-2], [2-4], [2-6]

identification : § 21 [2-1] à [2-9] [3-4]

modélisation : § 21

simulation : § 21.3, § 41

type de dopage : § 11.1 [1-1]

vecteur d'état : § 22.11 [2-1] [2-4]

T A B L E D E S M A T I E R E S

NOTATIONS	4
INTRODUCTION	7
<u>PREMIERE PARTIE : LE REACTEUR D'EPITAXIE</u>	13
11 - L'épitaxie	15
11.1 - Aspects physico-chimiques de l'épitaxie	15
11.2 - Description physique du réacteur	17
11.3 - Caractéristiques du dépôt épitaxial :	18
11.31 - Unité et disparité à l'intérieur d'une même fournée	18
11.32 - Problèmes liés aux mesures	18
11.33 - Existence de manipulations aberrantes	21
12 - Méthode de commande	22
12.1 - Commande manuelle	22
12.11 - Durée du dépôt épitaxial	22
12.12 - Débit du gaz dopant	24
12.2 - Contraintes de modélisation	30
12.21 - Evolutivité du processus	30
12.22 - Présence de bruits	31
12.23 - Présence de débits imposés	31

<u>DEUXIEME PARTIE</u> : COMMANDE AUTO-ADAPTATIVE : THEORIE	31
21 - Modélisation et commande	33
21.1 - Première étape	33
21.2 - Deuxième étape	36
21.3 - Troisième étape	38
21.4 - Quatrième étape	41
22 - Etude et utilisation du filtrage de KALMAN-BUCY	44
22.1 - Eléments théoriques de départ	44
22.11 - Présentation du filtrage	44
22.11.1 - Estimation du vecteur d'état	44
22.11.2 - Identification des paramètres	46
22.12 - Filtrage multi-entrées, multi-sorties	48
22.13 - Evaluation hors ligne des matrices de covariances P et R	50
22.13.1 - Influence de P et R	50
22.13.2 - Evaluation classique de P et R	51
22.13.3 - Généralisation	52
22.2 - Utilisation et extension du filtrage de KALMAN-BUCY	54
22.21 - Renseignements utiles pour le suivi de l'identification	54
22.21.1 - Calcul de la matrice Φ'	54
22.21.2 - Calcul du tableau PREVOI	55
22.22 - Réajustement du modèle, hors filtrage	59
<u>TROISIEME PARTIE</u> : COMMANDE AUTO-ADAPTATIVE : REALISATION	63
31 - Mise en équations	66
31.1 - Linéarisation	66
31.11 - Résistivité	66
31.11.1 - Etablissement d'une équation théorique	68
31.11.2 - Prise en considération du bruit	68
31.12 - Epaisseur	69
31.13 - Ecriture matricielle	70
31.2 - Calcul de x et y	71
31.3 - Eléments statistiques	72
31.31 - R	74
31.32 - P	75
31.33 - Q	77

32 - Réalisation informatique de la commande	78
32.1 - Préliminaire	78
32.2 -Description des sous-programmes	82
33 - Calcul de θ , P, R	88
<u>QUATRIEME PARTIE : RESULTATS</u>	91
41 - Simulations	93
41.1 - Présentation	93
41.2 - Résultats	95
41.21 - Généralités	95
41.22 - Courbes récapitulatives	97
41.22.1 - Changement de bouteille	98
41.22.2 - Faible observabilité	102
42 - Essais sur le site	104
42.1 - Description	104
42.2 - Résultats	106
43 - Mise en place de la commande automatique et prolongements possibles	107
43.1 - Description	110
43.2 - Programme d'intendance	112
43.3 - Conséquences sur le travail de l'opérateur	114
43.4 - Prolongements possibles	116
CONCLUSION	121
ANNEXE 1 : Présentation matérielle du réacteur d'épitaxie	
ANNEXE 2 : Estimation de θ , P, R	
ANNEXE 3 : Estimation de θ , P, R. Généralisation	
ANNEXE 4 : Tableaux de correspondance $p \rightleftharpoons C$	

BIBLIOGRAPHIE

NOTATIONS

Les renvois aux numéros de page indiquent où ces quantités apparaissent pour la première fois.

NOTATIONS VECTORIELLES :

Conformément aux habitudes en vigueur au laboratoire, un vecteur est supposé écrit en colonne : le vecteur α écrit en ligne sera donc écrit α^t . De plus, les matrices sont toujours représentées par une lettre majuscule.

α^t : transposé du vecteur ou de la matrice α

$\hat{\alpha}$: estimation de α (p33)

$\tilde{\alpha}$: erreur d'estimation de α : $\alpha - \hat{\alpha}$ (p.33)

$\tilde{\alpha}$: erreur d'estimation de α , exprimé en pourcentage :

$$\tilde{\alpha}_i = 100 \times \frac{\tilde{\alpha}_i}{\alpha_i} \quad (\text{p56})$$

$\bar{\alpha}$: valeur souhaitée de α (p37)

α_i : ième composante du vecteur α

A_{ij} : jème composante de la ième ligne de la matrice A

L'indice k indique toujours le numéro d'itération (ou de manipulation : voir 12.1 , p22) auquel se rapporte la grandeur indiquée.

Ainsi : α_k : vecteur α relatif à l'itération n°k

α_{ki} : ième composante de α_k

VARIABLES UTILISEES :

On trouvera entre crochets la valeur des variables dans notre cas d'application, c'est-à-dire pour l'étude du réacteur d'épitaxie.

- θ, θ^i : vecteur colonne, modèle du processus (p.46)
- Θ : matrice (m,n), modèle du processus (p.48)
- Θ' : voir p.53
- x', x^i : vecteur contenant les valeurs numériques des entrées du modèle KB :

$$[x' = x^i = (\log \rho, \frac{DH2}{DSI} \cdot e, 1)^t] \text{ (p.41 ; p.68)}$$
- X : matrice contenant les valeurs numériques des entrées du modèle KB. $[x = \begin{pmatrix} x' & 000 \\ 000 & x' \end{pmatrix}]$ (p.48;p.68)
- y : vecteur contenant les valeurs numériques des sorties du modèle KB. $[y = (\log \frac{DD}{DSI}, T)^t]$ (p.41 et 68)
- y' : scalaire contenant la valeur numérique de la sortie du modèle KB, lorsqu'elle est unique.
- m : nombre d'éléments de x'. $[m = 3]$
- n : nombre d'éléments de y. $[n = 2]$
- c : vecteur de consigne à appliquer en entrée du processus (qui doit être calculé par l'ensemble de la commande) : $[c = (DD, T)^t]$ (p.33)
- d : entrée (vectorielle) déterminée du processus, imposée par l'opérateur $[d = (DSI, DH2)^t]$ (p.43)
- s : sortie mesurée du processus $[s = (e, \rho)^t]$ (p.43)
- v : bruit blanc, relatif à l'évolutivité du modèle KB (p.46)
- w : bruit blanc, relatif à l'imprécision de connaissance des sorties du modèle KB (p.46)
- P, Q, R: matrices de covariances du filtrage KB (p.46)

ABREVIATIONS ET VARIABLES PROPRES AU REACTEUR D'EPITAXIE :

- KB : KALMAN-BUCY
- e : épaisseur moyenne de la totalité de la couche épitaxiale déposée sur l'ensemble des plaquettes, au cours de la réaction (p.19).
- RO, ρ : résistivité moyenne de la couche superficielle, déposée sur l'ensemble des plaquettes au cours de la réaction (p.19).
- DSI : débit de $SiCl_4$ (ou de $SiHCl_3$) injecté dans le réacteur (en fait, jusqu'à la mise en place de nouveaux appareillages, il s'agit d'un débit d'hydrogène barbotant dans une bouteille de $SiCl_4$ (ou de $SiHCl_3$)) (p.19).
- DD : débit du gaz dopant injecté dans le réacteur p.19)
- DH2 : débit d'hydrogène vecteur, injecté dans le réacteur (p.19)
- T : durée du dépôt épitaxial (p.16).
- V_d : vitesse de dépôt : $V_d = \frac{e}{T}$ (p.22).
- C : concentration en impuretés (c'est-à-dire en molécules de dopant) de la couche épitaxiée (p.24).

SYMBOLES CHIMIQUES :

- AsH_3 : Arsine
- B_2H_6 : Diborane
- H_2 : Hydrogène
- Si : Silicium
- $SiCl_4$: Tétrachlorure de Silicium
- $SiHCl_3$: Trichlorure de Silicium
- N_2 : Azote

I N T R O D U C T I O N

L'Automatique, dont l'origine remonte à l'asservissement le plus simple, trouve son plein épanouissement dans la conduite numérique de processus complexes. Les capacités de calcul des ordinateurs offrent, en effet, la possibilité de conserver en mémoire une somme d'informations qui dépasse les capacités humaines, pour les intégrer ensuite dans un calcul qui, tant par sa complexité que par sa durée, serait impossible de réaliser sans aide électronique. De plus, l'ordinateur permet d'effectuer de multiples simulations, et donc de tester une nouvelle méthode, sans mettre en oeuvre sur le site des essais le plus souvent longs et coûteux.

Cette nouvelle dimension de l'automatique se trouve très bien adaptée au cas des processus soumis à de fréquentes perturbations, prévisibles ou non : les moyens de calcul actuels permettent de tenir compte non seulement de l'instant présent, mais aussi de tout un passé du processus, en accordant éventuellement plus ou moins de poids au passé le plus récent. Le bruit inhérent au processus peut ainsi être filtré, sans pour autant altérer la qualité de la réponse lorsqu'il s'agit de perturbations prévues.

Le réacteur d'épithaxie est un exemple de processus complexe, soumis à toutes sortes de bruits (tant sur les mesures relatives aux entrées et aux sorties que sur les paramètres propres du processus) et à des perturbations précises et identifiables. L'imprécision, fréquente dans l'industrie, des modèles mathématiques relatifs à un tel processus impose une certaine souplesse aux coefficients du modèle retenu, de façon à ce que la mobilité des coefficients pallie l'imperfection du modèle.

Les méthodes d'estimation à l'aide des techniques de filtrage permettent la détermination de l'état du système contrôlé sur la base d'une information incomplète, tout en filtrant les bruits propres au processus. Leur intérêt est donc évident, puisqu'elles pallient l'insuffisance technologique de l'instrumentation, et permettent une économie substantielle sur les moyens de mesure .

L'origine de notre travail concerne la mise au point d'un algorithme de commande automatique du réacteur "Gemini 3", en fonctionnement à la Radiotechnique Compelec, à CAEN. Etant donné la structure du processus, nous avons choisi d'effectuer une identification auto-adaptative, de façon à permettre le calcul de la commande. Pour cela, nous avons dû transformer les méthodes classiques pour les rendre applicables au processus étudié : nous avons étendu le principe même de la modélisation auto-adaptative, et généralisé le filtrage de Kalman-Bucy, afin de le rendre utilisable au cas des processus dont les bruits ne vérifient pas les hypothèses nécessaires au filtrage et pour lesquels on ne dispose que de peu d'itérations permettant l'identification. Notre souci constant a été de conserver le côté très général des modifications apportées, le réacteur d'épitaxie ne constituant qu'une motivation pour pousser plus avant les méthodes existantes de commande numérique par modélisation auto-adaptative.

C'est dans cet esprit qu'a été rédigé ce mémoire, qui comprend quatre parties :

La première est consacrée à la description du processus. Nous y avons donc exposé ce qu'est l'épitaxie et son intérêt pour le développement de la physique des solides ; nous y avons expliqué quelles sont les caractéristiques du produit de la réaction, qui sont donc les "sorties" du processus, les problèmes que soulèvent les mesures de ces caractéristiques. Enfin, nous y avons décrit le réacteur utilisé et l'instrumentation qui l'entoure. Tout cela entraîne un certain nombre de contraintes pour la modélisation et la commande, expliquant par ailleurs la méthode utilisée actuellement par les opérateurs.

Dans la seconde partie, entièrement théorique, nous avons détaillé la méthode de commande utilisée : nous y avons d'abord expliqué les innovations relatives à l'identification, puis celles relatives au filtrage de Kalman-Bucy, mécanisme de filtrage choisi. Nous avons essayé d'amener progressivement le lecteur de la méthode classique de modélisation à la méthode finalement utilisée, par étapes successives, en nous attachant à expliquer pourquoi chaque transformation, ou chaque choix, nous était nécessaire, et ce qu'elle apporte de nouveau. Pour cela, nous avons parfois utilisé un vocabulaire propre au réacteur d'épitaxie, mais nous avons fait en sorte de ne pas restreindre par là la généralité de l'exposé.

Les problèmes spécifiques au réacteur sont abordés dans la troisième partie : mise en équations du processus, linéarisation, évaluation des données statistiques ; nous y avons de plus expliqué le principe de la réalisation numérique que nous avons effectuée.

L'ensemble des résultats est exposé dans la quatrième partie : à propos de la simulation, d'abord, nous avons cherché à montrer ce qu'elle nous a apporté et permis d'établir, puis nous avons expliqué le déroulement des essais en temps réel et leur exploitation. Enfin, nous avons décrit la concrétisation sur le site de la commande auto-adaptative mise au point, en abordant de plus les conséquences de cette réalisation sur le plan humain.

Ce découpage ne correspond pas à un ordre chronologique : si, bien sûr, nous avons d'abord dû étudier le fonctionnement du réacteur d'épitaxie, les résultats obtenus, soit en simulation, soit lors des essais sur le site, nous ont amené à revoir la méthode de modélisation choisie, ou à adapter le filtrage de Kalman-Bucy à nos impératifs, ou plus simplement encore à modifier l'initialisation des paramètres employés . Il y a donc eu une interaction constante entre chacune des trois dernières parties . Nous avons aussi essayé plusieurs modèles différents, compte tenu des caractéristiques propres au processus étudié .

Les résultats obtenus permettent d'une part de valider l'ensemble de la commande, et d'autre part, de mettre en oeuvre les transformations nécessaires pour son intégration sur le site .

P R E M I E R E P A R T I E

LE REACTEUR D'EPITAXIE

- 11 - L'EPITAXIE
- 12 - METHODE DE COMMANDE

Dans cette partie, nous voulons décrire l'ensemble du processus industriel qui a servi de base à notre étude et en examiner les conséquences sur la méthode de commande employée. C'est pourquoi, après avoir présenté le but de l'opération épitaxiale, nous décrirons les caractéristiques propres du réacteur utilisé, en fonctionnement à la R.T.C. à CAEN, puis les caractéristiques du produit obtenu, à savoir des plaquettes épitaxiées. Puis, en examinant la méthode de commande manuelle, nous envisagerons les contraintes que nous devons respecter pour réaliser la commande automatique.

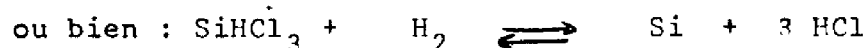
11 - L'ÉPITAXIE :

- Aspects physico-chimiques
- Description physique du réacteur
- Caractéristiques du dépôt épitaxial

11.1 - ASPECTS PHYSICO-CHIMIQUES DE L'ÉPITAXIE :

L'opération d'épitaxie consiste à déposer sur un substrat de silicium monocristallin une couche mince de silicium dopé, dans le même arrangement cristallin. L'intérêt de l'opération tient au fait que le dopage différent des deux parties du monocristal résultant de l'opération présente des propriétés électriques utilisées dans la conception physique des dispositifs semi-conducteurs.

Le dépôt de silicium est réalisé, pour le réacteur utilisé, par cracking à haute température de tetrachlorure de silicium (SiCl_4) dans un débit d'hydrogène (H_2), selon la réaction :



A la température convenable ($\approx 1200^\circ \text{C}$), le silicium atomique résultant de la réaction se dépose sur le substrat, en respectant l'organisation cristalline. [1.1] ; [1.2] , [1.3] , [1.4] .

L'opération globale dure près d'une heure et comporte les séquences suivantes, enchaînées automatiquement par des minuteriers électromécaniques :

- 1 - Purge du four, sous azote (N_2) 2'
- 2 - Purge du four, sous hydrogène (H_2) 4'
- 3 - Montée en température sous hydrogène et purge des conduites de gaz sous chlorure d'hydrogène (HCl) . . . 6'
- 4 - Décapage des plaques par H_2 et HCl 8'
- 5 - Purge des conduites de gaz, sous tri - tetra - chlorure de silicium ($SiHCl_3$ ou $SiCl_4$) et sous gaz dopant 3'
- 6 - DEPOT EPITAXIAL, de durée variable de 3' à 20'
- 7 - Purge du four, sous H_2 2'
- 8 - Décroissance de température, sous H_2 8'
- 9 - Décroissance de température, sous N_2 10'
- 10 - Défournement des plaques épitaxiées, enfournement des plaques à épitaxier

Les phases les plus importantes et les plus délicates sont les phases 4 et 6 : décapage des plaques et dépôt épitaxial. A chaque phase correspond l'ouverture, et la fermeture des vannes permettant l'admission des gaz nécessaires à l'opération (N_2 , H_2 , HCl , $SiCl_4$ ou $SiHCl_3$, gaz dopant : Arsine (AsH_3) pour un dopage de type N ou diborane (B_2H_6) pour un dopage de type P). Tous ces réglages sont manuels et contrôlés par des débitmètres à billes et par des minuteriers.

Il faut remarquer que si certaines plaques ne sont dopées que d'un seul type (N ou P), la plupart d'entre elles subissent deux, voire trois ou quatre dopages différents, ce qui nécessite d'effectuer plusieurs fois consécutivement les phases 5 et 6. Les dopages peuvent, en effet, être du type N, N^+ , P, P^+ , et leur superposition (par exemple : $N/P/P^+$, ou $N/P/N^+$) permet des effets semi-conducteurs très différents. Dans la pratique, les caractéristiques d'une couche déposée (type P par exemple) sont indépendantes des caractéristiques et du type des couches qui la précèdent ou qui la suivent. Ceci permet de traiter les couches épitaxiales indépendamment les unes des autres.

Tous les réglages relatifs aux phases autres que celle du dépôt épitaxial (phase n° 6) ont été optimisés dans leur ensemble par les ingénieurs de la R.T.C., et ne sont donc jamais modifiés. Les seules actions possibles se rapportent donc à la période de dépôt (phase 6), particulièrement importante et sensible à toutes sortes de perturbations. Il est bien évident que des modifications portant sur des périodes qui précèdent ou qui suivent le dépôt épitaxial peuvent avoir des conséquences sur la qualité du produit obtenu. Une optimisation des paramètres concernés, en relation avec ceux de l'épitaxie, n'a pas été envisagée, faute de données fournies par la R.T.C. . Les nouveaux éléments, et possibilités d'investigations, apportés par le présent travail, permettront sans doute une telle étude.

11.2 - DESCRIPTION PHYSIQUE DU REACTEUR :

En pratique, la réaction se produit dans un tube en quartz, horizontal, de section rectangulaire. Les substrats sont des plaquettes de silicium poli optique, d'environ 300 μ d'épaisseur, et d'un diamètre de 50 mm ou plus. Les plaquettes (en général une douzaine sur le réacteur utilisé), sont posées sur un susceptible, plaque rectangulaire en graphite vitrifié ; le chauffage est réalisé par une bobine d'induction H.F. , la bobine se trouvant à l'extérieur du tube en quartz, dans lequel sont placées les plaquettes à épitaxier, et où s'écoule le mélange gazeux approprié, préparé dans un tiroir d'une baie de commande. Un écran, placé en amont de la charge, permet d'assurer un écoulement aérodynamique satisfaisant, en évitant en particulier d'éventuels tourbillons.

De façon à utiliser au maximum le générateur H.F., le réacteur est composé de deux tubes identiques, fonctionnant alternativement, c'est-à-dire que l'un est en période de chauffage lorsque l'autre est en période de refroidissement.

Ces tubes ont la forme indiquée sur la figure 1.1 :

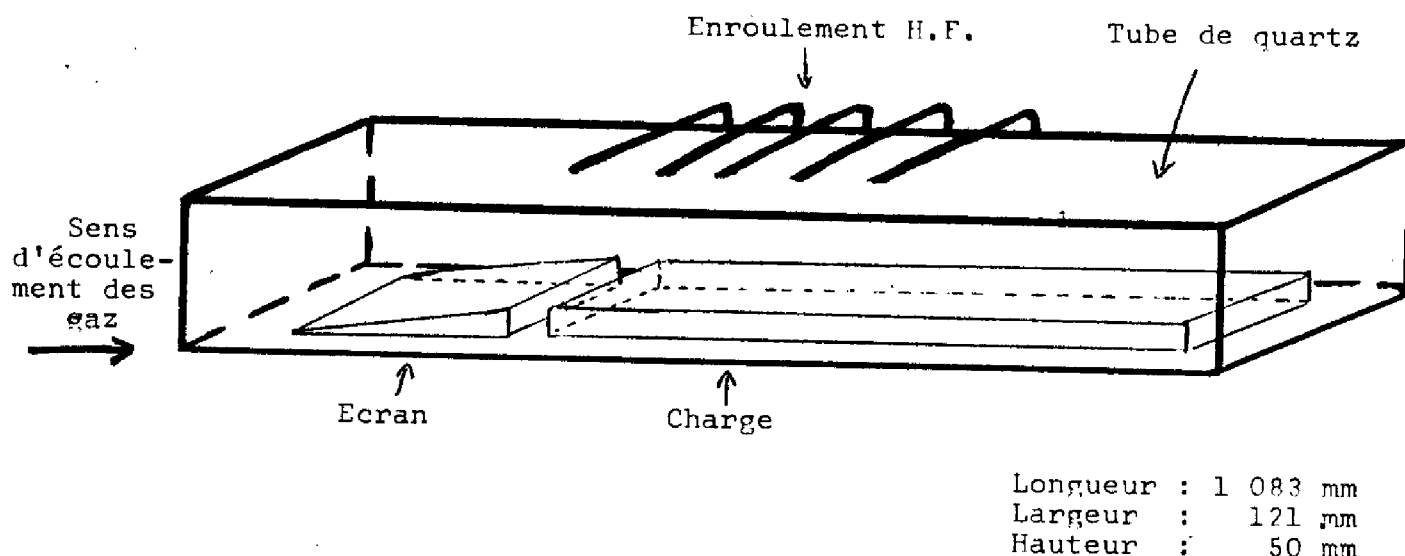


FIGURE 1.1

SCHEMA SIMPLIFIE DU REACTEUR

Le lecteur trouvera dans l'annexe 1 quelques photographies de l'appareillage utilisé.

11.3 - CARACTERISTIQUES DU DEPOT EPITAXIAL :

- Unité et disparité à l'intérieur d'une même fournée
- Problèmes liés aux mesures
- Existence de manipulations aberrantes.

11.31 - Unité et disparité à l'intérieur d'une fournée

A la fin de la réaction, les couches de silicium dopées déposées sur les plaquettes, doivent satisfaire, pour chacune d'elles, à certaines normes en épaisseur et résistivité (épaisseur maximale et minimale, résistivité maximale et minimale). Malheureusement, il est impossible d'agir individuellement sur chaque plaquette : les débits de gaz, le temps de l'opération sont des variables qui sont les mêmes pour toutes les plaquettes d'une même fournée.

Il est cependant possible de changer l'angle d'attaque de l'écran, ce qui, en modifiant le cours de l'écoulement gazeux à l'intérieur du tube, et en particulier au voisinage des plaquettes, influe sur la répartition des caractéristiques des couches épitaxiales le long de la charge. Il est aussi possible de modifier l'écartement des spires de l'enroulement H.F., créant ainsi des zones plus chauffées (enroulement plus serré) que d'autres (enroulement moins serré). Ces deux paramètres permettent donc de moduler, dans une assez faible mesure, les disparités de caractéristiques constatées sur l'ensemble des plaquettes, en raison de leur situation sur la charge. Etant donné les difficultés pratiques liées à de telles modifications, les ingénieurs de la R.T.C. ont déterminé les positions de l'écran et des spires qui permettent une dispersion minimale des caractéristiques.

Nous ne pouvons donc pas agir sur la répartition en épaisseur et résistivité le long de la charge, mais seulement sur l'ensemble de ces épaisseurs et résistivités. C'est pourquoi, nous ne tiendrons compte que de leur moyenne.

11.32 - Problèmes liés aux mesures :

- mesure des paramètres d'entrée
- mesure des paramètres de sortie.

11.32.1 - Mesure des paramètres d'entrée :

Beaucoup de paramètres influent directement sur la nature des résultats. Les plus importants sont :

- La durée T de l'opération
- Les débits des gaz insufflés :
 - débit d'hydrogène "vecteur" : DH2
 - débit de gaz dopant : DD (B_2H_6 ou AsH_3)
 - débit de $SiCl_4$ ou $SiHCl_3$: DSI
- La température t de la réaction

Malheureusement, ces paramètres sont souvent connus avec une certaine imprécision ; ainsi, par exemple, la température est vérifiée occasionnellement à l'aide d'un pyromètre optique, et réajustée à l'aide d'un rhéostat si nécessaire.

Quant aux débits de gaz dopants, ils sont très faibles, et la R.T.C. ne disposant pas de débitmètres assez précis, a été contrainte à effectuer une dilution (voire même une double dilution pour les débits très faibles) ; il y a donc des imprécisions importantes, d'autant plus que les débits de gaz sont tous mesurés par des débitmètres à bille, instruments dont on connaît la difficulté de lecture.

Enfin, le débit de SiCl_4 (ou de SiHCl_3) ne peut, dans l'état actuel des appareillages, être mesuré directement : de l'hydrogène gazeux barbote, en effet, dans du SiCl_4 (ou SiHCl_3) liquide, et en ressort chargé du gaz de silicium désiré. Seul le débit d'hydrogène est mesuré, ce qui pose des problèmes de reproductibilité. Ainsi, par exemple, la pression de la bouteille diminue progressivement au fil des manipulations, et donc, pour un même débit d'hydrogène, la quantité de SiCl_4 (ou SiHCl_3) dissous, s'affaiblit régulièrement, pour augmenter brutalement lorsque l'on remplace une bouteille usagée par une bouteille neuve. Par ailleurs, la régulation thermique de la bouteille de SiCl_4 (ou SiHCl_3) est assez rudimentaire : un serpentin dans lequel circule de l'eau froide forme un écran thermique autour de la bouteille ; ce système, en boucle ouverte, ne peut assurer une très bonne régulation, ce qui entraîne une certaine disparité sur la quantité de SiCl_4 (ou SiHCl_3) dissous dans un volume donné d'hydrogène.

11.32.2 - Mesure des paramètres de sortie :

Quant aux mesures d'épaisseur et de résistivité, elles sont faites par la méthode suivante :

- épaisseur : une mesure à infrarouge donne la valeur de l'épaisseur e de la totalité du dépôt épitaxial. L'épaisseur de chacune des couches est obtenue par simple règle de trois, en supposant la vitesse de dépôt constante au cours de l'opération, et donc en considérant que l'épaisseur de chaque couche est proportionnelle au temps de dépôt relatif à cette couche.

- résistivité : $R_{\square}$ étant la moyenne des résistances mesurées, sur la couche superficielle d'une plaquette, entre quatre pointes situées sur un carré, la résistivité ρ de la couche superficielle est donnée par la formule $\rho = R_{\square} e' 10^{-4}$ (e' étant ici l'épaisseur de la couche superficielle, exprimée en μ , ρ étant exprimé en $\Omega \times \text{cm}$).

Plusieurs remarques s'imposent à propos de ces mesures :

- . la seule résistivité accessible aux mesures est celle de la couche superficielle

- . une imprécision commise sur e' se répercute sur ρ ; de plus, e' n'est pas mesurée directement, mais est déduit de la mesure de e , compte tenu de l'hypothèse que la vitesse de dépôt est constante tout au long de l'opération

- . ces mesures dépendent en partie de l'endroit exact de la plaquette sur lequel on a opéré

- . enfin, par souci d'économie et de gain de temps, seules quelques plaquettes (en général quatre, quelquefois six) sont testées ; elles sont, bien sûr, choisies de façon à être au maximum représentatives de l'ensemble de la journée, mais le résultat final - valeur moyenne des mesures effectuées - n'en dépend pas moins de ce choix, arbitraire.

11.33 - Existence de manipulations aberrantes :

Il est important aussi de savoir que certaines manipulations présentent des résultats aberrants par rapport à ce que l'opérateur pouvait attendre. Dans certains cas, l'explication en est facile ; ainsi, par exemple, le blocage d'une vanne de gaz dopant peut être à l'origine d'une résistivité importante ; il peut aussi se créer, en cours d'épitaxie, un effet auto-dopant entre le susceptible, qui porte les plaquettes, et la couche dopée (c'est-à-dire que les impuretés du susceptible peuvent se déplacer de celui-ci sur la couche) diminuent alors sensiblement cette résistivité. Il arrive aussi que l'explication ne soit pas si simple, ou même que l'on ne puisse comprendre telle ou telle manipulation, jugée alors "aberrante". Habituellement, l'opérateur ne tient alors pas compte des résultats obtenus lors de cette manipulation.

12 - M E T H O D E D E C O M M A N D E :

- Commande manuelle
- Contraintes de modélisation

12.1 - C O M M A N D E M A N U E L L E :

- Durée du dépôt épitaxial
- Débit du gaz dopant

En raison de considérations mécaniques, il n'est pas possible de mesurer épaisseur et résistivité des plaquettes au cours de la réaction. En conséquence, on ne peut envisager de commande en boucle fermée en cours de manipulation. Il est, par contre, possible de déterminer les réglages d'une fournée en fonction des résultats acquis lors des fournées précédentes, c'est-à-dire d'effectuer une commande en boucle fermée au niveau de plusieurs manipulations consécutives. C'est ce que font actuellement les opérateurs, choisissant les réglages de façon assez peu précise, ce qui entraîne une certaine dispersion des résultats, et donc une baisse de qualité des produits obtenus.

Le calcul des paramètres à afficher lors de la fournée numéro k (indice k), se fait donc après connaissance des résultats de la fournée précédente (indice $k-1$) par la méthode suivante :

12.11 - Durée du dépôt épitaxial :

Nous appellerons T le temps total du dépôt épitaxial, c'est-à-dire la somme des temps relatifs au dépôt de chaque couche successivement épitaxiée. De même, e est une épaisseur totale, c'est-à-dire la somme des épaisseurs de chacune des couches épitaxiées (seule grandeur mesurable). Bien sûr, il s'agit en fait de la moyenne des épaisseurs, établie sur l'ensemble des plaquettes mesurées (voir § 11.31).

A débits de SiCl_4 (ou SiHCl_3) et de H_2 constants, la vitesse de dépôt V_d est supposée à peu près constante ; par conséquent, nous pouvons écrire la relation (approximative) suivante : $\frac{e_k}{T_k} = \frac{e_{k-1}}{T_{k-1}}$ et par conséquent : $T_k = T_{k-1} \cdot \frac{e_k}{e_{k-1}}$,

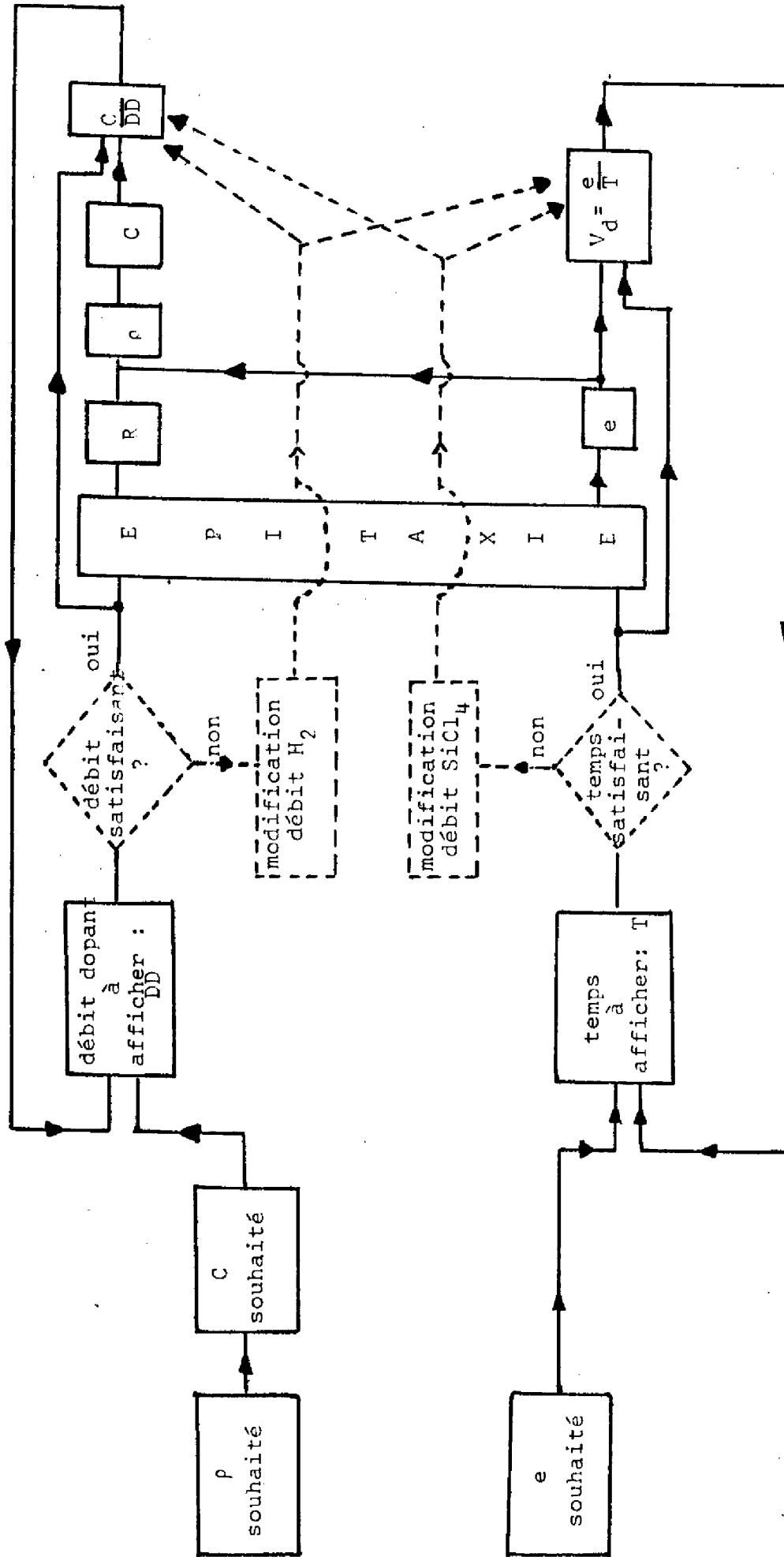


Figure 1 - 2 :
Organigramme de la méthode manuelle de
commande du réacteur d'épitaixie.

T_{k-1} et e_{k-1} étant le temps total affiché et l'épaisseur mesurée, relatifs à la fournée $k-1$, e_k étant l'épaisseur souhaitée pour la fournée suivante. Lorsqu'il y a plusieurs couches, les temps T'_k , T''_k ... relatifs à chacune des couches sont facilement déduits de T_k par une simple règle de trois : par exemple : $T'_k = T_k \cdot \frac{e'_k}{e_k}$.

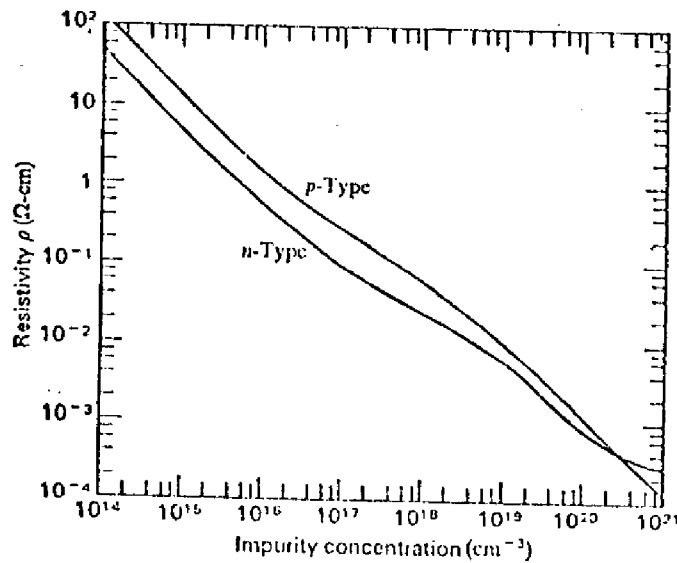
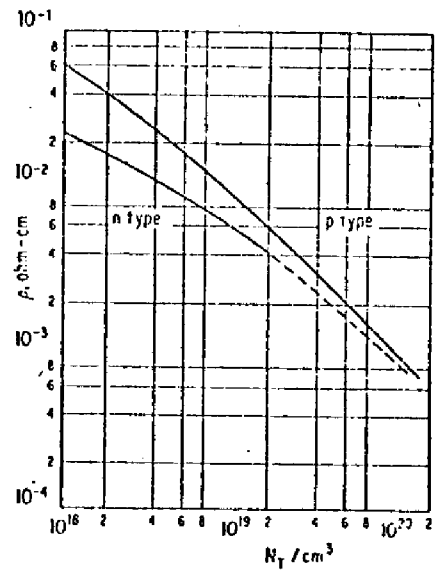
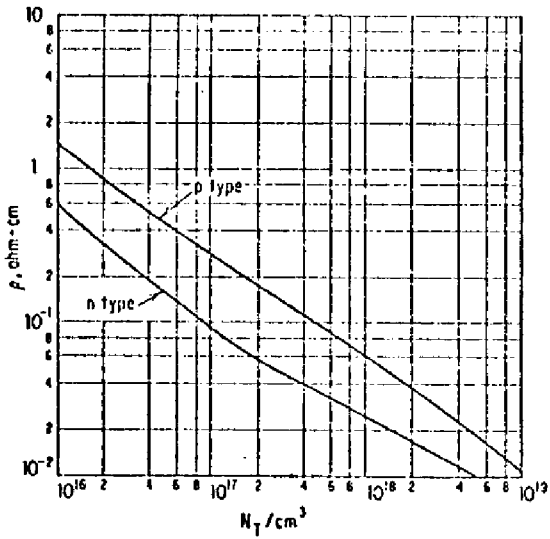
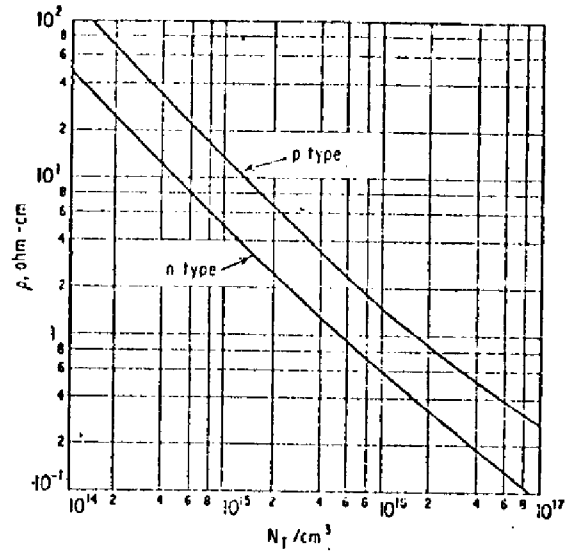
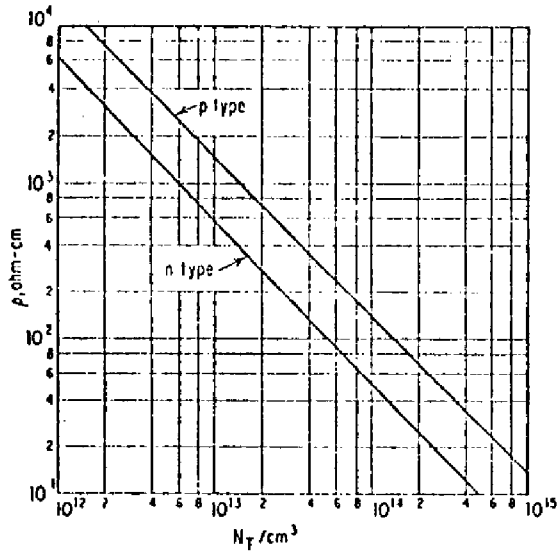
Si le temps T_k ainsi obtenu est trop fort, ou trop faible, l'opérateur modifie le débit de SiCl_4 (ou celui de H_2), et se reporte à un abaque donnant la nouvelle vitesse de dépôt, en fonction de l'ancienne, et des variations de débit.

12.12 - Débit du gaz dopant :

A débit de SiCl_4 (ou SiHCl_3) constant, le rapport $\frac{C}{DD}$ de la concentration des plaquettes en dopant, sur le débit du gaz dopant, est considéré comme constant. Connaissant la résistivité ρ_{k-1} de la couche superficielle de la manipulation $k-1$ (ou moins celle de la dernière manipulation dont la couche superficielle est du type voulu), l'opérateur en déduit C_{k-1} (abaque), et donc $\frac{C_{k-1}}{DD_{k-1}}$; souhaitant obtenir une résistivité ρ_k , il en déduit C_k (abaque), et la relation $\frac{C_{k-1}}{DD_{k-1}} = \frac{C_k}{DD_k}$ lui indique alors le débit à afficher. S'il souhaite une quelconque modification, il peut changer le débit d'hydrogène, et en déduire la modification du $\frac{C}{DD}$.

Toutes ces opérations sont regroupées dans la figure 1-2, qui montre de quelle façon l'épaisseur et la résistivité sont liées (par le calcul de ρ , d'une part, et éventuellement par une modification du débit d'hydrogène vecteur H_2 , ou de SiCl_4).

Les abaques donnant respectivement la relation entre ρ et C , entre la vitesse de dépôt V_d et le débit de SiCl_4 , et enfin entre V_d et le débit de SiHCl_3 , sont présentées en figures 1-3, 1-4, 1-5, 1-6. La figure 1-7 montre les variations de la résistivité ρ , à débit dopant constant, en fonction des débits de SiHCl_3 et de H_2 vecteur.



Resistivity of silicon at room temperature as a function of acceptor or donor impurity concentration.⁴

Fig. 1 - 3 : Résistivité ρ de la couche épitaxiée fonction de la concentration C en dopant.

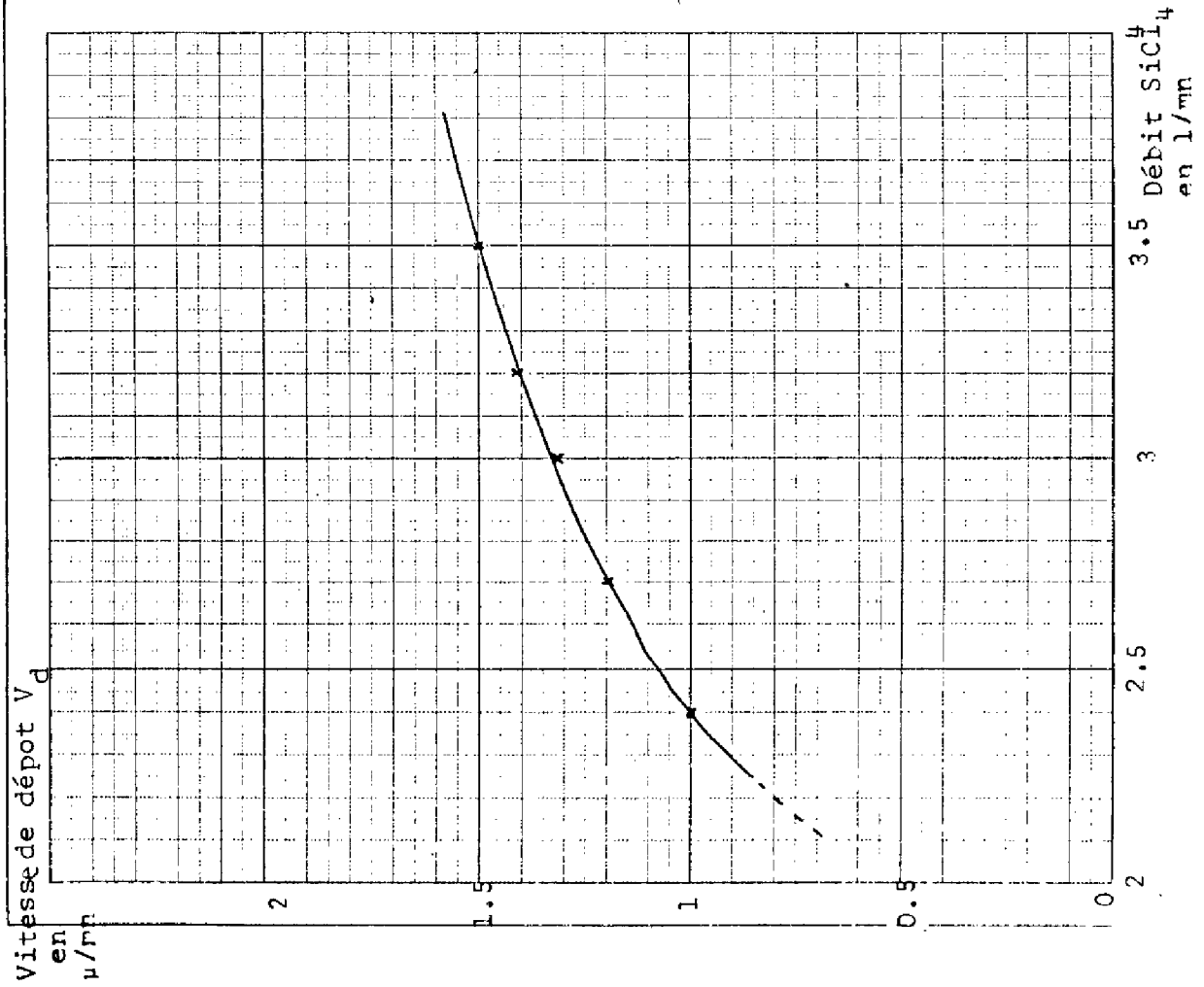


Figure 1-4 :

Relation entre V_d et débit $SiCl_4$, avec débit H_2 : 80 l/mn
(Température : 1050°C)

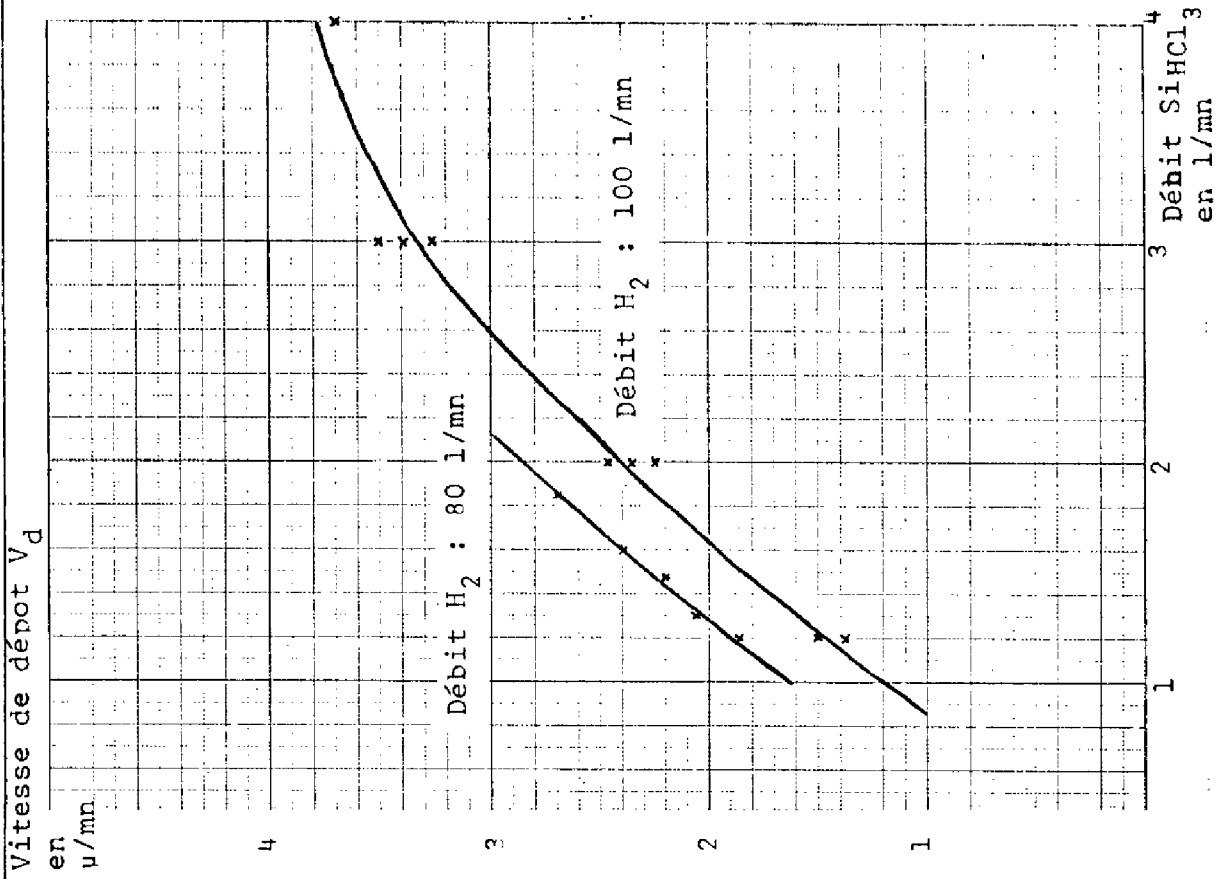


Figure 1-5 :

Relation entre V_d et débit de $SiHCl_3$
à différents débits H_2 (four 1) - Température : 1100°C

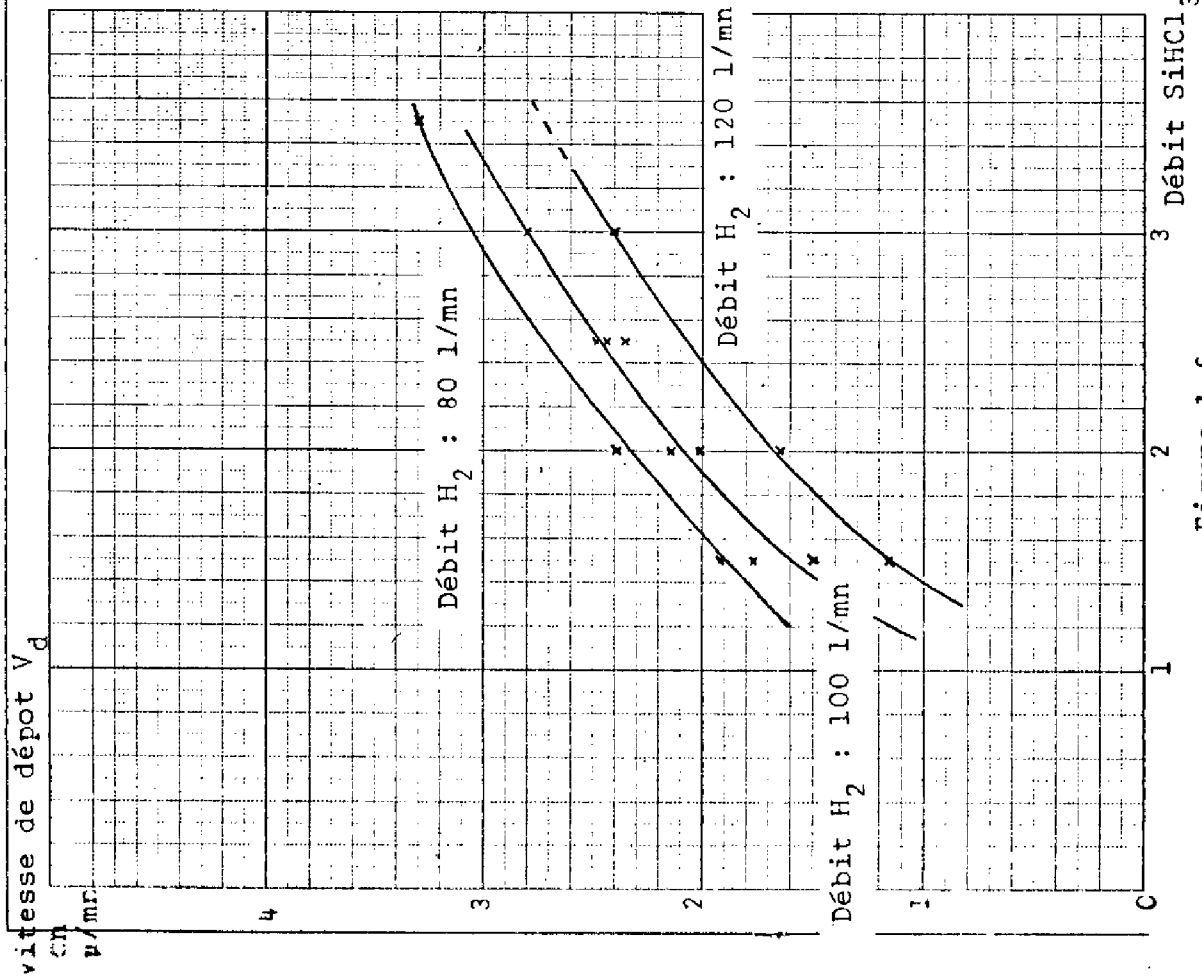


Figure 1-6
Relation entre V_d et le débit de SiHCl_3 , à différents débits de H_2 . Four 2. Température : 1100°C .

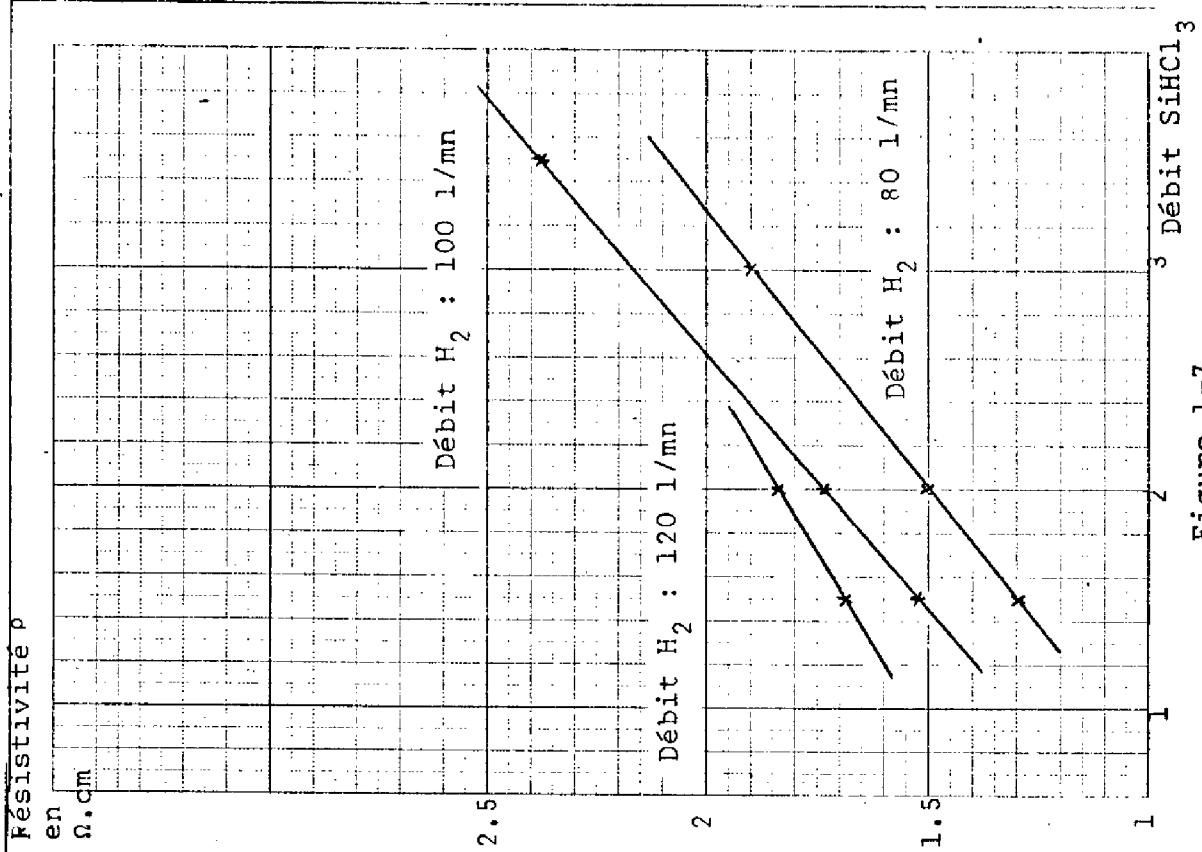


Figure 1-7
Relation entre la résistivité et le débit de SiHCl_3 . A. débit dopant constant (20 l/mn). Four 2. Température : 1100°C .

12.2 - CONTRAINTES DE MODELISATION :

- évolutivité du processus
- présence de bruits
- présence de débits imposés

Rappelons tout d'abord la première contrainte de modélisation, essentielle : l'impossibilité de mesurer épaisseur et résistivité des plaquettes en cours de réaction interdit toute commande en boucle fermée au niveau d'une manipulation. Par contre, il est possible (et c'est ce que nous ferons), de réaliser une commande en boucle fermée au niveau de plusieurs manipulations consécutives (§ 12.1).

12.21 - Evolutivité du processus :

Comme nous l'avons déjà vu, une des caractéristiques du processus est d'être évolutif, puisque les pressions et les concentrations du gaz varient lentement au cours d'une série de manipulations.

Ainsi, par exemple, une bouteille de tétra-chlorure de silicium voit sa pression diminuer progressivement au cours d'une série de cent opérations. Par contre, un changement de bouteille de SiCl_4 entraînera une brusque variation de la vitesse de dépôt, et donc une perturbation importante (mais très localisée) des caractéristiques du processus.

De même, pour la température, par exemple, le miroir du pyromètre optique se salit progressivement, créant ainsi un biais dans la mesure des températures ; lorsque le miroir est nettoyé, il y a une perturbation nette, dont l'amplitude n'est pas plus prévisible que lors d'un changement de bouteille de SiCl_4 . Il y a encore d'autres causes de dérives du processus, plus ou moins décelables ou explicables (par exemple : le long d'une semaine, avec réinitialisation après un temps d'arrêt prolongé dû au week-end).

Toutes ces évolutions, assez lentes, suivies de plus, en général, de sauts plus importants, nécessitent un algorithme de commande qui puisse s'adapter à l'état du système.

12.22 - Présence de bruits :

De plus, il y a de nombreux facteurs impondérables ; citons, par exemple, la position exacte du susceptible dans le four, la position des plaquettes sur le susceptible, l'état de pureté des gaz injectés, leur température avant d'entrer dans le four, la propreté des débitmètres à billes, la température exacte du four ... voire même l'opérateur lui-même, et le soin qu'il aura mis à préparer les plaquettes ... Il est donc indispensable de mettre au point une méthode de commande qui filtre au maximum tous ces impondérables qui influent de façon quelquefois notoire sur les résultats.

12.23 - Présence de débits imposés :

Enfin, les ingénieurs de la R.T.C. souhaitaient conserver le même type de commande que précédemment : ayant fixé certaines grandeurs (température, inclinaison du susceptible ...), il faut pouvoir choisir les débits de SiCl_4 (DSI) et d' "hydrogène vecteur" DH_2 ; alors seulement, l'algorithme de commande doit leur permettre de calculer les débits de gaz dopants (DD) et la durée T du dépôt épitaxial qu'il faut afficher pour obtenir une épaisseur et une résistivité moyennes souhaitées, en fonction des manipulations précédentes. Il est alors nécessaire de pouvoir, le cas échéant, refaire le calcul du débit dopant et de la durée du dépôt pour un autre couple de valeurs (DSI, DH_2) (si, par exemple, le débit dopant ou la durée ont un ordre de grandeur incompatible avec certains impératifs physiques).

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE :

Nous avons présenté le processus industriel servant de base à notre étude. Nous avons insisté sur les points qui ont eu une influence directe sur la modélisation que nous allons entreprendre. Certaines de ces informations seront modifiées par la présence de l'automatisation de la commande : c'est le cas, en particulier, des instruments de mesure, et des méthodes permettant de calculer les consignes à afficher à l'entrée du réacteur. Mais cette étude était nécessaire pour comprendre la forme de la modélisation choisie, et pour justifier les innovations théoriques que nous avons dû apporter dans cette modélisation.

Nous pouvons donc maintenant aborder la description de la commande mise en oeuvre : d'abord, bien sûr, l'aspect théorique, qui dépasse largement le cadre de l'épitaxie, puis l'aspect pratique, qui précisera d'une part ce qui ne s'applique qu'au processus étudié, et d'autre part la réalisation de la commande.

D E U X I E M E P A R T I E

COMMANDE AUTO-ADAPTATIVE : THEORIE

- 21 - MODELISATION ET COMMANDE
- 22 - ETUDE ET UTILISATION DU FILTRAGE
DE KALMAN-BUCY

Ce chapitre, bien que suscité par la recherche d'une commande applicable au réacteur d'épitaxie, revêt un caractère très général . Cependant, lorsque cela était nécessaire pour faciliter la compréhension de l'exposé, nous n'avons pas hésité à préciser le nom qu'auront les variables employées dans l'application envisagée, ce qui ne diminue en rien la généralité de l'étude .

Par ailleurs, pour plus de clarté, nous n'avons pas représenté les blocs de mesure dans les schémas illustrant les différentes méthodes de modélisation utilisées .

21 - M O D E L I S A T I O N E T C O M M A N D E :

Le mécanisme de modélisation a été élaboré en quatre étapes essentielles, qu'il est préférable de reprendre .

21.1 - P R E M I E R E E T A P E

Pour tenir compte de l'aspect évolutif des caractéristiques du réacteur, nous avons été amenés à choisir une identification paramétrique adaptative, avec modèle, du processus, suivant la figure 2-1 (p.34) [2.1] , [2.2] .

Ainsi, ayant une structure de modèle représentant le processus, nous pouvons calculer les sorties $\hat{s}$ du modèle, en fonction des entrées c soumises au processus, et des valeurs numériques des paramètres du modèle. La comparaison de ces sorties calculées avec les sorties mesurées du processus, s , nous permet :

. de juger de la qualité de la simulation pour la manipulation qui vient de se faire, c'est-à-dire de juger de l'ensemble structure du modèle - valeurs numériques des coefficients du modèle, sans d'ailleurs qu'il soit possible de dissocier l'une des autres : la simulation sera, en effet, d'autant meilleure que l'"erreur" $\tilde{s} = s - \hat{s}$ sera faible (à la limite, une composante de l'erreur nulle montrerait une identification parfaite, relativement à cette composante et à la manipulation en question).

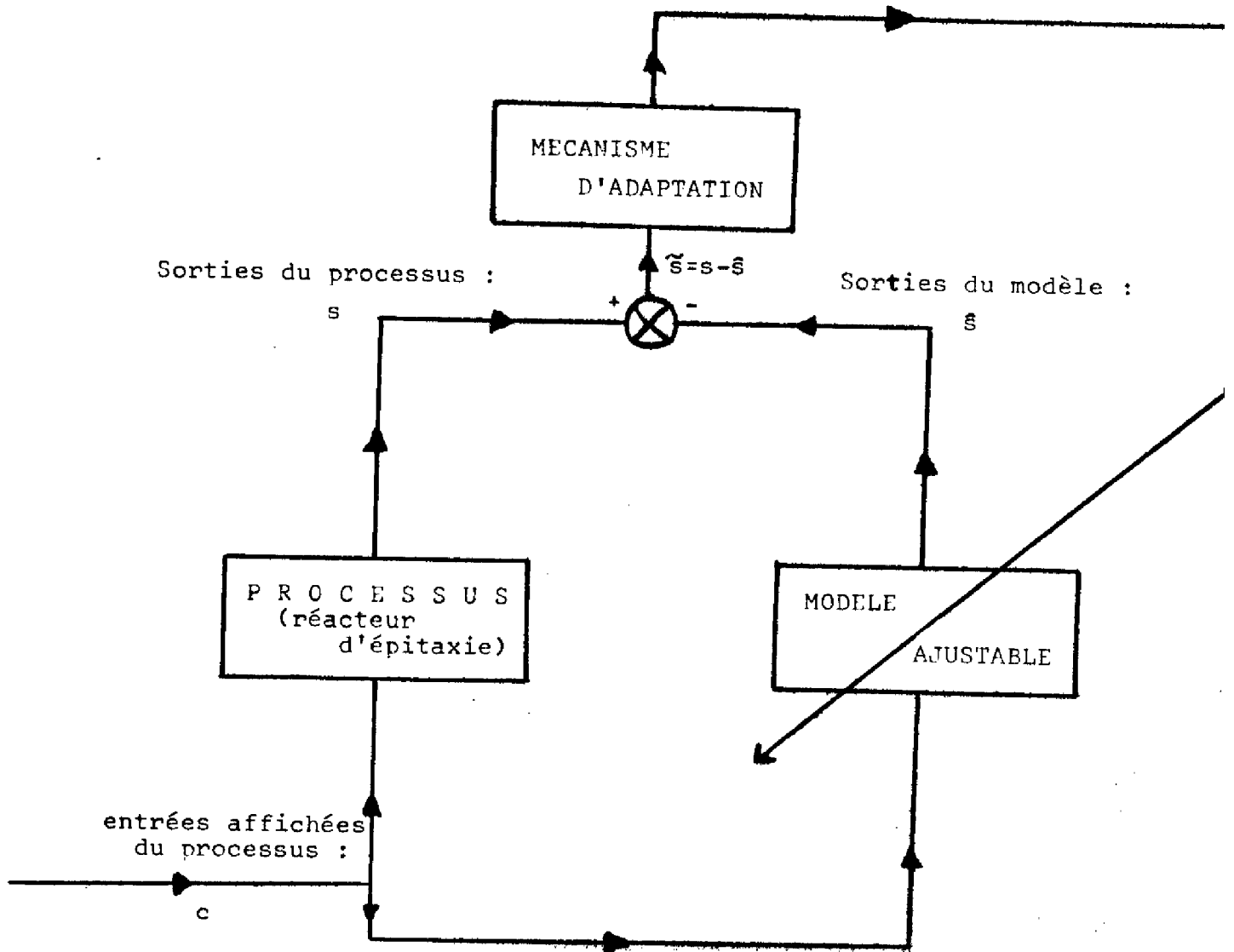


Figure 2-1 :
Principe de la modélisation auto-adaptative
(c , s , $\hat{s}$, $\tilde{s}$ sont vectoriels)

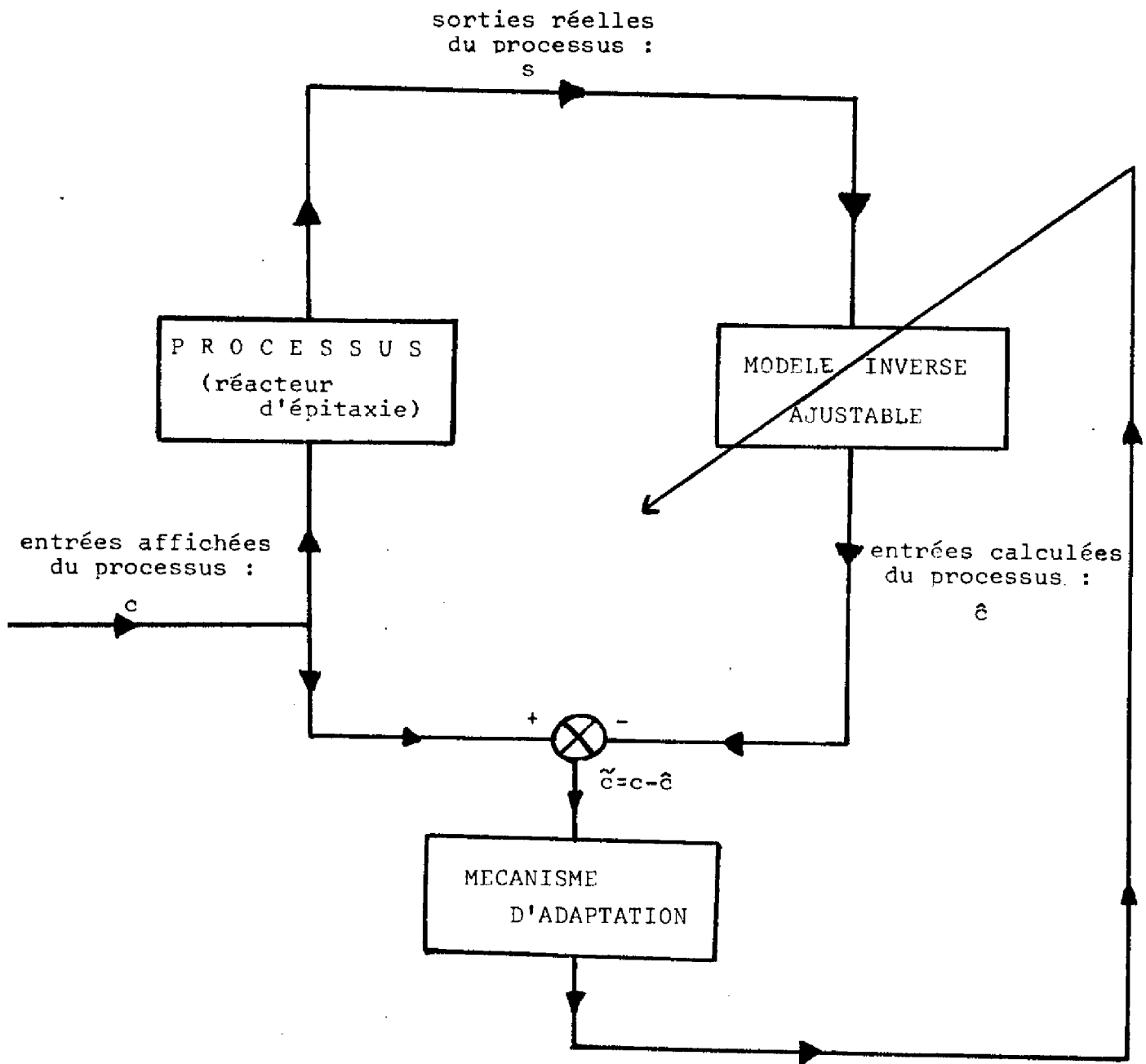


Figure 2-2 :
Principe de l'identification d'un modèle,
inverse d'un processus .

. de réajuster les coefficients du modèle, pour que celui-ci soit le plus proche possible du processus. Ce deuxième point consiste donc à se servir de l'information constituée par les résultats d'une nouvelle manipulation pour affiner notre connaissance de l'état du processus, et adapter les valeurs numériques des coefficients du modèle à celui-ci.

De plus, une fois le réajustement du modèle effectué, il sera possible de calculer les sorties du modèle (qui sont donc les sorties prévues du processus), correspondant à telles ou telles entrées. Cela permettra alors de calculer les consignes qu'il faudrait afficher à l'entrée du processus pour obtenir les sorties souhaitées, soit par inversion du modèle lorsque cela est possible, soit par une série d'itérations successives.

21.2 - DEUXIEME ETAPE :

Cependant, notre problème concerne le calcul des variables de commande, et non l'identification proprement dite. Or, il apparaît que la méthode utilisée lors de la première étape nécessite pour cela l'inversion du modèle, ou, à défaut d'inversion, une série d'itérations pour aboutir aux sorties désirées . Ce qui est préjudiciable, tant à la précision de l'ensemble, qu'au temps de calcul nécessaire .

Pour résoudre ce problème, il nous a semblé préférable de transformer la méthode précédente, pour établir dorénavant non pas le modèle du processus, mais le modèle du processus inverse, comme le montre la figure 2.2 (p.35) [2.5] .

Le modèle auto-adaptif ne représente alors plus le processus, comme il est le plus courant, mais une entité sans réalité physique, qui aurait pour entrées les sorties du processus réel, et pour sorties les entrées de ce processus.

Un tel système est beaucoup plus abstrait que le précédent, plus délicat à percevoir, et beaucoup moins classique. Il a cependant l'avantage de permettre le calcul direct et facile des variables de commande, qui doit maintenant être effectué suivant la figure 2.3 :

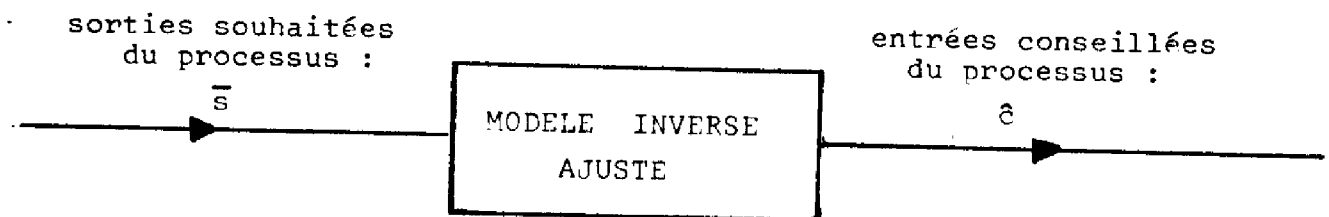


Figure 2-3 :
Calcul des variables de commande .

Bien sûr, la commande sera d'autant meilleure que le modèle inverse sera bien ajusté. Il est évident que, pour un processus évolutif (ce qui est le cas pour nous), la commande a nécessairement un temps de retard, puisque l'on ne tient compte que de l'état du processus avant la manipulation dont on calcule les variables de commande. Ceci montre que la méthode utilisée ne sera pleinement valable que pour les processus peu évolutifs (ou du moins à évolution lente, ou stationnaires). Pour un processus qui se modifierait de façon importante à chaque manipulation, il faudrait bien sûr anticiper cette évolution ; ce qui n'est pas envisagé dans le présent travail, vu les caractéristiques d'évolution en général lente du processus étudié.

Remarquons que beaucoup de processus ne nécessitent pas une telle inversion (et c'est sans doute ce qui explique qu'elle n'ait encore jamais été utilisée). En effet, lorsque le modèle est facilement inversible, la modélisation de l'inverse du processus ne présente pas plus d'intérêt que celle du processus.

Nous avons choisi cette méthode, bien qu'elle ne soit pas indispensable dans notre application (puisque le modèle retenu est inversible), de façon à tester une nouvelle méthode de modélisation auto-adaptative, applicable à des processus plus généraux et plus complexes.

Cette méthode est largement suffisante dans la plupart des cas d'utilisation. Cependant, elle ne permet pas de tenir compte du fait que certaines entrées du processus doivent être imposées par l'opérateur. Ce nouveau problème nous a amenés à élaborer la méthode suivante :

21.3 - TROISIEME METHODE :

En effet, pour réduire les écarts en épaisseur ou en résistivité des couches épitaxiées, l'opérateur peut être amené à modifier le débit d'hydrogène "vecteur" (DH2). Ceci, bien sûr, change les valeurs moyennes en épaisseur et résistivité, et doit donc être pris en compte par le modèle. Il est donc indispensable que ce débit, qui est un paramètre d'entrée du processus, soit aussi un paramètre d'entrée du modèle, ce qui transforme alors la signification qui avait été donnée au modèle.

De la même façon, l'opérateur peut être amené à modifier le débit de SiHCl_3 (DSI) ; en effet, ce débit est en relation directe avec la vitesse de dépôt, qui doit être augmentée pour les fortes épaisseurs, et diminuée pour les faibles épaisseurs, de façon à conserver, dans la mesure du possible, une durée de dépôt épitaxial comprise entre cinq et vingt minutes. Ce débit doit donc être aussi en entrée, à la fois du processus et du modèle.

Ces considérations nous ont amenés à l'organigramme d'adaptation de la figure 2.4, dans laquelle nous avons :
 $c = (DD, T)^t$, $d = (DSI, DH2)^t$, et $s = (e, \rho)^t$.

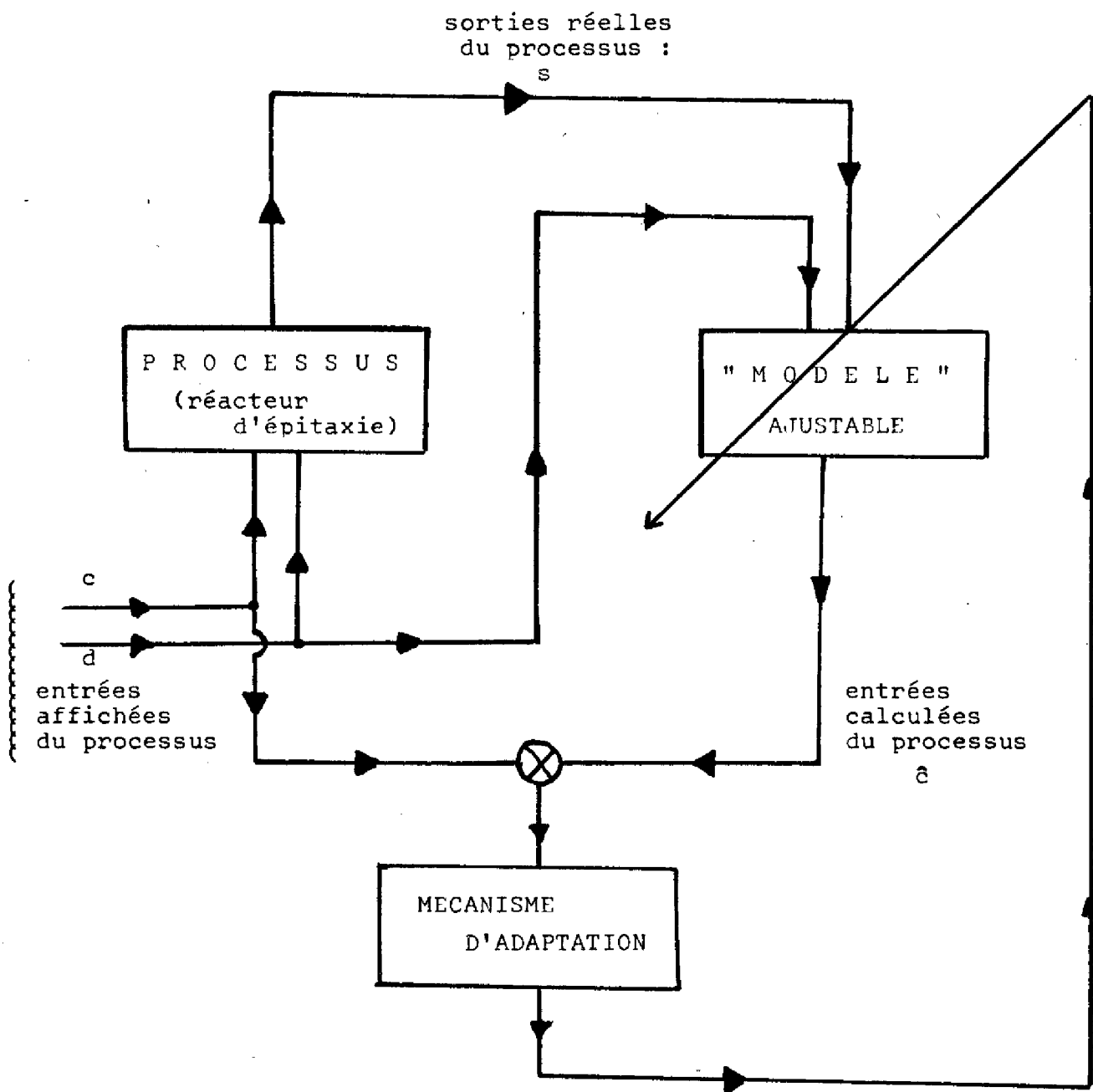


Figure 2-4 :
Identification .

Le calcul des variables de consigne s'effectuera alors très simplement, suivant le schéma de la figure 2.5 :

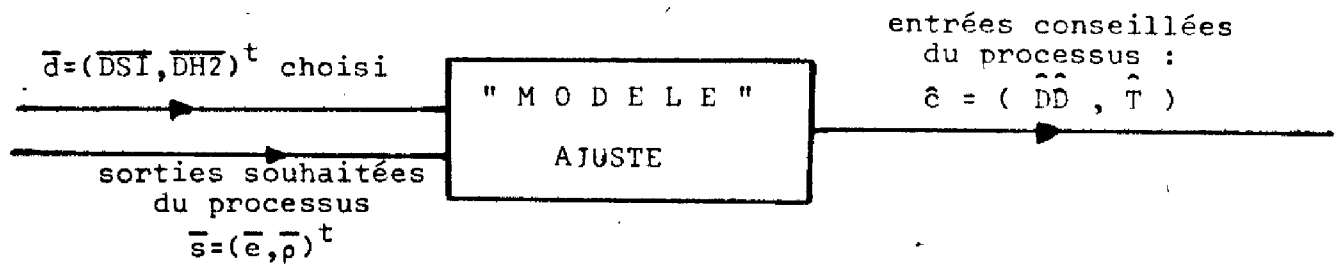


Figure 2-5 :
Calcul des variables de commande

Tous ces calculs (nécessaires à l'identification et à la commande) peuvent être effectués entre deux manipulations consécutives ; il est alors possible d'afficher les entrées "conseillées", ce qui réalise une commande en temps réel, sur le site. Ils peuvent aussi être effectués après une série de manipulations, constituant alors une simulation, hors ligne. Dans ce cas, on ne peut, bien sûr, envisager d'afficher les consignes fournies par le modèle, et certains problèmes de convergence ne peuvent être étudiés. Il est aussi très possible d'effectuer une simulation en même temps qu'une commande en temps réel, l'opérateur choisissant alors les résultats qui lui semblent les plus appropriés, parmi ceux fournis par les diverses identifications (qui peuvent être, par exemple, des essais d'initialisations différentes, ou même de modèles différents) .

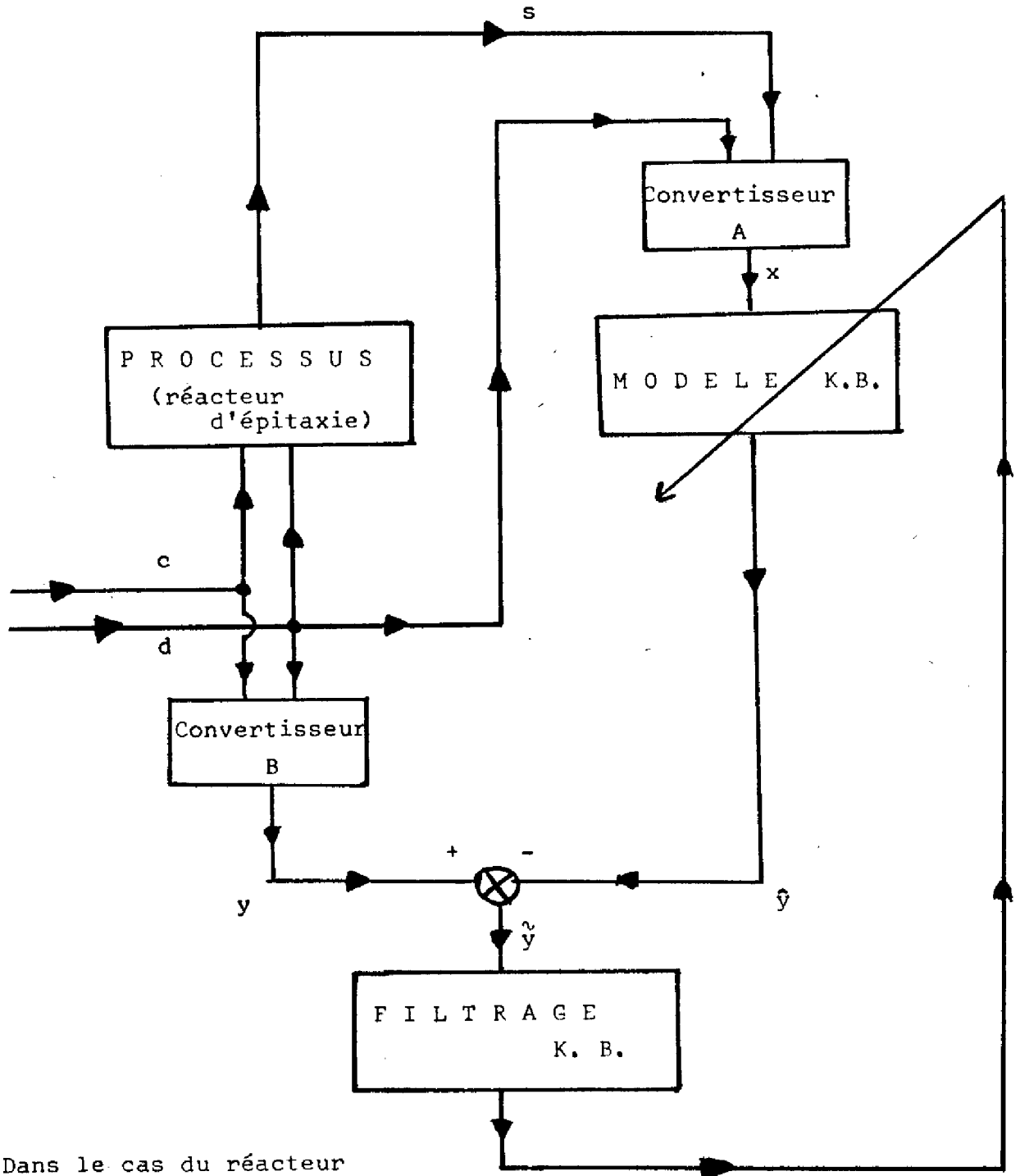
Cette méthode est très générale, puisque le mécanisme d'adaptation peut être quelconque, le modèle linéaire ou non. Elle permet le calcul (moyennant un modèle adéquat) de certaines variables de commande, d'autres étant éventuellement choisies au préalable, pour obtenir la réalisation d'un critère quelconque (ici, les caractéristiques de la couche épitaxiale). De plus, elle peut faciliter l'étude éventuelle de l'influence exacte de tel ou tel paramètre.

21.4 - QUATRIEME ETAPE :

Enfin, il nous fallait choisir un mécanisme d'adaptation qui réponde au mieux aux impératifs du réacteur d'épitaxie. Nous avons choisi le filtrage de Kalman-Bucy (K.B.) puisqu'il nous permet de filtrer les bruits inhérents au processus et aux mesures (ainsi que ceux liés à l'imperfection du modèle), tout en possédant, grâce aux matrices de covariance, une assez grande souplesse d'utilisation.

A cet effet, nous verrons plus loin (§ 31) que les variables c , d , et s du processus ne pouvaient être directement utilisées pour le filtrage K.B. . Nous avons donc repris l'organigramme précédent, pour y préciser l'algorithme d'adaptation, en introduisant les quantités vectorielles x et y , entrées et sorties du modèle propre au filtrage K.B. (nous verrons au § 31 que, dans notre cas d'étude, nous avons $x = (\log p, \frac{DH_2}{DSI} \cdot e, 1)^t$ et $y = (\log \frac{DD}{DSI}, T)^t$).

Tout ceci est synthétisé par la figure 2.6, où les "convertisseurs" A et B transforment respectivement (c, d) en y , et (s, d) en x .



Dans le cas du réacteur d'épitaxie, nous aurons :

$$c = (DD, T)^t$$

$$d = (DSI, DH2)^t$$

$$s = (e, \rho)^t$$

$$x = (\log \rho, \frac{DH2}{DSI} \cdot e, 1)^t$$

$$y = (\log \frac{DD}{DSI}, T)^t$$

Figure 2-6 :
Identification, par filtrage de KALMAN-BUCY

Le calcul des variables de commande se fera alors de la manière indiquée par la figure 2-7 :

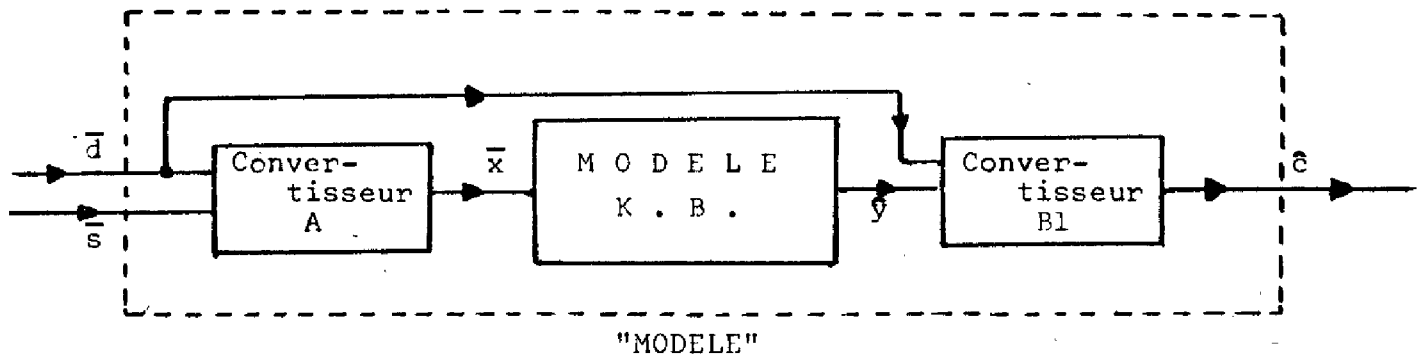


Figure 2-7 :
Calcul des variables de commande .

Ces deux schémas paraissent plus compliqués que ceux des figures 2.4 et 2.5. En réalité, ils ne font que préciser le "mécanisme de filtrage", avec ses entrées et ses sorties propres. C'est pourquoi, nous ferons référence tantôt au modèle décrit au § 21.3, alors appelé "modèle", tantôt à sa version propre au filtrage K.B., auquel cas nous parlerons du modèle K.B.. La figure 2.7 montre d'ailleurs bien la relation entre ces deux modèles. Il convient, en effet, de ne pas confondre y et c : c correspond à la sortie du "modèle", exprimée en variables propres au processus (dans notre application, nous aurons $c = (DD, T)^t$), tandis que y correspond à la sortie du modèle K.B., exprimée donc dans les variables propres au modèle K.B. (dans notre application particulière, nous aurons $y = (\log \frac{DD}{DSI}, T)^t$).

22 - ETUDE ET UTILISATION DU FILTRAGE DE KALMAN - BUCY :

- Eléments théoriques
- Utilisation et extension du filtrage K.B.

Nous avons défini la méthode que nous utiliserons pour réaliser la commande du processus ; nous devons maintenant préciser le problème du filtrage proprement dit, qui est le pivot de la modélisation. Nous nous attacherons dans un premier temps à la théorie générale du filtrage K.B. ; ensuite, nous préciserons les extensions que nous avons été amenés à effectuer pour que l'ensemble du filtrage forme un bon mécanisme d'adaptation .

22.1 - ELEMENTS THEORIQUES :

- Présentation du filtrage
- Filtrage multi-entrées, multi-sorties
- Evaluation hors-ligne de P et R

22.11 - Présentation du filtrage :

- Estimation du vecteur d'état
- Identification des paramètres

22.11.1 - Estimation du vecteur d'état :

Le filtrage de Kalman-Bucy (K.B.) a été élaboré pour permettre d'évaluer le vecteur d'état d'un système, lorsque celui-ci n'était pas directement mesurable . Cette méthode étant maintenant bien connue, nous nous contenterons d'en rappeler les principaux résultats ; le lecteur désireux d'en approfondir les tenants et les aboutissants pourra se reporter, en particulier, aux références [3.1] , [3.2] , [3.3] , [3.4] de la bibliographie .

Il s'agit d'estimer, à chaque itération, les composantes du vecteur d'état x_k , défini par les relations vectorielles :

$$\begin{cases} x_{k+1} = \phi_k x_k + \Gamma_k u_k + v_k \\ y_k = H_k x_k + w_k \end{cases} \quad (1)$$

où u_k est la mesure, connue, de l'entrée du processus ($u_k \in \mathbb{R}^m$)
 y_k est la mesure connue, de la sortie du processus ($y_k \in \mathbb{R}^p$)
 x_k est le vecteur d'état à identifier ($x_k \in \mathbb{R}^n$)
 v_k et w_k sont des variables aléatoires, de distribution gaussienne, de moyenne nulle, de variance Q et R . Elles correspondent aux bruits de mesure affectant les sorties et les entrées du processus ; les suites $(v_k)_{k \in \mathbb{N}}$ et $(w_k)_{k \in \mathbb{N}}$ étant indépendantes, et indépendantes entre elles . ($v_k \in \mathbb{R}^n$, $w_k \in \mathbb{R}^p$)
 ϕ_k , Γ_k , H_k sont des matrices (de dimensions respectives (n,n) , (n,m) , et (p,n)) , en général considérées constantes, mais qui peuvent être variables .

Il s'agit de calculer un estimateur $\hat{x}_k$ de x_k , tel que la variance de l'erreur d'estimation $\tilde{x}_k = x_k - \hat{x}_k$ soit minimale. Kalman et Bucy ont démontré que, dans ces conditions, $\hat{x}_k$ est donné par les relations récurrentes suivantes :

$$\hat{x}_{k+1} = \Phi_k \hat{x}_k + \Gamma_k u_k + G_k (y_k - H_k \hat{x}_k)$$

le gain G_k étant calculé par la relation :

$$(1bis) \quad G_k = \Phi_k P_k H_k^t \cdot [H_k P_k H_k^t + R_k]^{-1}$$

où P_k est la matrice de covariance de l'erreur de prédiction $\tilde{x}_k = x_k - \hat{x}_k$, qui est de plus donnée par la formule récurrente suivante :

$$P_{k+1} = \Phi_k P_k \Phi_k^t + Q_k - \Phi_k P_k H_k^t \cdot [H_k P_k H_k^t + R]^{-1} \cdot H_k P_k \Phi_k^t$$

Pour calculer $\hat{x}_k$, il est donc nécessaire d'initialiser x_0 ainsi que P_0 ; il faut de plus évaluer les matrices Q et R ; il est alors possible de calculer la covariance P_{k+1} pour l'itération suivante ainsi que $\hat{x}_{k+1}$ (en tenant compte alors des entrées u_k du processus et des observations mesurées y_k en sorties.

On peut, à ce sujet, remarquer que P_k et G_k ne dépendent pas des observations (u_k, y_k). Ils peuvent être précalculés, ce qui présente l'avantage de pouvoir connaître d'avance leur évolution.

22.11.2 - Identification des paramètres :

Mais notre problème n'est pas relatif à l'estimation d'un vecteur d'état inaccessible, mais à l'identification des coefficients du modèle étudié. Il nous faut donc transformer les notations précédentes, de façon à estimer le vecteur θ_k , dont les composantes sont les coefficients variables du modèle utilisé ; l'identification doit se faire compte tenu des données relatives à chaque itération, c'est-à-dire x_k et y_k .

Reprenons donc les équations (1) en changeant x_k en θ_k , et prenons $\Phi_k = I$ (matrice identité) et $\Gamma_k = 0$ (matrice nulle). Nous obtenons alors [3.4] :

$$\begin{aligned} \theta_{k+1} &= \theta_k + v_k \\ \text{et} \quad y_k &= H_k \theta_k + w_k \end{aligned} \quad (2)$$

Ainsi, la première équation est relative à l'évolution de des coefficients du modèle, la seconde exprime l'équation du modèle proprement dit.

Il faut encore exprimer H_k en fonction de x_k . Le plus simple, et c'est ce qui est fait d'ordinaire, est de poser $H_k = x_k^t$, ce qui impose à y_k et donc à w_k d'être scalaire (nous les noterons alors y'_k et w'_k). Nous verrons au paragraphe suivant comment remédier à cet inconvénient.

Les équations (2) deviennent ainsi :

$$\begin{cases} \theta_{k+1} = \theta_k + v_k \\ y'_k = x_k^t \theta_k + w'_k \end{cases} \quad (2\text{bis})$$

Les équations du filtre s'écrivent alors :

$$\begin{cases} \theta_{k+1} = \theta_k + G_k \cdot (y_k - x_k^t \theta_k) \\ G_k = P_k x_k \cdot x_k^t P_k x_k + R^{-1} \\ P_{k+1} = P_k + Q - G_k x_k^t P_k \end{cases} \quad (2\text{ter})$$

Notons que, dans ce cas, P_k (et G_k) dépendent de p_0 , et des observations x_k (outre les matrices Q et R), mais absolument pas de l'estimation $\hat{\theta}_k$ de θ_k , ou de l'erreur de prévision ($\hat{y}_k = y_k - x_k^t \theta_k$). Ceci peut être un inconvénient, et nous verrons plus loin (§ 22.22 p.59) comment, éventuellement, y remédier.

Pour mettre en oeuvre ce procédé de filtrage, il est nécessaire de poser, avant la première itération, les valeurs des matrices de covariance Q et R , ainsi qu'une initialisation de P et $\hat{\theta}$. Du choix des valeurs numériques de ces paramètres, dépendra l'optimalité, la qualité et la précision de l'ensemble du filtrage, et, par voie de conséquence, de l'identification et de la commande.

22.12 - FILTRAGE MULTI-ENTREES, MULTI-SORTIES :

Pour l'identification de paramètres, x et θ sont d'ordinaire considérés comme des vecteurs, et par conséquent y est scalaire. Comme nous le verrons plus loin, nous avons besoin de deux composantes en y (correspondant l'une au débit du gaz dopant, l'autre à la durée du dépôt). Nous pouvons donc envisager deux modélisations totalement indépendantes :

$$\begin{aligned} y_1 &= x_1^t \theta^1 + w_1 & \text{avec} & \quad \theta_{k+1}^1 = \theta_k^1 + v_k^1 \\ \text{et} \quad y_2 &= x_2^t \theta^2 + w_2 & \text{avec} & \quad \theta_{k+1}^2 = \theta_k^2 + v_k^2 \end{aligned}$$

Cependant, ceci présentait le grave inconvénient de ne pas permettre de coupler les composantes des bruits v^1 et v^2 entre elles (il est aussi impossible de coupler les composantes de θ^1 avec celles de θ^2). Pour y remédier, nous ne pouvons pas prendre θ matriciel (en effet, θ est le "vecteur d'état" du système, et la théorie due à Kalman et Bucy s'appuie sur l'aspect vectoriel de cet élément). Il nous a donc fallu biaiser ce problème, ce qui a été possible en considérant θ comme un unique vecteur, dont les composantes sont celles de θ^1 et θ^2 : $\theta = (\theta^1{}^t, \theta^2{}^t)^t$; le vecteur x devenant alors une matrice, X , constituée de la manière suivante :

$$X = \begin{Bmatrix} x_1^t & 0^2{}^t \\ 0^1{}^t & x_2^t \end{Bmatrix} \quad \text{où } 0^1 \text{ et } 0^2 \text{ sont des vecteurs}$$

nuls, de mêmes dimensions respectives que x^1 et x^2 ; le vecteur y est donc égal à $(y_1, y_2)^t$ et le vecteur w est égal à $(w_1, w_2)^t$. Le modèle s'écrit alors :

$$\begin{cases} y_k = X_k \theta_k + w_k \\ \theta_{k+1} = \theta_k + v_k \end{cases} \quad (3)$$

et les opérations de filtrage :

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k + G_k \cdot (y_k - X_k \hat{\theta}_k) \\ G_k = P_k X_k^t \cdot \left(X_k P_k X_k^t + R \right)^{-1} \\ P_{k+1} = P_k + Q - G_k X_k P_k \end{array} \right. \quad (3bis)$$

Les covariances croisées interviennent directement dans le calcul de l'estimateur $\hat{\theta}$ de θ : elles sont, en effet, d'une part dans la matrice R (éléments non diagonaux), et d'autre part dans la matrice P_k (éléments non situés sur les blocs diagonaux). La position et le nombre de 0 de X n'élimine pas l'influence de ces termes.

Lorsque les x^i se rapportent aux mêmes variables, et sont donc égaux, il est possible d'utiliser une écriture plus naturelle, mais pas directement exploitable pour le filtrage considéré. Soit, en effet, $\Theta = (\theta^1 \theta^2)$ la matrice dont les colonnes sont les vecteurs θ^i , et $x = x^i$. Le système précédent peut alors s'écrire :

$$y^t = x^t \cdot \Theta + w^t \quad (4)$$

expression plus visuelle et plus synthétique que la précédente, que nous utiliserons chaque fois que cela sera possible.

Dans notre étude particulière, le vecteur y n'a que deux composantes, et chacun des vecteurs x^1 et x^2 en a trois. Mais tout ceci reste valable pour un nombre quelconque de composantes, tant pour y que pour chaque x^i .

22.13 - Evaluation hors-ligne de P et R :

- Influence de P et R
- Evaluation classique de P et R
- Généralisation

22.13.1 - Influence de P et R :

Comme nous l'avons vu plus haut (§ 22.11, p.44), la qualité de la commande dépend beaucoup des valeurs attribuées aux matrices de covariance P, Q, et R.

Analysons l'influence de ces trois paramètres matriciels sur l'évolution du filtrage.

A chaque itération, l'erreur de prédiction sur y , $\tilde{y}_k = y_k - x_k \theta_k$, sert à réajuster le vecteur θ_k (équations 3 et 3bis, p.48). Cette "erreur" peut être attribuée uniquement au bruit w_k et pas du tout à une mauvaise évaluation $\hat{\theta}_k$ de θ_k , auquel cas $\hat{\theta}_k$ n'est pas modifié (dans l'équation du filtrage, on a bien G_k nul lorsque P_k est nul) ; elle peut, au contraire, être attribuée uniquement à une mauvaise évaluation $\hat{\theta}_k$ de θ_k , et pas du tout au bruit w_k , auquel cas $\hat{\theta}_k$ est modifié de telle façon que l'on ait exactement $y_k = x_k \hat{\theta}_{k+1}$; le plus généralement, bien sûr, l' "erreur" de prévision est attribuée en partie au bruit w_k , et en partie à une mauvaise évaluation de θ_k . Ces deux cas extrêmes montrent bien l'influence des coefficients des matrices P et R : si R (ou, du moins, une de ses composantes) est trop important, la modification de $\hat{\theta}_k$ sera trop faible (ou sur celles de ses composantes concernées) ; si certaines composantes de P sont trop fortes, les modifications des composantes correspondantes de $\hat{\theta}$ seront trop fortes. L'influence de P et R est donc contradictoire. Il faut remarquer de plus qu'une mauvaise évaluation de P_k et de R influe sur le calcul de P_{k+1} .

Quant à Q, matrice de covariance de v_k , elle exprime la mobilité de θ et vient donc s'ajouter à P à chaque étape.

Toutes ces considérations (ainsi d'ailleurs que les simulations effectuées) nous amènent à évaluer, le plus précisément possible, les coefficients de P , Q , et R . Il est bien sûr souvent possible d'en prévoir l'ordre de grandeur par des considérations théoriques propres au modèle étudié (c'est ce qui sera fait au § 31.3). Il nous a cependant semblé utile de pouvoir en avoir une évaluation générale, indépendamment de ces considérations propres au modèle.

22.13.2 - Evaluation classique de P et R :

Nous avons vu au § 12.21 que le processus auquel nous nous sommes attachés est peu évolutif. C'est pourquoi, il nous a semblé possible d'utiliser les résultats théoriques exposés en [4.1]. Dans ce livre, Anderson donne une évaluation de θ , P , et R par la méthode du maximum de vraisemblance, lorsque le processus est invariant ($Q = 0$). La démonstration des résultats obtenus, adaptée à notre étude, est reprise en Annexe 2. Ceci nous a permis d'avoir une borne supérieure de P et de R (les différences dues aux variations de θ sont, en effet, interprétées ici comme dues à une mauvaise connaissance de θ , et à un bruit w important). A quelques détails près, les valeurs ainsi trouvées ont confirmé ce que les nombreuses simulations faites auparavant nous avaient indiqué.

Ainsi, lorsque Q est nul, une estimation de la matrice Θ est donnée par :

$$\Theta = B \cdot A^{-1}$$

où

$$B = \sum_{k=1}^N x_k y_k^t$$

et

$$A = \sum_{k=1}^N x_k x_k^t$$

(5)

(évaluation faite sur N itérations).

De plus, $\hat{R}$ et P sont donnés par les relations :

$$\hat{R} = (R_{ij}) = \frac{1}{N-1} (y_k - \Theta^t x_k) \cdot (y_k - \Theta^t x_k)^t$$

et

$$P = \begin{Bmatrix} \hat{R}_{11} A^{-1} & \hat{R}_{21} A^{-1} \\ \hat{R}_{12} A^{-1} & \hat{R}_{22} A^{-1} \end{Bmatrix} \quad (\text{lorsque } y_k \text{ a deux composantes})$$

On peut remarquer que ces calculs peuvent se faire en ligne (bien qu'ils supposent la connaissance de plusieurs itérations précédentes), permettant alors d'améliorer la valeur de R à chaque étape. Comme Θ et P sont, de toutes façons, réajustées à chaque étape par le filtrage de K.B., plus performant (parce que tenant compte de Q), cela nous a semblé, en général, inutile pour P et Θ .

22.13.3 - Généralisation :

L'évaluation précédente présente un inconvénient dans le cas où certains éléments de Θ doivent être nuls ; l'évaluation par la méthode du maximum de vraisemblance exposée ne peut pas tenir compte de cette connaissance, pourtant importante ; il est donc normal que ces paramètres, théoriquement nuls, soient estimés à une valeur faible, mais non nulle, ce qui introduit alors un biais dans l'évaluation des autres paramètres et de leurs covariances. Il est donc préférable de trouver un moyen permettant d'imposer la valeur 0 à certains éléments de Θ . On peut d'ailleurs remarquer qu'il sera alors facile d'imposer toute autre valeur Θ_{ij} à un élément de Θ : il suffira de retirer à la composante y_{kj} du vecteur y_k la quantité $(x_{ki} \cdot \Theta_{ij})$ et ceci pour toutes les valeurs de k .

Pour cela, écrivons le modèle sous la forme $y = X.\theta + w_k$ exposée au paragraphe précédent (équations 3 et 3bis), c'est-à-dire celle qui est propre au filtrage de Kalman-Bucy multi-entrées, multi-sorties. Dans ces conditions, on démontre que θ peut être estimé par la même relation qu'auparavant, à savoir, avec ces notations :

$$\begin{aligned} \theta &= B. A^{-1} \\ \text{où} \quad B &= \sum_{k=1}^N X_k^t y_k \\ \text{et} \quad A &= \sum_{k=1}^N X_k^t X_k \end{aligned} \quad (6)$$

$\hat{R}$ est alors donné par :

$$\hat{R} = (R_{ij}) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (y_k - X_k \theta) (y_k - X_k \theta)^t$$

Par contre, la matrice P est plus délicate à déterminer (il faut interpréter la matrice donnée en 22.13.2).

Cette méthode permet, en prenant un modèle qui ne contient plus les zéros (ou autres valeurs) supposés connus de θ , d'éviter les biais (dans notre cas d'étude, nous pourrions ainsi prendre le modèle correspondant à l'équation (2) de 31.13, au lieu de l'équation (3)). La démonstration en est faite en Annexe 3. Il faut cependant remarquer que l'on se prive alors d'une vérification facile : en effet, si les éléments, théoriquement nuls (ou à une valeur déterminée), sont estimés (par la méthode de maximum de vraisemblance) à une valeur éloignée de 0, on peut en déduire qu'il y a une erreur quelque part, probablement dans le choix du modèle. Il est donc intéressant d'utiliser successivement chacune des deux méthodes exposées (§ 22.13.2 et 22.13.3), la première permettant de vérifier la validité du modèle et d'avoir un premier ordre de grandeur des matrices étudiées, la seconde permettant d'affiner ces valeurs.

22.2 - UTILISATION ET EXTENSION DU FILTRAGE DE K.B. :

- Renseignements utiles pour le suivi de l'identification
- Réajustement du modèle, hors filtrage

22.21 - Renseignements utiles pour le suivi de l'identification :

- Calcul de Θ'
- Calcul de PREVOI

Lors des simulations et des essais en temps réel que nous avons pu faire, il nous a semblé utile de connaître un certain nombre de renseignements, dont l'exploitation nous a permis de mieux suivre l'évolution du processus, et surtout de mieux connaître la précision avec laquelle suivait le processus.

22.21.1 - Calcul de Θ' :

Considérons, à cet effet, le modèle écrit sous la forme $y^t = x^t \cdot \Theta + w^t$ (p.49) où y est un vecteur de n éléments, x un vecteur de m éléments, et Θ la matrice de dimensions (m, n) à identifier (mais tout ce qui suit reste valable même lorsque les vecteurs x^i envisagés en § 21.12, p.49 ne sont pas égaux).

Supposons que pendant m itérations consécutives Θ reste constant (appelons la alors Θ'), et que w soit nul pendant ces mêmes manipulations. Il est alors possible de calculer la valeur des $m \cdot n$ éléments de Θ' par résolution du système linéaire :

$$y_{li} = \sum_{j=1}^m x_{lj} \cdot \Theta'_{ji} \quad \begin{cases} i = 1, n \\ l = k, k-1 \dots k-n+1 \end{cases}$$

Rappelons que $\begin{cases} y_{li} \text{ désigne la } i\text{ème composante du vecteur } y_l \\ x_{lj} \text{ désigne la } j\text{ème composante du vecteur } x_l \end{cases}$

La connaissance de la matrice Θ' ainsi calculée est très précieuse pour saisir l'importance et la forme des variations de Θ (donc de $\hat{\Theta}$), ainsi que de celles de w . Dans certains cas d'utilisation, Θ' peut aussi être une bonne approche pour une éventuelle initialisation ou réinitialisation de $\hat{\Theta}$. Il faut cependant remarquer que dans le cas où y_k (resp. x_k) reste constant au cours de plusieurs itérations consécutives, les coefficients de Θ' ne sont pas significatifs (resp. pas calculables). Il n'en reste pas moins que la matrice Θ' permet de se rendre compte, par exemple, d'anomalies du processus (paramètre ayant un signe erroné ...), et ceci bien sûr d'autant plus que le bruit w (et, dans une moins grande mesure, v) est faible. Il est évident que l'interprétation dépend essentiellement du cas particulier étudié. Mais les renseignements fournis sont souvent utiles.

22.21.2 - Calcul de "PREVOI" :

Plus utile encore, et plus facile d'interprétation, est la connaissance des paramètres $\hat{c}$, $\tilde{c}$, $\underline{c}$, $\hat{s}$, $\tilde{s}$, $\underline{s}$ et $\hat{c}'$, $\tilde{c}'$, $\underline{c}'$, $\hat{s}'$, $\tilde{s}'$, $\underline{s}'$ expliqués ci-dessous.

Avant la modification du modèle due à la prise en compte des résultats relatifs à la manipulation numéro k , il est particulièrement pratique de calculer la commande $\hat{c}_k$ qui aurait été préconisée par le modèle si l'on avait souhaité obtenir les sorties du processus qui ont été mesurées pour la manipulation numéro k .

Ceci revient à effectuer le calcul correspondant au schéma 2-8 :

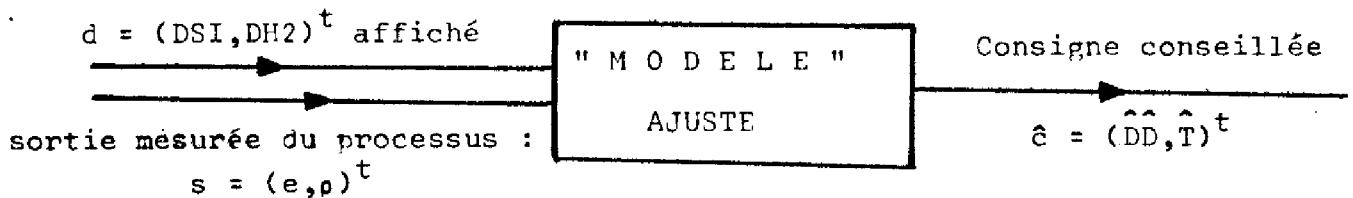


Figure 2-8 : Calcul de $\hat{c}$

Cette figure peut être rapprochée de la figure 2.5 p.40 et de la figure 2.7 p.43 .

La comparaison des valeurs ainsi obtenues avec les valeurs c_k réellement affichées à l'entrée du processus (appelons $\tilde{c}_k = c_k - \hat{c}_k$) permet d'apprécier la qualité de l'ensemble de la commande (c'est-à-dire de l'ensemble identification-calcul des consignes). En effet, $\tilde{c}_k$ (ou une de ses composantes) nul exprimerait que le modèle, estimé lors de la manipulation précédente (numéro $k-1$) correspond encore très bien à la nouvelle manipulation (numéro k) (relativement à la composante en question. Du point de vue pratique, il est préférable d'utiliser le vecteur $\tilde{c}_k$ tel que $\tilde{c}_{kj} = \frac{100 \cdot \hat{c}_{kj}}{c_{kj}}$, qui permet d'évaluer cette erreur en valeur relative, et en pourcentage. Lorsque l'on travaille en simulation (voir § 21.3 p.40), il est intéressant de connaître la moyenne des valeurs absolues de ces pourcentages, de façon à pouvoir comparer deux simulations différentes relatives aux mêmes manipulations. Il faut cependant se garder de tirer des conclusions trop hâtives de ces moyennes, car elles sont souvent biaisées par des points aberrants, qui les augmentent considérablement.

Les quantités $\hat{c}_k$ et $\hat{s}_k$ sont toujours faciles à calculer. Elles présentent cependant l'inconvénient de se rapporter aux variables de commande, et non aux caractéristiques des sorties du processus, qui sont pourtant le seul but de l'opération ! Il est important de se rendre compte de l'impact de l'erreur de commande $\tilde{c}_k$ sur les sorties du processus. C'est pourquoi, nous avons aussi calculé, à chaque itération, les sorties $\hat{s}$ qu'il aurait fallu souhaiter pour que le calcul de la commande donne les valeurs de c effectivement affichées ; cela correspond à la figure 2-9, qui est à rapprocher des figures 2-5, 2-7, et 2-8. Cela nécessite une inversion du "modèle", ce qui n'est pas toujours possible (c'est même pour résoudre de tels cas que nous avons été amenés à modéliser le processus inverse !).

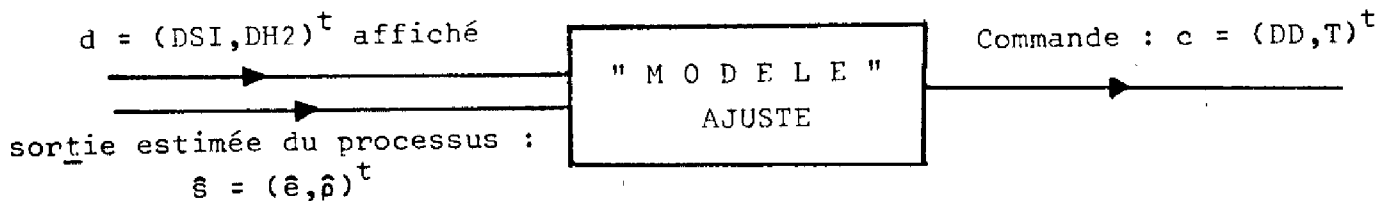


Figure 2-9 : Calcul de $\hat{s}$

De la même façon que précédemment, nous avons aussi calculé les vecteurs $\tilde{s}_k = s_k - \hat{s}_k$, et $\bar{s}_k = \frac{100 \tilde{s}_k}{s_k}$, ainsi que les moyennes des $|s_{ki}|$. Il faut remarquer que toutes ces quantités ne sont pas, en général, calculables, puisque leur calcul nécessite d'inverser le modèle. Les renseignements fournis par les vecteurs $\hat{c}_k$, $\tilde{c}_k$, $\bar{c}_k$ et leurs moyennes font double emploi avec ceux fournis par $\hat{s}_k$, $\tilde{s}_k$, $\bar{s}_k$ alors que les premiers indiquent les conséquences des erreurs du modèle sur la commande, les seconds indiquent leur conséquence sur la sortie du processus, c'est-à-dire sur le produit final.

Enfin, il nous a semblé important de connaître les répercussions sur ces valeurs de la modification du modèle due à la prise en compte de la manipulation numéro k ; cela permet en effet de se rendre clairement compte de l'importance que prend cette dernière manipulation lors de ce réajustement : appelons ' (prime) les mêmes grandeurs que précédemment, mais calculées après la modification du modèle ; ainsi $\hat{c}'_k$, $\tilde{c}'_k$ et $\hat{c}_k$ sont respectivement les consignes calculées suivant 2-5, les erreurs de consigne ($\tilde{c}'_k = c_k - \hat{c}'_k$), et erreurs relatives, calculées en fonction des données de la manipulation numéro k , après le réajustement du modèle relatif à cette même manipulation. Si, par exemple, $\tilde{c}'_k$ est presque nul alors que $\tilde{c}_k$ est assez grand (relativement à une composante), on peut affirmer que le filtrage a surtout tenu compte de la dernière manipulation, et assez peu de l'état antérieur du modèle, donc des manipulations précédentes (relativement à cette composante). Par contre, si $\tilde{c}'_k$ est très voisin de $\tilde{c}_k$, cela montre que le filtrage accorde plus d'importance aux manipulations antérieures qu'à la dernière manipulation. Enfin, si $|\tilde{c}'_k|$ est plus grand que $|\tilde{c}_k|$ (sur une composante), cela montre une erreur de filtrage, puisque la modification apportée sur le modèle entraîne une augmentation de l'erreur de commande (relativement à cette composante). Le même raisonnement s'applique aussi aux vecteurs $\tilde{s}_k$ et $\tilde{s}'_k$; une origine possible d'une telle erreur est une mauvaise initialisation des matrices de covariance, comme cela sera expliqué en § 41.21. On peut encore remarquer que si $\tilde{c}_k$ et $\tilde{c}'_k$ ont un signe contraire, cela prouve une certaine instabilité du filtrage, puisque la modification apportée par celui-ci entraîne une variation des paramètres de commande trop importante. Il en est exactement de même, bien sûr, pour $\tilde{s}_k$ et $\tilde{s}'_k$, $\tilde{s}_k$ et $\tilde{s}'_k$, ces valeurs présentant l'avantage d'être plus parlantes vis-à-vis du résultat à obtenir, mais présentant l'inconvénient de ne pas être toujours calculables (en particulier, lorsque le modèle utilisé n'est pas inversible).

Nous terminerons en remarquant que le calcul de ces paramètres n'est pas seulement valable pour le filtrage de Kalman-Bucy, mais aussi pour toute commande auto-adaptive.

22.22 - Réajustement du modèle, hors filtrage :

La connaissance de ces éléments nous a permis d'effectuer des modifications fondamentales relativement à l'algorithme de filtrage. En effet, il s'est avéré, au vu des résultats des simulations, que le filtrage de Kalman-Bucy était insuffisant pour notre étude particulière.

En effet, une des caractéristiques du processus étudié est de présenter une évolution assez lente (due, par exemple, à l'affaiblissement progressif de la pression de gaz dans une bouteille), interrompue de temps en temps par une transformation importante des caractéristiques du processus (due, par exemple, au changement d'une bouteille de gaz). Laisser au modèle une mobilité suffisante pour réagir à de telles perturbations entraînerait une trop grande sensibilité de celui-ci aux divers bruits présents lors de l'évolution lente, et nuirait donc à la précision et à la stabilité de l'identification. Par contre, ne pas laisser le modèle s'adapter à ces perturbations entraînerait un décalage entre le modèle et le processus, qui nuirait aussi à la précision et à la stabilité de l'identification. Il fallait donc trouver un moyen de remédier à cet inconvénient, dû au fait que le bruit v (équation 3 p.49) n'est pas un bruit blanc.

Pour cela, nous avons employé deux méthodes distinctes : dans certains cas, nous avons augmenté les éléments situés sur les blocs diagonaux de la matrice de covariance P (définie dans les équations (2bis) p.49), de façon à accroître la mobilité du modèle θ ; dans d'autres cas, nous avons, de plus, réinitialisé cette matrice de façon à ce qu'elle corresponde exactement à l'état du processus.

Pour déterminer dans quels cas une perturbation était anormale, nous nous sommes servis du vecteur s_k : lorsque l'une de ses composantes était supérieure à 10 (c'est-à-dire que l'erreur relative sur e , ou sur p était supérieure à 10 %), nous avons multiplié la partie correspondante de P par 2 ; lorsque cette composante était supérieure à 20 (écart sur e ou sur p , de plus de 20 %), nous avons de plus réinitialisé θ , faisant alors entièrement "confiance" à la dernière manipulation.

Il faut bien voir les avantages de cette méthode, qui permet non seulement de pallier le problème particulier propre au processus étudié (mais rencontré assez fréquemment), mais aussi éventuellement de résoudre certains problèmes de convergence (et donc, éventuellement, de non observabilité du système). Ces réinitialisations sur les coefficients du modèle sont nécessaires en cas d'amorce de divergence ; elles permettent, en effet, de recalculer le modèle sur le processus. Le filtrage de Kalman-Bucy devient ainsi applicable à des systèmes qui, sans cela, ne s'y prêteraient pas. Enfin, cela permet d'utiliser ce filtrage en ne possédant que des séries limitées de manipulations (5, ou 10, par exemple, alors que l'on considère en général qu'une centaine d'itérations est un minimum).

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE :

Ce chapitre nous a permis d'expliciter et d'approfondir les possibilités qu'offre l'identification pour la commande d'un processus. Par ailleurs, lorsque le processus est lentement (ou pas du tout) évolutif, l'évaluation hors ligne des matrices Θ , F et R nous permet d'avoir une idée a priori sur la validité d'un modèle. Enfin, grâce à l'étude du filtrage de Kalman-Bucy, nous avons pu en généraliser l'emploi à des processus dont les bruits ne vérifient pas complètement les hypothèses nécessaires au filtrage ; enfin, nous avons indiqué la possibilité de calculer certains éléments fort utiles pour suivre la qualité de l'identification, et donc prévoir la précision de la commande. Tout cela est fait, bien sûr, pour un nombre quelconque d'entrées et de sorties du modèle.

Nous devons maintenant expliciter la réalisation pratique de la commande auto-adaptative du réacteur d'épitaxie que nous avons étudiée.

T R O I S I È M E P A R T I E

COMMANDE AUTO-ADAPTATIVE : REALISATION

- 31 - MISE EN EQUATIONS
- 32 - REALISATION INFORMATIQUE
DE LA COMMANDE
- 33 - EVALUATION DE θ , P, R

La réalisation de la commande auto-adaptive, décrite dans la deuxième partie, a été assez délicate : pour le choix du modèle, tout d'abord, car (comme cela arrive souvent pour des processus industriels), nous ne possédions pas d'équations pouvant décrire le processus. Nous ne disposions que du mode d'emploi, des façons de réagir de l'opérateur devant telle ou telle situation, ce qui était bien sûr concrétisé par des abaques, mais leurs origines, et surtout leurs justifications n'étaient pas toujours très claires. Enfin, nous devions tenir compte de certains paramètres (DSI, et surtout DH2) dont nous ne connaissions guère l'influence, et que les opérateurs n'avaient pratiquement jamais fait varier. C'est pourquoi, il nous a fallu essayer plusieurs modèles distincts, ne tenant d'abord pas compte de ces paramètres, puis en les introduisant de différentes manières ; nous ne présenterons cependant que le modèle retenu.

La réalisation de la commande comporte plusieurs étapes : d'abord la modélisation, qui suppose la linéarisation des équations représentatives du processus, le calcul des variables de consigne et la détermination des éléments statistiques. Puis, nous donnerons quelques précisions sur la réalisation des programmes numériques. Enfin, dans la quatrième partie, nous donnerons un aperçu de quelques unes des nombreuses simulations effectuées et nous en expliquerons leur exploitation possible ; nous ferons de même avec certains essais sur le site. Une dernière phase sera la mise en place de l'ensemble de la commande sur le site, avec toutes les transformations technologiques qu'elle suppose.

31 - M I S E E N E Q U A T I O N S :

- . Linéarisation
- . Calcul de x et y
- . Eléments statistiques

31.1 - LINEARISATION :

- . Résistivité
- . Epaisseur
- . Ecriture matricielle.

L'algorithme de Kalman-Bucy s'appuyant sur le calcul matriciel, il nous était nécessaire de mettre les relations physico-chimiques liant les entrées et les sorties du processus sous forme matricielle, ce qui suppose une linéarisation préalable de certaines de ces relations.

31.11 - Résistivité :

- . Etablissement d'une équation théorique
- . Prise en considération du bruit.

Pour cela, envisageons d'abord le cas de la résistivité, et examinons la méthode employée pour faire évoluer celle-ci. Comme il n'y a guère de moyens d'évaluer l'importance des bruits relatifs à la dernière manipulation, il faut les considérer nuls ; ce qui revient à ne tenir compte que de cette opération.

31.11.1 - Etablissement d'une équation théorique :

Considérant la résistivité ρ_k , mesurée lors de la dernière manipulation, numéro k, et souhaitant obtenir une résistivité ρ_{k+1} pour la prochaine manipulation, calculons les concentrations C_k et C_{k+1} correspondantes de dopant (phase solide, en atomes par cm^3) ; ces quantités sont données par les courbes p. 25 (en fait, les opérateurs utilisent des courbes à plus grande échelle, ou même les tableaux de correspondance $C \rightleftharpoons \rho$ joints en Annexe 5). La loi d'action de masse, établie entre la phase solide et la phase gazeuse, permet d'affirmer que ces concentrations sont proportionnelles aux concentrations correspondantes en phase gazeuse ; c'est dire que nous avons la relation :

$$\frac{\frac{C_k}{DD_k}}{DSI_k} = \frac{\frac{C_{k+1}}{DD_{k+1}}}{DSI_{k+1}}$$

(1)

soit : $\frac{C \cdot DSI}{DD} = a_1$ a_1 étant une constante
c'est, bien sûr, la relation utilisée par les opérateurs.

Il nous faut donc linéariser une telle équation. Pour cela, linéarisons d'abord la relation entre C et ρ ; les courbes jointes montrent que cela est possible en prenant comme variables $\log \rho$ et $\log C$ (ces courbes, dans un repère à coordonnées logarithmiques, sont en effet assez rectilignes). Nous obtenons donc :

$$\log C = a_2 \log \rho + \log a_3$$

$$\text{soit : } C = a_3 \cdot \rho^{a_2} \quad (2)$$

(a_2 et a_3 étant deux coefficients constants dont la valeur sera précisée par la suite).

En rapprochant (1) et (2), il vient :

$$\frac{DD}{DSI} = \frac{a_3}{a_1} \rho^{a_2} \quad (3)$$

Il nous est indispensable que les coefficients a_2 et a_3 soient adaptés à l'état du processus, de façon à pallier les imperfections dues à la linéarisation. Nous ne pouvons donc pas utiliser l'équation (3) sous cette forme, et nous l'avons transformée pour obtenir :

$$\log \frac{DD}{DSI} = a_2 \log \rho + \log \frac{a_3}{a_1}$$

que nous écrirons sous la forme :

$$\log \frac{DD}{DSI} = \alpha \log \rho + \beta \quad (4)$$

α et β étant donc les deux premiers paramètres qui feront l'objet de l'identification.

Il nous faut, bien sûr, connaître les valeurs approximatives de α et β . Ainsi, pour des résistivités variant entre $1 \Omega \times \text{cm}$ et $1\,000 \Omega \times \text{cm}$, par exemple, nous avons (type N) :

$$\begin{aligned} \rho &= 1000 \Omega \times \text{cm} , c = 5 \cdot 10^{12} \Rightarrow 12 + \log 5 = \alpha \cdot 3 + \log \alpha_3 \\ \rho &= 10 \Omega \times \text{cm} , c = 5 \cdot 10^{14} \Rightarrow 14 + \log 5 = \alpha \cdot 1 + \log \alpha_3 \\ \text{donc } \alpha &= -1 \end{aligned}$$

β sera alors déterminé par la première manipulation ($\beta \approx 1,1$).

Par contre, pour des valeurs plus faibles de ρ , la linéarisation est plus délicate ; prenons par exemple :

$$\begin{aligned} \rho &= 10 \Omega \times \text{cm} , c = 5 \cdot 10^{14} \Rightarrow 14 + \log 5 = \alpha \cdot 1 + \log \alpha_3 \\ \rho &= 0,1 \Omega \times \text{cm} , c = 9 \cdot 10^{16} \Rightarrow 16 + \log 5 = \alpha \cdot (-1) + \log \alpha_3 \\ \text{donc } \alpha &= -1,15 \end{aligned}$$

On voit que cette variation est relativement faible, mais nécessite tout de même une adaptation du coefficient α aux conditions d'utilisation.

31.11.2 - Prise en considération du bruit :

Tout cela a été établi en ne se servant que de la dernière manipulation. Pour tenir compte du passé du processus (et du même coup, des bruits inhérents au processus), il nous suffit de modifier l'équation (4) en y ajoutant un bruit w^1 , ce qui donne :

$$\log \frac{DD}{DSI} = \alpha \log \rho + \beta + w^1 \quad (5)$$

Ce bruit n'a rien d'un bruit blanc, et ne satisfait aucune condition requise pour que le filtrage utilisé soit optimal (en particulier, par le passage aux logarithmes, il devient multiplicatif, au lieu d'être additif !). Cet inconvénient est réduit par la possibilité de réajustement du modèle et / ou des matrices de covariance en cas d'écart trop important.

31.12 - Epaisseur :

Les principaux paramètres qui influent sur l'épaisseur de l'ensemble des plaquettes sont essentiellement la durée T du dépôt épitaxial, ainsi que les débits DSI et DH2. Lorsque ces deux derniers paramètres sont fixes, la vitesse de dépôt est supposée constante ; on aurait ainsi la relation $\frac{e}{T} = V_d$ soit : $T = \frac{1}{V_d} \cdot e$. Cependant, lors des dépôts de faibles épaisseurs, (donc pour des temps faibles), un certain retard a pu être remarqué. Ce retard correspondrait, en quelque sorte, à un temps de purge de certaines tuyauteries, par exemple. L'équation devient alors $T = \frac{1}{V_d} \cdot e + T_0$. T_0 est d'ailleurs assez faible (ordre de grandeur : 30 secondes), mais la modélisation utilisée présente l'avantage d'en tenir facilement compte.

Lorsqu'il y a variation de débit, on peut estimer que la vitesse de dépôt V_d est proportionnelle à la concentration du silicium dans le gaz qui traverse le réacteur. On a, dans ce cas : $V_d = \lambda \frac{DSI}{DH2}$, ce qui donne l'équation finale :

$$T = \gamma \frac{DH2}{DSI} e + T_0 \quad \left(\gamma = \frac{1}{\lambda} \right)$$

Pour tenir compte des bruits inhérents au processus, rajoutons maintenant un bruit w^2 ; nous obtenons alors :

$$T = \gamma \frac{DH2}{DSI} e + \delta + w^2 \quad (\delta = T_0)$$

Le filtrage K.B. est optimal lorsque w^2 est un bruit blanc ; ce n'est évidemment pas exactement le cas ; cependant, à défaut d'une meilleure connaissance de ce bruit, nous utiliserons tout de même le filtrage K.B., qui peut alors être considéré comme sous-optimal.

31.13. Ecriture matricielle :

Rassemblons les deux équations obtenues en une seule équation matricielle. Nous obtenons alors :

$$(6) \quad \left(\log \frac{DD}{DSI}, T \right) = \left(\log \rho, \frac{DH2}{DSI} \cdot e, 1 \right) \cdot \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \gamma \\ \beta & \delta \end{pmatrix} + (w^1, w^2)$$

Ce qui donne, avec les notations de 22.12 :

$$y^t = x^t \Theta + w^t$$

$$\text{avec : } y = \left(\log \frac{DD}{DSI}, T \right)^t$$

$$x = \left(\log \rho, \frac{DH2}{DSI} \cdot e, 1 \right)^t$$

$$\text{et : } \Theta = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \gamma \\ \beta & \delta \end{pmatrix}$$

$$w = (w^1, w^2)^t$$

Pour transformer ces équations et les rendre accessibles au filtrage K.B., nous avons deux solutions (§ 22.12), de la forme :

$$y = X\theta + w$$

$$(7) \quad \begin{pmatrix} \log \frac{DD}{DSI} \\ T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \log \rho & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{DH2}{DSI} \cdot e & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w^1 \\ w^2 \end{pmatrix}$$

ou bien :

$$(8) \quad \begin{pmatrix} \log \frac{DD}{DSI} \\ T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \log \rho & \frac{DH2}{DSI} \cdot e & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \log \rho & \frac{DH2}{DSI} \cdot e & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ 0 \\ \beta \\ 0 \\ \gamma \\ \delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w^1 \\ w^2 \end{pmatrix}$$

Nous avons retenu la seconde solution, bien qu'elle allonge un peu les calculs (le modèle est, en effet, d'ordre 6 au lieu d'ordre 4 ; mais cela ne joue que sur les produits matriciels, assez rapides à effectuer, la seule inversion nécessaire, celle de $(X.P.X^t + R)$, étant de toutes façons d'ordre 2). L'équation (8) est, en effet, plus proche de l'équation (6), et surtout, le passage de (6) à (8) peut être fait automatiquement en machine ; ainsi, un utilisateur de filtrage K.B., multi-entrées, multi-sorties, que nous avons réalisé, pourra ne considérer que l'équation (6), plus naturelle que (7) ou (8), (quel que soit l'ordre du système, et indépendamment d'éventuels zéros de Θ) ; les calculs relatifs au filtrage généreront alors automatiquement la matrice X, et ne tiendront compte que de celle-ci. Notons qu'il est facile de fixer certaines composantes de θ (ou Θ) à une valeur quelconque, en les initialisant à cette valeur, et en annulant toutes les covariances qui les font intervenir (dans notre cas d'étude, les deuxième et quatrième lignes et colonnes de ρ).

Possédant maintenant le modèle K.B. de notre identification, il nous faut encore préciser les structures des "convertisseurs" A, B et C, définis en 21.4, de façon à pouvoir transformer les données (entrées et sorties) d'une manipulation en données de ce modèle K.B., et calculer les valeurs de consignes pour la manipulation suivante (figures 2-6, 2-7).

31.2 - CALCUL DE x ET y :

Le rôle des convertisseurs A, B et B_1 , est de transformer respectivement (d, s) en x , (c, d) en y , et (d, y) en c . Rappelons (§ 21.4 et 22.21) que A et B servent à l'identification du "modèle", et que A et B_1 servent d'une part pour le calcul des variables c de consigne, d'autre part pour le suivi de l'identification (lorsque le "modèle" est inversible, nous pouvons aussi exprimer les équations de l'inverse du modèle).

Ainsi, pour le "convertisseur" A, nous devons transformer (d, s) en x :

$$d = (DSI, DH2)^t$$

$$s = (e, \rho)^t$$

D'après l'équation (6), nous avons $x = (\log \rho, \frac{DH2}{DSI} \cdot e, 1)^t$ ce qui traduit bien l'action du "convertisseur" A (la matrice X du filtrage K.B. en sera déduite par le sous-programme de filtrage lui-même).

De la même façon, l'action du "convertisseur" B s'exprime en écrivant l'équation de y :

$$y = (\log \frac{DD}{DSI}, T)^t$$

Enfin, le "convertisseur" B₁ transforme (d, y) en c, ainsi :

$$c_1 = DD = DSI \cdot 10^{\log \frac{DD}{DSI}} = d_1 \cdot 10^{y_1}$$

$$\text{et : } c_2 = T = y_2$$

Nous terminerons en donnant les équations de l'inverse du "modèle" :

$$y_1 = \Theta_{11} x_1 + \Theta_{31} + w^1 \quad (4)$$

$$\text{et : } y_2 = \Theta_{22} x_2 + \Theta_{32} + w^2$$

Et donc, en ne tenant pas compte de w :

$$x_1 = \frac{y_1 - \Theta_{31}}{\Theta_{11}}$$

$$\text{et : } x_2 = \frac{y_2 - \Theta_{32}}{\Theta_{22}}$$

$$\text{d'où : } \rho = 10^{x_1}$$

$$\text{et : } e = \frac{DSI}{DH_2} \cdot x_2$$

Remarquons bien que cette inversion n'a été possible que parce que chacune des deux équations (6) ne contenait qu'une seule composante variable de x et que, de plus, les composantes de w sont faibles devant y . Sans ces conditions, nous n'aurions pu exprimer, par exemple, x_1 en fonction de y et Θ , et le modèle n'aurait donc pas été inversible. La modélisation du processus inverse (passage de la figure 2-2 à la figure 2-4) est, dans ce cas, indispensable, et le calcul de $\hat{s}$, $\hat{\xi}$ est impossible.

31.3 - ELEMENTS STATISTIQUES :

- Evaluation de R
- Evaluation de P
- Evaluation de Q

Nous avons vu au § 22.21 l'importance déterminante des valeurs numériques des coefficients des matrices P , Q et R . Or, il est difficile d'évaluer directement toutes ces valeurs ; en effet, la présence de variables (x , y) propres au filtrage masque les véritables écarts que peuvent présenter les variables propres au processus (c , d , s) à évaluer. Enfin, si cette évaluation est possible pour les variances, elle est encore plus délicate quand il s'agit des covariances croisées. C'est pourquoi, nous avons fait de nombreuses simulations sur des séries de manipulations différentes (deux séries de 40 manipulations et une série de 80), essayant différentes valeurs possibles de P , Q , R . De plus, la possibilité de se servir de ces mêmes manipulations pour évaluer, par la méthode de maximum de vraisemblance (§ 22.13) les matrices Θ , P et R , nous a permis de confirmer ces valeurs.

Précisons cependant les covariances qu'une analyse du processus nous a permis d'évaluer .

31.31 - Evaluation de R :

Le seul paramètre facile à évaluer est R_{22} , relatif au temps du dépôt : cette mesure est celle qui est faite avec le plus de précision ; les vannes électro-mécaniques sont, en effet, commandées par des minuteriers qui sont pré-réglées ; l'erreur de mesure est donc très faible, tout au plus quelques secondes (environ 0,5 %). Cependant, d'autres facteurs influent sur le paramètre R_{22} , variance du bruit w^2 : une erreur de mesure sur DSI, DH2 ou e entraîne une erreur d'évaluation de $\frac{DH2}{DSI} \cdot e$. Considérant δ faible devant T, nous pouvons dire que l'incertitude relative à T, due à l'incertitude sur DH2, DSI et e, est voisine de :

$$\frac{dT}{T} = \frac{dDH2}{DH2} + \frac{dDSI}{DSI} + \frac{de}{e} .$$

Intervient maintenant l'évaluation de $dDH2$, $dDSI$, de , incertitudes de mesure sur DH2, DSI et e, beaucoup plus délicate à évaluer que celle sur T. Dans l'état actuel des appareillages, DH2 et DSI sont mesurés et ajustés par des débitmètres à billes, dont nous évaluerons la précision à quelques unités pour cent (remarquons qu'un biais de l'appareil, d'amplitude constante, ne nous concerne pas ici, car celui-ci sera pris en compte par la modélisation ; seule la partie aléatoire, à moyenne nulle, de l'incertitude nous intéresse). Quant à e, sa valeur est calculée comme étant la moyenne des épaisseurs des plaquettes d'un lot. Aussi, nous pouvons estimer que les bruits de mesure se contrebalancent assez bien sur l'ensemble de la manipulation. Bien que la valeur ainsi calculée dépende éventuellement de l'échantillonnage opéré pour effectuer les mesures, il n'y a pas lieu d'en tenir compte, dans la limite où les plaquettes mesurées sont toujours au même endroit sur le susceptible. En fait, seule une variation importante d'épaisseur, le long du susceptible entraîne une augmentation sensible de $\frac{de}{e}$. En fin de compte, nous prendrons les valeurs approximatives suivantes :

$$\frac{dDH2}{DH2} \approx 2 \% , \quad \frac{dDSI}{DSI} \approx 2 \% , \quad \frac{de}{e} \approx 2 \%$$

Nous obtenons alors : $dT \approx 0,06 T$. Soit, pour un temps de 15 minutes, $dT \approx 0,9$ mn, et donc une variance R_{22} voisine de $(0,9)^2 \approx 0,8$. C'est l'ordre de grandeur que nous utiliserons, sachant qu'il peut y avoir lieu de le modifier (notamment en cas d'épaisseurs très fortes ou, au contraire, très faibles ou de gradient important le long du susceptible). Nous retrouverons d'ailleurs cet ordre de grandeur dans l'estimation qui en est faite au § 32.3.

Quant au paramètre R_{11} , il est beaucoup plus difficile à évaluer. En effet, le passage en logarithme rend son action non pas additive mais multiplicative. C'est pourquoi, nous avons préféré chercher une bonne valeur par de nombreuses simulations, ainsi que par l'évaluation hors ligne de θ , P , R indiquée au § 22.13 et 32.3. Dans les prolongements possibles de notre étude, nous avons indiqué, en particulier, la possibilité de faire varier R à chaque étape (§ 43-4).

31.32 - Évaluation de P :

Examinons maintenant le cas de la matrice P .

La matrice P , covariance du bruit v indique la précision avec laquelle θ est connue. S'il est possible d'évaluer les éléments diagonaux de P , il est, par contre, pratiquement impossible d'évaluer les covariances croisées, situées en dehors de la diagonale de P . Mais le filtrage K.B., en réajustant à chaque étape la valeur de P , nous permet de nous rendre compte, après plusieurs itérations, des valeurs de ces coefficients ; on voit donc l'intérêt d'effectuer des simulations pour connaître ces valeurs.

Certains éléments diagonaux sont faciles à évaluer. Ainsi, par exemple, nous pouvons considérer que Θ_{32} est compris entre 0 et 1, que de plus, entre deux manipulations consécutives, une variation de 0,3 (20 secondes) est bien un maximum. Nous pouvons donc évaluer la covariance de δ à une valeur légèrement inférieure à $(0,3)^2 = 0,09$. nous prendrons par exemple : 0,05. La covariance de Θ_{22} est beaucoup plus délicate à établir : si nous pouvons considérer que la vitesse de dépôt varie, à débits constants, dans un écart de 5 à 10 % entre deux manipulations, nous n'avons guère d'éléments de jugement nous permettant d'évaluer les écarts lorsque l'on fait varier les débits. Comme, à l'heure actuelle, les débits ne sont que rarement modifiés, nous ne tiendrons compte que des écarts connus lorsque ces débits sont gardés constants, quitte à augmenter (hors filtrage) la covariance ainsi obtenue lorsqu'il y aura des variations de débits. Un ordre de grandeur de γ étant 0,01, l'ordre de grandeur des écarts observables sur γ est de 10^{-3} , et la covariance peut donc être considérée comme avoisinant 10^{-6} .

De la même façon, Θ_{11} est assez précisément connu : nous savons qu'il ne doit normalement pas varier en dehors de - 0,9 à -1,3. Nous prendrons donc une covariance de l'ordre de 0,01. Par contre, la covariance de Θ_{22} est plus difficile à évaluer : nous en aurons un ordre de grandeur par les simulations que nous effectuerons.

En résumé, une initialisation de P est, par exemple :

$$P_0 = \begin{pmatrix} 0.005 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.007 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.05 \end{pmatrix}$$

31.33 - EVALUATION DE Q :

L'évaluation de Q est assez délicate : Q exprime, en effet, la mobilité du processus. Nous pouvons donner à cette matrice une valeur assez faible, puisque nous avons mis en place un système qui réinitialise les coefficients du modèle en cas de divergence. De la même façon que pour P, nous ne déterminerons que les éléments diagonaux de Q, fixant en fait les autres à 0 (ce qui est d'ailleurs de pratique courante dans l'utilisation du filtrage K.B., relatif à l'identification de paramètres). Le paramètre D_{11} étant défini comme la pente d'une courbe qui, normalement, n'évolue pas avec le processus, nous annulerons la composante de Q relative à ce paramètre. De même, la valeur du paramètre θ_{32} ne doit pas, normalement, dériver au cours des manipulations ; nous annulerons donc aussi la composante de Q relative à ce paramètre. Quant aux deux autres valeurs de Q, nous les prendrons égales au vingtième de la composante correspondante de P. Ce qui donne une matrice Q de la forme :

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \cdot 10^{-8} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

32 - REALISATION INFORMATIQUE DE LA
COMMANDE :

- Préliminaire
- Description des sous-programmes.

Nous avons maintenant tous les éléments pour aborder la réalisation proprement dite de la commande du réacteur d'épitaxie. Nous allons donc décrire et expliquer tous les sous-programmes utilisés. Nous avons, en effet, séparé chaque partie de l'ensemble de la commande pour en former un sous-programme indépendant. Ceci présentait deux avantages : d'une part, faciliter la compréhension de l'ensemble, puisque chaque partie présente son autonomie et, d'autre part, cela aidera la mise en place sur le site de la commande, avec toutes les fonctions qui seront alors nécessaires (§ 43-2). Nous préciserons aussi, bien sûr, le programme de calcul hors ligne de θ , P, R.

32.1 : PRELIMINAIRE :

- Quatre modèles distincts
- Utilisation matricielle.

32.11 : Quatre modèles distincts :

Avant de présenter le programme réalisé, il nous faut préciser un point important : le réacteur d'épitaxie utilisé, possède deux tubes fonctionnant alternativement : c'est-à-dire que l'un est en fonctionnement tandis que l'autre est dans une phase de refroidissement, chargement et déchargement. Cependant, ces fours ont des caractéristiques différentes : susceptible, circuits de gaz, forme exacte des spires de chauffage ... Il importe donc d'établir deux modèles distincts, qui doivent pouvoir évoluer indépendamment l'un de l'autre.

De plus, chaque type de dépôt (N ou P) possède des caractéristiques différentes : nous avons déjà vu, par exemple, que les courbes liant la concentration de dopant en phase solide à la résistivité, étaient différentes selon que l'on travaille en type N ou en type P. Pour chaque tube, il faut donc avoir deux modèles distincts (avec, bien sûr, les matrices de covariance correspondantes), relatifs respectivement aux dépôts de type N et de type P.

C'est pourquoi, nous devons posséder quatre modèles strictement indépendants. Dans la réalisation informatique, pour plus de commodité, nous avons gardé le même nom pour ces quatre modèles, en attribuant à chaque matrice un indice supplémentaire, L, variant de 1 à 4 (L = 1 : couche N du tube 1, L = 2 : couche P du tube 1 ...), ce qui est résumé dans la figure 3-1.

	Tube 1		Tube 2	
	Type N	Type P	Type N	Type P
θ	$\theta (I,J,1)$	$\theta (I,J,2)$	$\theta (I,J,3)$	$\theta (I,J,4)$
P	P (I,J,1)	P (I,J,2)	P (I,J,3)	P (I,J,4)
Q	Q (I,J,1)	Q (I,J,2)	Q (I,J,3)	Q (I,J,4)
R	R (I,J,1)	R (I,J,2)	R (I,J,3)	R (I,J,4)

Figure 3 - 1

Cependant, ce découplage entre les dépôts de type N et ceux de type P n'est absolument pas vérifié lorsqu'il s'agit de l'épaisseur (à tel point d'ailleurs que seule l'épaisseur totale est mesurée, les épaisseurs de chaque type étant déduites par simple règle de trois, en supposant la vitesse de dépôt identique pour chaque type). Lors de la prise en compte d'une manipulation dont la couche superficielle (la seule dont on peut mesurer la résistivité) est de type ρ , il nous faut donc modifier non seulement les coefficients de θ_k relatifs à l'épaisseur de la couche P, mais aussi ceux relatifs à l'épaisseur de la couche N. Il en va, bien sûr, de même en intervertissant N et P, pour chacun des deux tubes. Pour cela, nous avons simplement égalé les coefficients du modèle, relatifs à l'épaisseur de la couche inférieure à ceux relatifs à l'épaisseur de la couche supérieure (après modification du modèle).

32.12 - Utilisation matricielle :

Afin d'apporter le maximum de souplesse et de clarté aux programmes utilisés, nous avons beaucoup utilisé la possibilité que nous offre le FORTRAN de faire correspondre, lors de l'appel d'un sous-programme, un élément de matrice à une matrice : le sous-programme considère alors que l'argument transmis par l'instruction d'appel correspond au premier élément d'un tableau réel, et calcule les indices à partir de cet emplacement. Ainsi, par exemple :

DIMENSION A(10,10)	SUBROUTINE BONJOUR (B)
.	DIMENSION B(50)
.	.
.	.
CALL BONJOUR (A(1,6))	.
.	.
.	.
.	.

Dans ce cas, le tableau fictif B correspond à la seconde motié du tableau A :

```

B (1)   correspond à   A (1,6)
B (2)   "             "   A (2, 6)
.
.
.
B (10)  correspond à   A (10,6)
B (11)  "             "   A ( 1,7)
.
.
.
B (50)  correspond à   A (10, 10)

```

Lors d'un appel comme CALL BONJOUR (A), le tableau fictif B aurait correspondu à la première partie du tableau A.

Nous utiliserons souvent cette possibilité avec des tableaux à trois indices ; ainsi :

```

DIMENSION P (6, 6, 4)      SUBROUTINE PIERRE (PP)
.
.
.
CALL PIERRE ( P(1, 1, 2) )
.
.
.

```

Dans ce cas, le tableau fictif PP correspond précisément à la seconde partie du tableau P : PP (I, J) correspond à P (I, J, 2) pour n'importe quelle valeur de I et J comprise entre 1 et 6.

Pour plus de commodité, nous avons, dans ce cas, souvent appelé P et PP par le même nom (parce-que précisément, un tableau P ou TETA à trois indices est la juxtaposition de plusieurs tableaux P, ou TETA indépendants les uns des autres).

Décrivons maintenant succinctement le rôle des sous-programmes utilisés pour effectuer une simulation ou une commande en temps réel. Cette description précise l'algorithme de calcul décrit dans la seconde partie.

32.2. - DESCRIPTION DES SOUS-PROGRAMMES :

- Programme Principal
- SP Reajus
- SP Filkbb
- SP Reinit et Exploi
- SP Impres et Ordane
- Modifications à apporter pour établir un modèle différent

Nous nous sommes attachés à ce que chaque unité de travail soit traitée par un sous-programme différent. Cela explique d'une part le nombre important de sous-programmes, d'autre part la simplicité du programme principal appelant.

L'ensemble de l'algorithme de calcul est récapitulé par les deux organigrammes présentés en figures 3-2 et 3-3.

32.21 - Programme Principal :

Le calcul de la commande se décompose en quatre ou cinq parties :

- 1 - Initialisation des variables (S.P. INITIA)
- 2 - Impression sur listing des matrices Q_0 , P_0 , Q_0 , R_0 (S.P. IMPLIS)
- 3 - Réajustement du modèle par la prise en compte des données relatives à une nouvelle manipulation (S.P. REAJUS)
- 4 - Impression sur listing des informations relatives à ce réajustement (S.P. IMPRES)
- 5 - Eventuellement, calcul des variables de consigne à afficher pour la manipulation suivante (S.P. ORDANE), et retour en 3.

Le sous-programme ORDANE est appelé lorsqu'il s'agit d'une commande en temps réel et ne l'est pas pour une simulation.

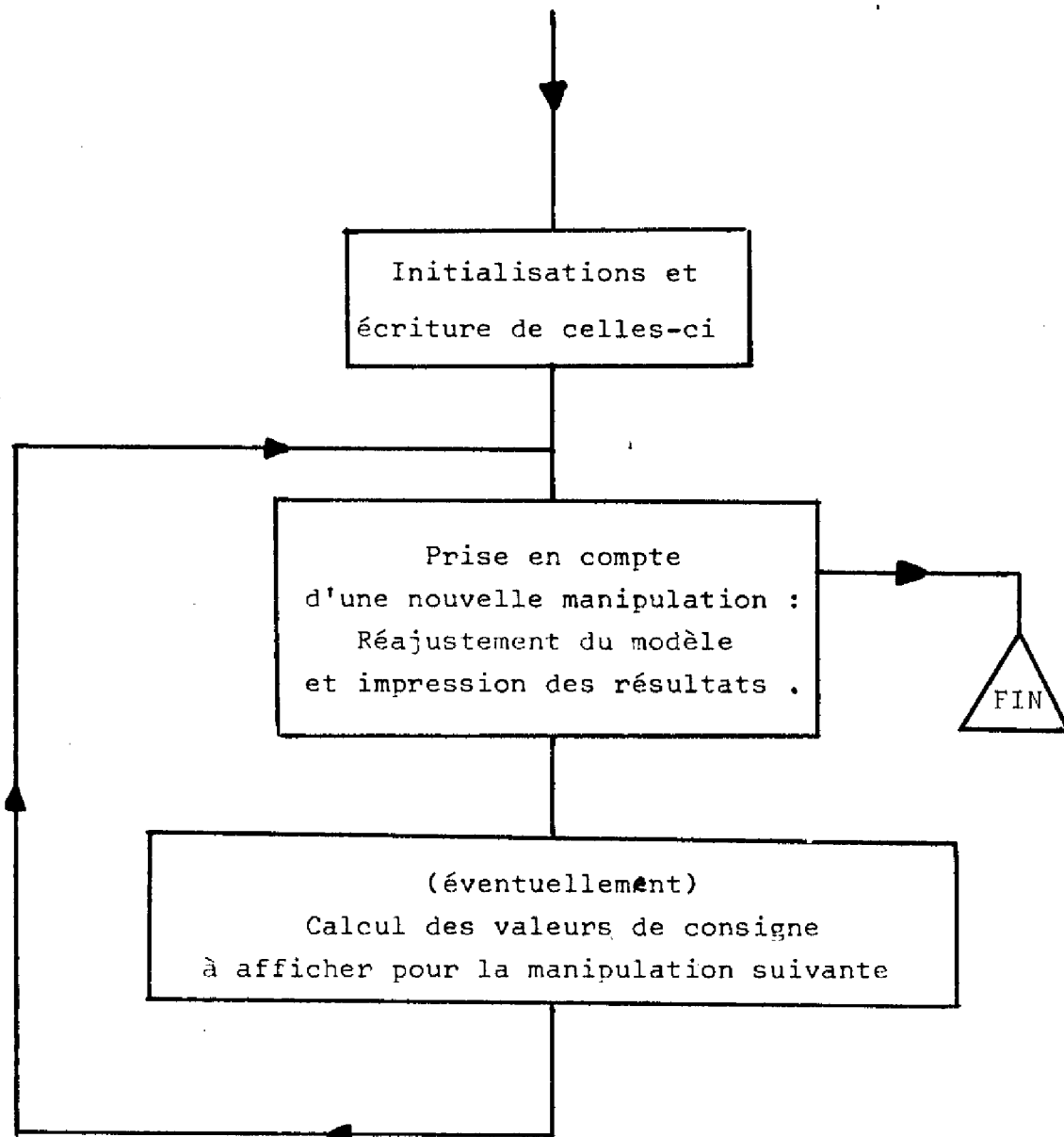


Figure 3-2 :
Organigramme de la commande,
par modélisation auto-adaptative .

32.22 - Sous-programme REAJUS :

C'est le sous-programme central qui, par l'appel de ses sous-programmes, effectue l'ensemble de l'identification et de la simulation.

Il se décompose donc en plusieurs parties :

- 1 - Prise en compte des données relatives à la nouvelle manipulation et conversion de celles-ci en variables propres au modèle K.B. (sous-programme MANIP).
- 2 - Calcul de $\hat{c}$ et $\hat{s}$, avant modification du modèle, comme expliqué au § 22.21.2 (sous-programme EXPL01)
- 3 - Si nécessaire, réinitialisation de Θ et de P (§ 22.22) (sous-programme REINIT)
- 4 - Identification par filtrage de Kalman-Bucy, des coefficients de Θ , compte-tenu des nouvelles valeurs de x et y, et de P, Q, R (sous-programme FILKB)
- 4 bis - Réajustement des coefficients concernant l'épaisseur du modèle K.B., relatif à l'autre type de couche (N au lieu de P, ou vice versa) du même tube (§ 32.11)
- 5 - Calcul de $\hat{c}$ et $\hat{s}$ après modification du modèle (sous-programme EXPL01) (§ 22.21.2, fig. 28 et 29)
- 6 - Calcul de Θ' , comme expliqué au § 22.21.1.

Pour le critère de réinitialisation de Θ et P, il nous a semblé plus naturel de tenir compte de l'erreur de prévision ξ commise sur la sortie du processus. Lorsque le modèle n'est pas inversible, ce critère doit évidemment porter sur l'erreur de prévision ξ commise sur la commande du processus.

32.23 - Sous-programme FILKB :

Etant donné un vecteur X de M composantes, un vecteur Y de N composantes, et une matrice TETA de dimensions (M, N), ce sous-programme effectue le filtrage par la méthode due à Kalman-Bucy, de façon à identifier les éléments de TETA, en fonction des matrices de covariance P, Q, R.

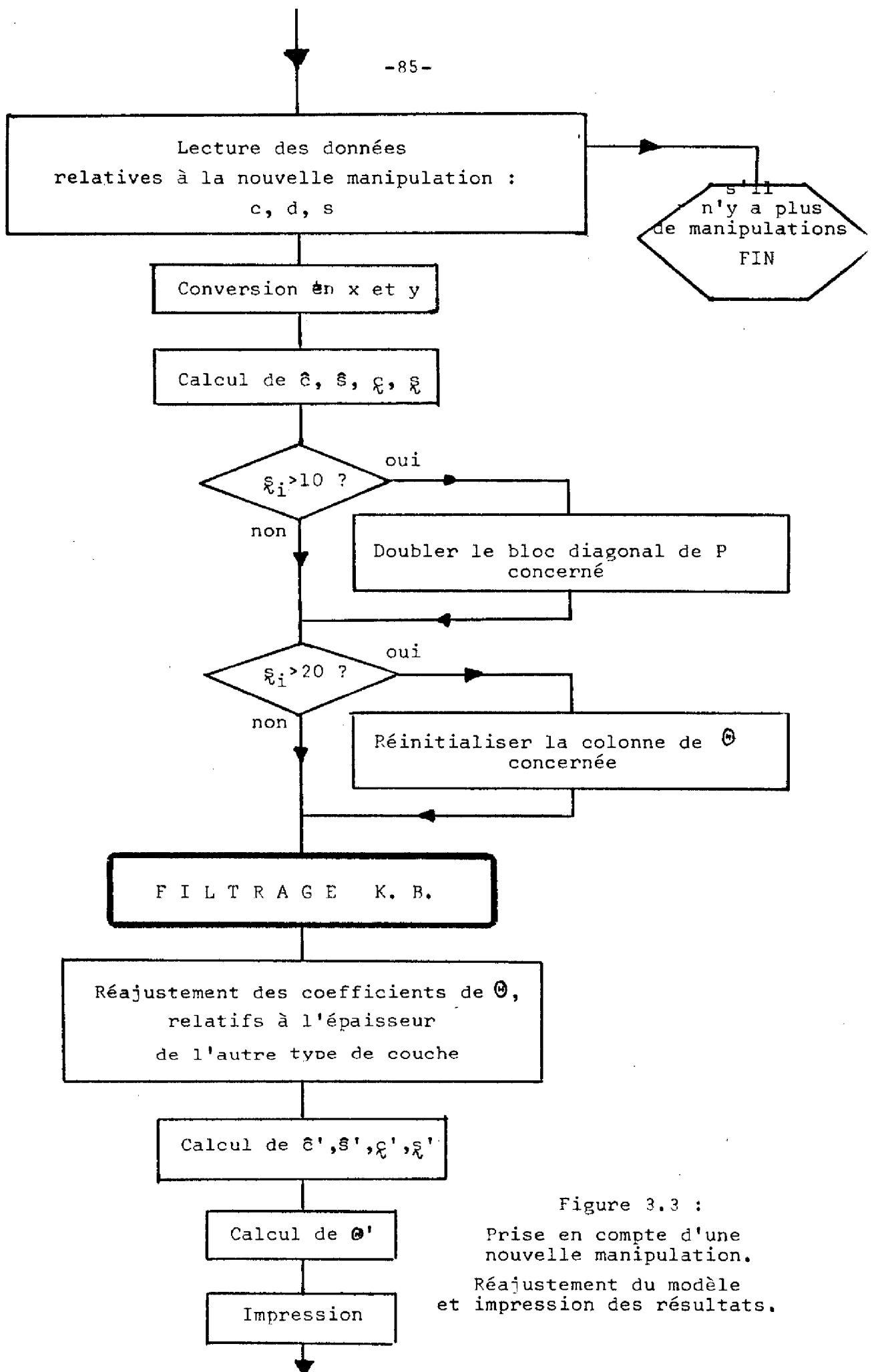


Figure 3.3 :
Prise en compte d'une
nouvelle manipulation.
Réajustement du modèle
et impression des résultats.

Il transforme, pour cela, le vecteur X en la matrice de dimensions $(N, M \times N)$ correspondante (§ 22.12) et considère TETA comme un vecteur (en machine, une matrice de dimension (M, N) est rangée exactement de la même façon qu'un vecteur de $M \times N$ éléments, rangés colonne par colonne). C'est dire que le modèle K.B. est supposé mis sous la forme $y = X \theta$, et que le programme le transforme directement sous la forme $y^t = x^t \theta$ (§ 22.12).

Ce sous-programme comprend les parties suivantes :

- 1 - Calcul de $\tilde{y} = y - \theta^t x$
- 2 - Construction de X matriciel
- 3 - Calcul de $S = X.P.X^t + R$
- 4 - Calcul de $T = S^{-1}$
- 5 - Calcul du gain $G = P.X^t.T$
- 6 - Modification de P , puis de θ .

Un message d'erreur est prévu lorsque S n'est pas inversible, ce qui n'est possible que si les matrices P ou R ne sont pas symétriques, définies positives, et qui résulte alors d'une erreur d'initialisation.

32.24 - Sous-programmes REINIT et EXPLOI :

Le sous-programme REINIT modifie, si nécessaire, les valeurs de P ou θ avant le filtrage de ceux-ci par FILKB. Ces réinitialisations sont, bien sûr, arbitraires et propres au processus étudié. Ainsi, nous avons multiplié les coefficients du bloc diagonal de P concerné par 2. Quant à θ , nous avons estimé que θ_{11} devait avoisiner -1 ; c'est pourquoi, s'il n'était pas compris entre -0,9 et -1,3, nous l'avons recalé à -1, TETA(3,1) étant donc déterminé par la valeur de TETA(1,1) ; de la même façon, nous avons estimé anormal que TETA (3, 2) ne soit pas compris entre 0 et 1 ; aussi, lorsqu'il n'en est pas ainsi, nous le recalons à la valeur 0,5, la valeur de TETA (2, 2) se déduisant de celle de TETA (3, 2).

Quant au sous-programme EXPL01, il calcule $\hat{c}_k$, $\hat{c}'_k$, $\hat{s}_k$, $\hat{s}'_k$, c'_k , s_k , s'_k . Pour le calcul des moyennes de ces derniers vecteurs, nous avons estimé que, lors des premières manipulations, le modèle n'était pas bien adapté à l'état du processus et que, par conséquent, il était préférable de ne pas tenir compte des premières manipulations (nous avons fixé à trois le nombre de manipulations nécessaires pour stabiliser le modèle).

32.25 - Sous-programmes IMPRES et ORDONE :

Le sous-programme IMPRES imprime les données utiles pour pour suivre le déroulement de l'identification, c'est-à-dire les matrices Θ et Θ' , P et PREVOI. Les matrices Q et R étant fixes, il n'est pas nécessaire de les reprendre à chaque itération. Dans le cadre d'une simulation, il peut être utile de ne pas écrire les résultats de toutes les itérations, mais seulement de temps en temps ; c'est pourquoi, ces résultats ne sont écrits qu'une fois sur ISORT.

Le sous-programme ORDONE lit les souhaits $\bar{d}$ et $\bar{s}$ relatifs à la manipulation suivante, les convertit en $\bar{X}$, puis, par produit matriciel, calcule $\hat{y}$, qu'il convertit en $\hat{c}$ (le tout correspond au schéma de la figure 2-7). Il écrit alors les résultats obtenus sur listing. Il est possible d'effectuer ces calculs pour plusieurs souhaits différents ; c'est pourquoi, deux paramètres indiquent, l'un le numéro du souhait (I), l'autre le nombre total de souhaits formulés (IMAX).

32.26 - Modifications à apporter pour établir un modèle différent :

Les programmes établis étant très généraux, il y a peu de chose à modifier lorsque l'on veut établir un modèle différent.

Notons d'abord qu'il est quelquefois impossible d'inverser le "modèle" et, par conséquent, le calcul de $PREVOI(IP, J, K)$, pour J valant 3, 4, 7, 11, 12 est souvent impossible.

A part ces points précis, seuls les sous-programmes relatifs aux "convertisseurs" décrits en 21.4 doivent être modifiés, à savoir : REINIT, EXPLOI, les sous-programmes MANIP et ORDONE. Tous les autres sous-programmes sont valables quel que soit le "modèle", en particulier quels que soient les nombres M et N d'entrées et de sorties du modèle K.B.

Le petit nombre de modifications à effectuer pour obtenir un modèle différent (relatif éventuellement à un autre processus) montre bien la généralité de l'étude et du programme effectués.

33 - C A L C U L D E θ , P et R :

Nous avons vu au § 22.13 qu'il était possible d'évaluer par méthode de maximum de vraisemblance θ , P et R lorsque le modèle θ était invariant dans le temps (c'est-à-dire que l'on a $Q = 0$). Les résultats que nous obtiendrons seront, bien sûr, biaisés par le fait que cette hypothèse n'est pas précisément réalisée dans notre cas d'étude, mais ils nous fourniront non seulement un ordre de grandeur mais aussi une limite supérieure de P et R. Les résultats sont facilement vérifiables par la comparaison des valeurs obtenues pour θ avec les valeurs théoriques qui sont assez précisément connues.

Nous nous sommes attachés à faire un programme général, qui permette aussi bien de traiter le système sous la forme $y = x^t \theta$ que sous la forme $y = X \theta$; il sera même possible d'utiliser ce programme pour un système plus complexe, écrit sous la forme $Y = X \cdot \theta$, où Y, X, θ sont tous trois matriciels.

Ce programme n'est, en fait, qu'une suite de manipulations matricielles, qu'il n'est guère utile de reprendre successivement. Précisons, cependant, les dimensions des différents tableaux :

$Y(N, L)$, $X(N, M)$, $TETA(M, L)$

(Nous avons donc normalement soit $N = 1$, soit $L = 1$; de plus, il ne peut y avoir plusieurs éléments non nuls dans une même colonne de X).

C O N C L U S I O N D E L A T R O I S I E M E P A R T I E :

Dans cette partie, nous avons décrit la concrétisation de l'étude théorique exposée dans la seconde partie. Après avoir traité ce qui était particulier au processus étudié, c'est-à-dire tout ce qui touche à la mise en équations du modèle, nous avons précisé ce qui reste valable pour tout autre processus, à savoir quelques détails de la réalisation informatique de la simulation, de la commande et de l'évaluation hors ligne de θ, P, R .

Q U A T R I E M E P A R T I E

RESULTATS

- 41 - SIMULATION
- 42 - ESSAIS SUR LE SITE
- 43 - MISE EN PLACE DE LA COMMANDE AUTOMATIQUE
ET PROLONGEMENTS POSSIBLES

Après avoir explicité la méthode de commande choisie et envisagé les problèmes spécifiques au réacteur, nous pouvons aborder maintenant la description des résultats numériques obtenus, et envisager le problème de la réalisation sur le site de cette commande auto-adaptative.

41 - S I M U L A T I O N S :

- Présentation
- Résultats.

41. 1 - P R E S E N T A T I O N :

La R.T.C. nous ayant fourni les fiches de plusieurs séries de manipulations consécutives, nous avons pu effectuer des simulations, en suivant le principe exposé en 21.3 : prenant en compte une nouvelle manipulation, la connaissance des valeurs des débits et temps affichés lors de cette opération, ainsi que celle des épaisseur moyenne et résistivité moyenne mesurées en fin de réaction, nous ont permis d'assurer l'identification, manipulation après manipulation, suivant le schéma 2-4 (ou 2-6). La connaissance des paramètres placés dans le tableau PREVOI ($\hat{c}_k$, $\hat{s}_k$, c_k , s_k ...) nous a permis de suivre, pas à pas, la façon dont le modèle correspondait à l'état du processus.

Comme le programme permettant d'évaluer les matrices Θ , P et R n'a été mis au point qu'assez tard dans cette étude, nous avons dû exploiter ces simulations pour évaluer au mieux les matrices de covariance utilisées. C'est d'ailleurs ce qui nous a amené à calculer les éléments placés dans PREVOI.

De plus, toutes les simulations effectuées nous ont permis d'essayer plusieurs modèles différents, sans être obligés de passer par des essais sur le site, nécessairement longs, fastidieux et coûteux. Nous avons pu ainsi introduire progressivement les paramètres DH2 et DSI, qui n'existaient pas dans les premiers essais, puisque la Radiotechnique ne faisait guère varier ces éléments.

Nous avons pu aussi tester la stabilité du modèle et son observabilité. Ainsi, un modèle a été jugé trop instable, parce que non véritablement observable, et nous avons été conduits à l'abandonner. Notons, d'ailleurs, que la non observabilité d'un système se traduit, dans le cadre de l'estimation de Θ , P, R, par une matrice A (définie en § 22.13) qui, théoriquement, n'est pas inversible. Ainsi, un modèle non observable, ou faiblement observable, aura une matrice A qui sera numériquement mal inversible. Il en résultera, bien sûr, des estimations de Θ fantaisistes. Ceci nous est d'ailleurs arrivé lorsque nous avons essayé un certain modèle dont l'équation en épaisseur était : $\frac{e}{T} = \gamma \frac{DSI}{DH2} + \delta$. Lorsque tout un lot de manipulations à même débit de $SiCl_4$ (DSI) et même débit de H_2 vecteur (DH_2), le modèle n'est pas observable (puisque les dynamiques relatives à γ et δ ne sont pas excitées). Lors de l'estimation de Θ , P, R, la matrice A calculée n'était pas inversible, aux erreurs d'arrondis près, et les valeurs obtenues des coefficients de Θ n'avaient aucun rapport avec celles que fournit l'étude théorique exposée en § 31.1.

41.2 - RESULTATS :

- Généralités
- Courbes récapitulatives

41.21 : Généralités :

Le premier résultat de ces simulations a été, bien sûr, de permettre de vérifier la faisabilité de la méthode d'identification utilisée. A cet égard, le bilan est entièrement positif, il est d'ailleurs normal qu'il n'y ait eu aucun problème, puisqu'il importe peu au modèle que ses entrées et sorties aient ou non une signification physique. La présence des "convertisseurs" explicités fig. 2-6 ne présente donc absolument aucun inconvénient.

Plusieurs modèles ont pu être testés, le dernier retenu faisant état au mieux de l'ensemble des variables envisagées. Il est d'ailleurs possible d'ajouter encore de nouvelles variables, comme la température par exemple qui a une influence certaine, mais encore mal connue, sur les caractéristiques de la couche épitaxiale.

Un autre point important a été de permettre de trouver des initialisations raisonnables de P, Q et R, et de confirmer l'ordre de grandeur pressenti. Ceci a, bien sûr, été possible grâce à de nombreuses simulations. Ces essais nous ont aussi permis de nous rendre compte directement de l'influence de ces initialisations et, en particulier, de celle des covariances. Ceci peut paraître dérisoire, pourtant il est essentiel de pouvoir évaluer l'importance et les conséquences de telle ou telle covariance. C'est d'ailleurs essentiellement sur celles-ci qu'il faudra désormais jouer pour adapter le modèle au processus. Savoir interpréter tel ou tel résultat sera essentiel pour les opérateurs lorsque l'automatisation sera en ligne.

Ainsi, par exemple, nous avons rencontré un problème important : malgré des covariances raisonnables, le modèle ne suivait que très mal le processus. Pour certaines manipulations, même, l'erreur de prévision, en résistivité, était plus importante après le réajustement du modèle. Une telle situation dénote, bien sûr, une erreur puisque le réajustement du modèle a pour conséquence d'éloigner celui-ci du processus. Nous avons, par exemple, les valeurs suivantes :

$$\rho_k = 2,8$$

$$e_k = 6,5$$

$$\rho'_k = 9,8$$

$$e'_k = 5,8$$

Cet incident était dû à une mauvaise initialisation des termes non diagonaux de R, ce qui avait entraîné, au fil des itérations, une trop grande augmentation des termes non situés sur les blocs diagonaux de P. Par conséquent, un réajustement de TETA, dû à l'erreur sur e, a entraîné sur les coefficients de TETA, relatifs à la résistivité, une modification plus importante et en sens contraire que la part de réajustement dû à l'erreur sur la résistivité. Ce qui a donc occasionné une augmentation de l'erreur en résistivité. Pour y remédier, il a donc suffi de diminuer la valeur des covariances croisées de R ou celles de P.

41.22 - Courbes récapitulatives :

- Exemple des conséquences d'un changement de bouteille
- Exemple de faible observabilité

Pour des raisons évidentes de mise en page, nous avons séparé les éléments qui ont surtout trait à l'épaisseur de ceux qui ont surtout trait à la résistivité. Dans la mesure où les covariances croisées $R_{21} = R_{12}$ de w ne sont pas nulles, ceci n'est pas légitime, puisqu'une erreur de révision en épaisseur va influencer sur les modifications du modèle en résistivité. Cependant, ces covariances sont faibles, et nous pouvons, du moins dans une première approche, étudier séparément chaque partie du modèle. Dans la figure 4-1, nous avons représenté, de haut en bas, l'évolution de : ξ et ξ' , puis e et $\hat{e}$, puis T et $\hat{T}$; enfin θ_{22} et $\hat{\theta}_{22}$. De la même façon, la figure 4-2 comprend les courbes récapitulatives de ρ et $\hat{\rho}$, puis ρ et $\hat{\rho}$, puis DD et $\hat{DD}$, enfin θ_{11} et $\hat{\theta}_{11}$. Pour plus de clarté, nous avons été conduits à utiliser des échelles très différentes selon les courbes, le point zéro n'étant d'ailleurs pas toujours représenté. De plus, les ordres de grandeur des quantités représentées étant parfois très différents, nous avons dû, dans certains cas, utiliser deux échelles distinctes, mentionnées alors l'une à gauche et l'autre à droite des graphiques.

Rappelons (§ 22.21.2) que la quantité $\tilde{a}$ est l'erreur d'estimation de la grandeur a , exprimée en pourcentage ; le calcul de l'estimée $\hat{a}$ de a étant fait avant le réajustement du modèle par la prise en compte de la manipulation en question ; a' est cette même erreur d'estimation, mais calculée après le réajustement du modèle. Il est facile d'exploiter et de comparer les courbes représentant $\tilde{a}$ et a' : ces deux courbes peuvent être proches l'une de l'autre, sans pour autant que $\tilde{a}$ soit faible ; nous pouvons alors dire que le filtrage tient peu compte de la dernière manipulation, et beaucoup de l'état antérieur du modèle.

Une courbe $\bar{g}'$ toujours voisine de zéro indiquerait, par contre que le filtrage tient essentiellement compte de la dernière manipulation (c'est d'ailleurs le cas pour certains points isolés : P_{1230} , P_{1232} , P_{1243} par exemple).

41.22.1 - Exemple des conséquences d'un changement de bouteille :

Analysons, par exemple, les courbes présentées sur les figures 4-1 et 4-2, récapitulatives des paramètres essentiels permettant de suivre l'évolution du processus. Ces données sont relatives à une série de 36 manipulations ayant eu lieu sur le four 2 en Mai 1973. L'épithaxie était faite avec du tetrachlorure de silicium (SiCl_4), les débits "imposés" par l'opérateur étant laissés constants (c'était presque toujours le cas à cette époque), et avaient les valeurs suivantes : $\text{DSI} = 2,4 \text{ l/mn}$ et $\text{DH2} = 80 \text{ l/Mn}$. Deux perturbations importantes sont à noter au cours de cette série : un changement de bouteille de SiCl_4 , opéré entre les manipulations numéros 1218 et 1219 d'une part, et un changement de bouteille d'Arsine, opéré entre les manipulations 1229 et 1230 d'autre part. Nous pourrions donc observer le comportement du modèle lors de ces perturbations.

Les manipulations 1210 à 1218 ont toutes les mêmes entrées. Il est donc facile de voir que des variations d'épaisseur (e) de 1μ (4 %) sont tout à fait raisonnables et font partie du bruit inhérent au processus. Il est donc parfaitement normal que le modèle ne réagisse que très peu à ces bruits, et donc que $\bar{e}$ soit à peu près constant, ce qui entraîne de petites oscillations en $\bar{g}$ et $\bar{g}'$. Le changement de bouteille (1218-1219) crée une perturbation importante, en augmentant la vitesse de dépôt pour un débit SiCl_4 mesuré constant (en effet, la pression de la nouvelle bouteille étant plus importante, un même débit d'hydrogène barbotant dans SiCl_4 dissoudra plus de gaz et, par conséquent, le débit SiCl_4 réel augmente, sans que sa mesure soit augmentée).

Les opérateurs avaient d'ailleurs prévu cette augmentation de vitesse de dépôt, puisqu'ils ont diminué le temps de dépôt (de façon insuffisante d'ailleurs, car cela n'a pas empêché l'épaisseur d'augmenter brutalement). Ceci explique le fait que ϵ ait augmenté, alors que $\hat{\epsilon}$ a diminué. Lors des manipulations suivantes, le modèle va combler le retard qu'il a acquis. On voit qu'il faut 7 à 10 manipulations pour combler ce retard. Ce nombre est incontestablement trop important ; il est, en partie, dû au fait que la perturbation est déjà un peu importante, sans l'être assez pour être interprétée comme un changement radical des caractéristiques du processus ; de plus, le processus met un certain temps à se stabiliser après la mise en circuit de la nouvelle bouteille, et la vitesse de dépôt continue d'augmenter : ainsi, le temps de dépôt diminue de 1222 à 1223, tandis que l'épaisseur augmente. Quant à la résistivité, elle est aussi légèrement affectée par ce changement de bouteille (ce qui est normal, puisque le DSI réel est légèrement augmenté, sans d'ailleurs que le DSI mesuré le soit). C'est ce qui explique que l'erreur d'estimation de résistivité, négative avant cette perturbation, devienne positive. Mais la perturbation est assez faible, ce qui entraîne peu de modifications des coefficients de Θ .

Examinons maintenant l'effet du changement de bouteille d'Arsine (opéré entre les manipulations 1229 et 1230) ; il est pratiquement nul sur l'épaisseur, ce qui est normal puisque l'épaisseur ne dépend pratiquement pas du débit de gaz dopant. Il est, par contre, très important vis à vis de la résistivité : celle-ci a, en effet, peu diminué ($6,9 \Omega \times \text{cm} \rightarrow 6,16 \Omega \times \text{cm}$) malgré l'augmentation importante du débit affiché ($1,43 \text{ l/mn} \rightarrow 4,07 \text{ l/mn}$). C'est ce qui crée une erreur d'estimation importante, entraînant une réinitialisation du modèle, concrétisée par le saut de Θ_{31} de 0,6 à 0,97. Plus encore que lors de la perturbation précédente, le processus met du temps à se stabiliser : comme le montrent les résultats des manipulations 1230-1231-1232, pour lesquelles la résistivité diminue malgré la diminution de débit, ou ceux de la 1235, qui présente une résistivité plus faible malgré un débit pratiquement identique. De même, de 1238 à 1243, la résistivité

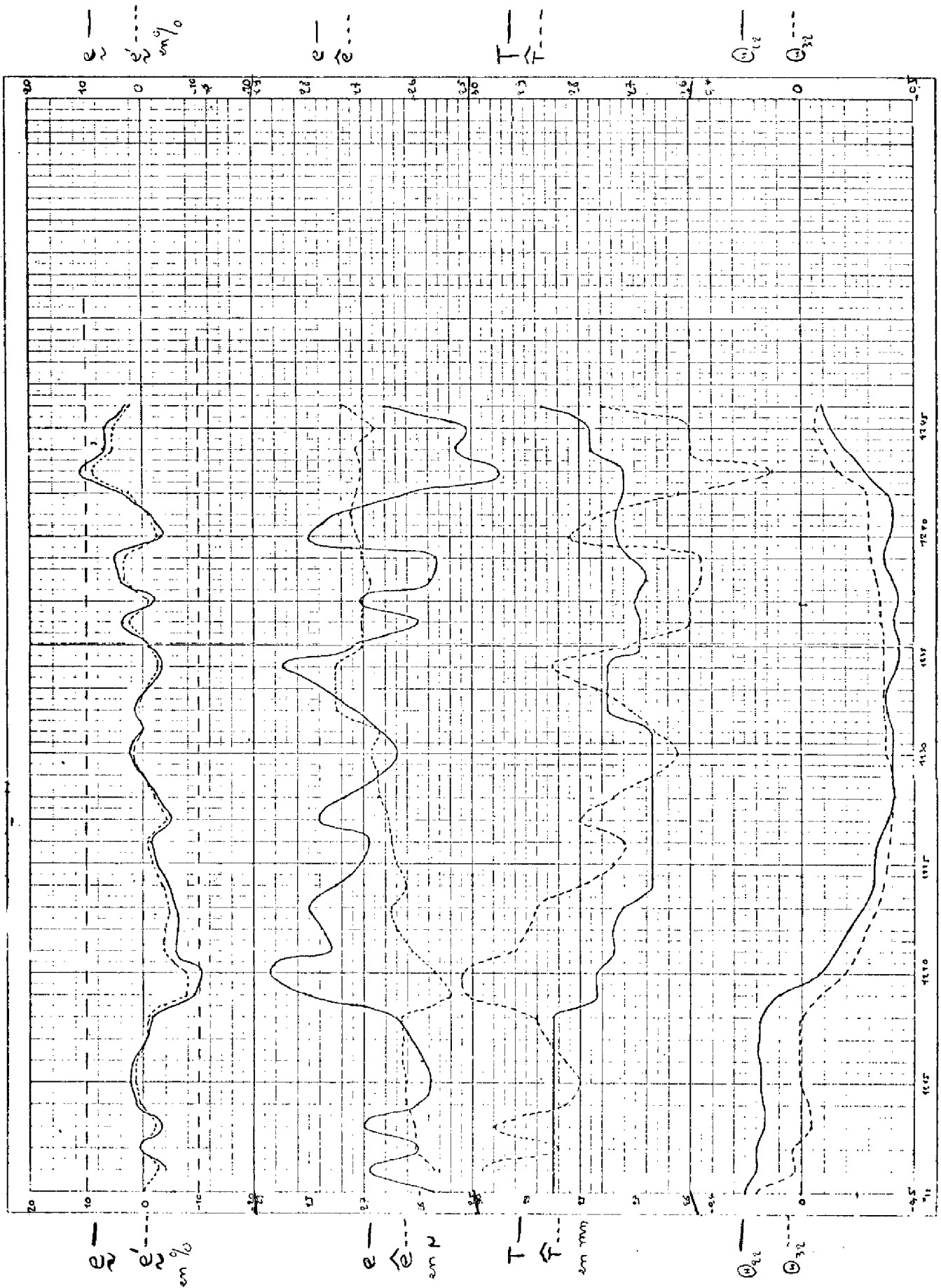


Figure 4-1 :
Courbes représentatives d'une première simulation. EPAISSEUR.

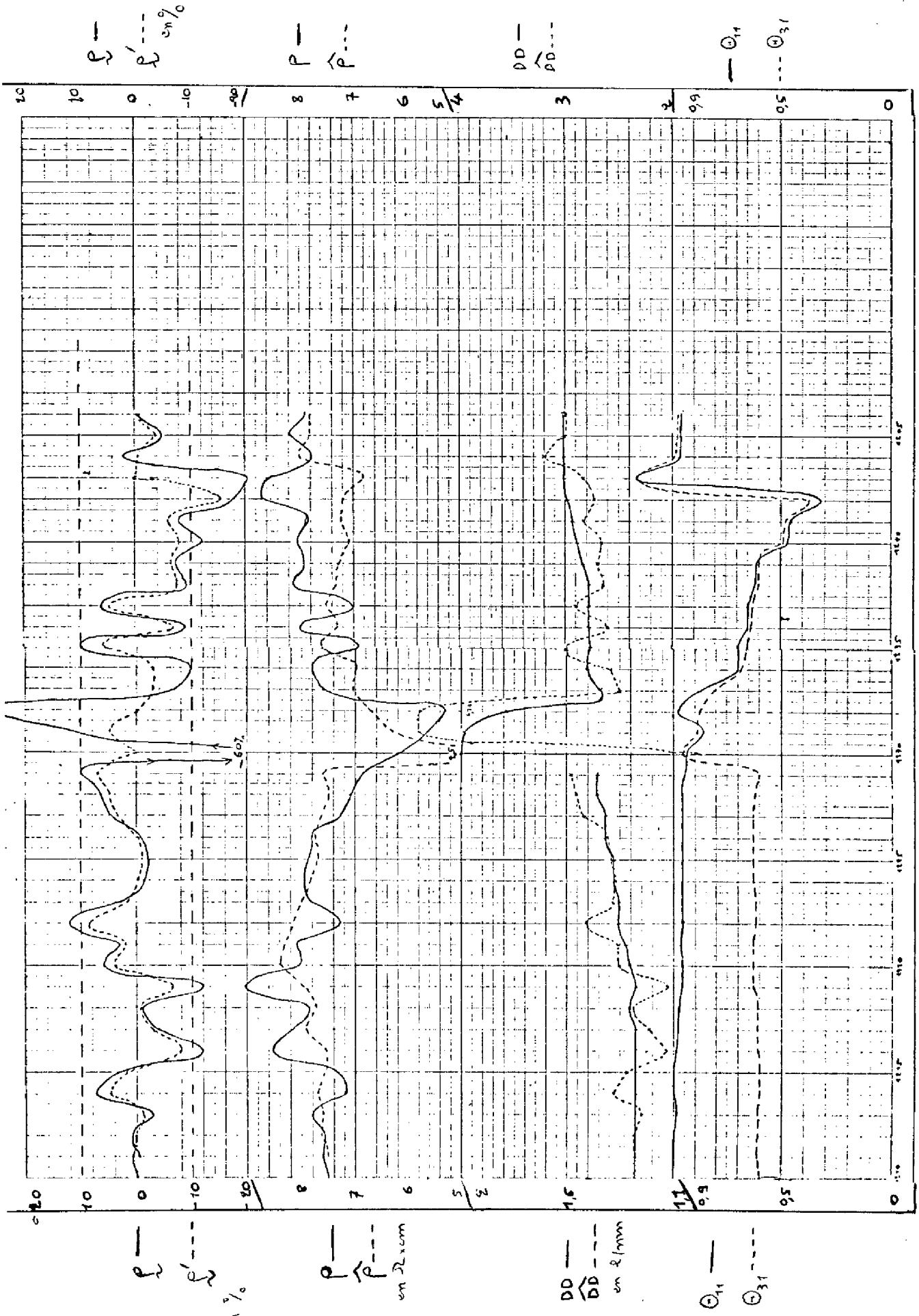


Figure 4-2 :
Courbes représentatives d'une première simulation. RESISTIVITE.

reste à peu près constante malgré un débit qui augmente. Tout cela a entraîné des répercussions notoires sur les coefficients du modèle, qui baissent (en valeur absolue) progressivement et de façon anormale entre 1232 et 1242. Une réinitialisation du modèle a donc été nécessaire et s'est effectuée en 1243. (on pourrait d'ailleurs très facilement opérer une réinitialisation systématique dès que Θ_{11} n'est pas compris entre -0,8 et -1,3 par exemple).

Ces courbes montrent bien la complexité de l'épitaxie, et que l'interprétation des résultats est toujours délicate ; il faudrait d'ailleurs tenir compte non seulement des valeurs moyennes des épaisseurs et résistivités sur un lot, mais aussi de leur répartition et des normes souhaitées. Il faut bien voir que, lors d'une exploitation en temps réel, l'opérateur pourra "annuler" une manipulation jugée aberrante, ou imposer de lui-même une réinitialisation de Θ , ou de P, Q, ou R, ce qui donne alors beaucoup plus de souplesse et de précision à l'ensemble de la commande.

41.22.2 - Exemple de faible observabilité :

Analysons les courbes présentées sur la figure 4 - 3 ; là encore les débits "imposés" par l'opérateur sont restés constants, à savoir : DSI = 2,4 l/mn et DH2 = 80 l/mn.

Les premières manipulations montrent une grande stabilité du processus qui présente peu de bruit. La manipulation 1021 permet d'affirmer que le modèle correspond très bien à l'état du processus puisqu'une variation de débit (assez faible) entraîne une variation de la résistivité prévue à peu près identique à la variation réelle. Il est d'ailleurs probable que cette variation, accidentelle, soit due à une erreur d'affichage, car rien ne permet, au niveau des feuilles de manipulations, de la justifier. Rien n'explique non plus l'écart brusque du débit dopant de la manipulation 1023 ; la résistivité n'est pas du tout affectée par cet écart, et il est donc normal de noter une erreur de prévision importante. Le recalage du modèle, hors filtrage, évite tout retard d'identification.

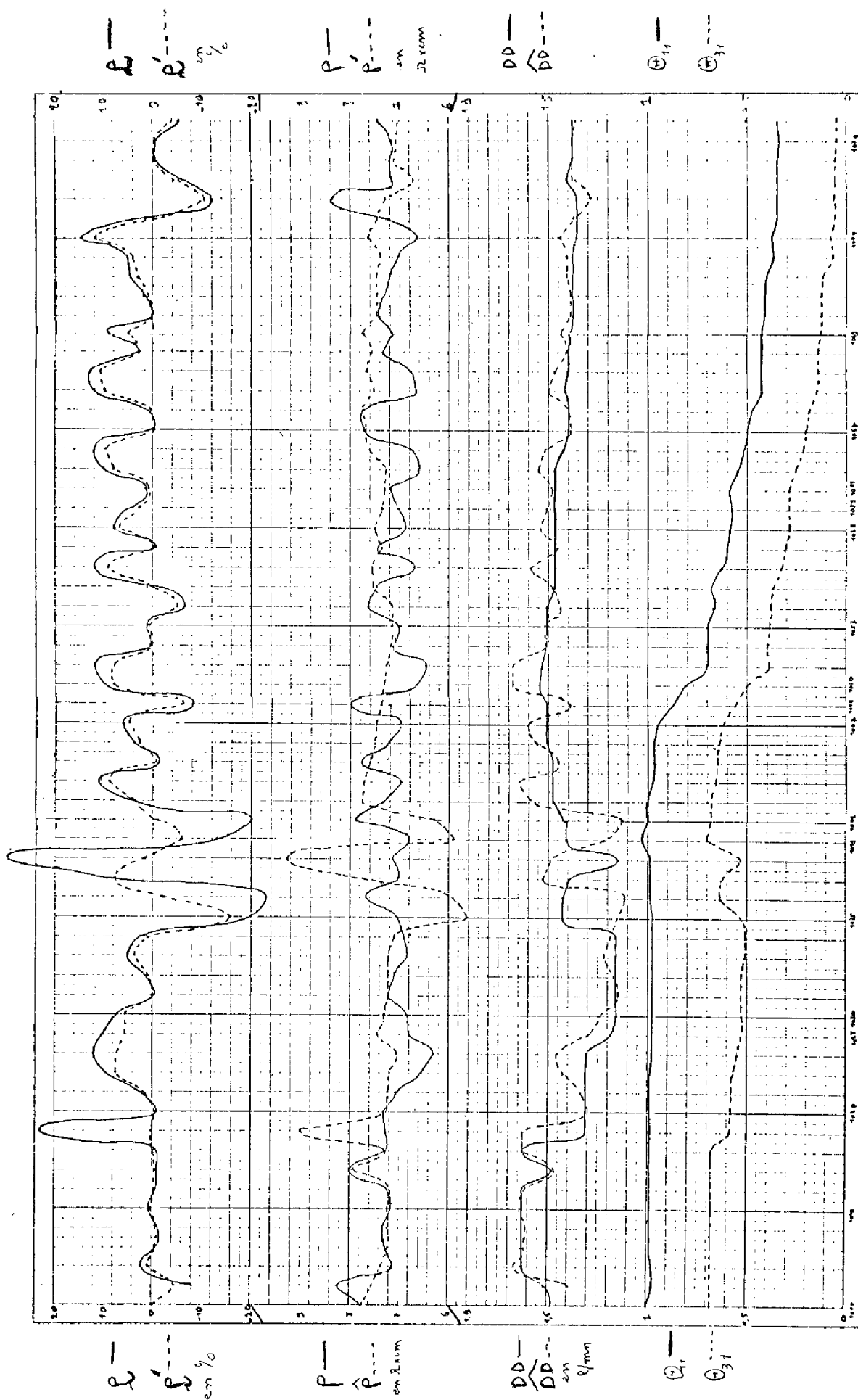


Figure 4-2 :
Courbes représentatives d'une deuxième simulation, PROSTIVITE.

C'est surtout l'évolution des coefficients du modèle entre les manipulations 1042 et 1080 qui retient notre attention. Bien que les erreurs de prévision restent raisonnables, les deux coefficients relatifs à la résistivité dérivent progressivement. A l'origine, il y a, à notre avis, un problème d'observabilité du modèle, dans ces conditions d'utilisation. En effet, le débit dopant est presque constant lors de ces quarante manipulations, la résistivité aussi ; et, par conséquent, $\log \frac{DD}{DSI}$ et $\log \rho$ sont presque constants. Il s'ensuit une faible observabilité du processus, puisque les entrées du modèle n'excitent aucun coefficient. On retrouve ce problème au niveau de l'estimation de θ , P et R par la méthode de maximum de vraisemblance exposée au § 22-13, où les résultats sont très fantaisistes. Augmenter ou diminuer les valeurs des matrices de covariance ne modifie pas grand-chose au problème : la dérive est plus ou moins rapide. La seule modification qui puisse, en partie, résoudre ce problème, est de changer de modèle pour le rendre plus sensible à de petites variations de débit dopant et de résistivité. C'est ce que nous proposons au § 43-4 ("prolongements possibles").

42 - ESSAIS SUR LE SITE :

- Description
- Résultats

42.1 - DESCRIPTION :

Nous avons procédé à trois séries d'essais sur le site, qui nous ont permis de tester la valeur de l'identification appliquée à la commande en temps réel. Si des simulations permettent, en effet, d'apprécier la capacité du modèle à suivre le processus, elles ne permettent cependant pas d'observer la qualité de la commande qui en résulte : il est impossible, sans l'essayer, de savoir en combien de manipulations le modèle permet d'obtenir telles caractéristiques souhaitées.

La première série (Janvier 1974) nous a permis d'une part de prendre contact avec l'ensemble des opérations à effectuer à chaque fournée, et d'autre part, par ses résultats positifs, de continuer la recherche dans le sens où elle avait été commencée. La seconde série (15 au 30 Juin 1974) nous a permis de nous rendre compte que le modèle utilisé pouvait être excellent dans de très larges gammes d'épaisseur et de résistivité, pourvu que plusieurs manipulations préalables aient bien ajusté les coefficients du modèle ; nous y avons aussi appris que le modèle utilisé alors était imparfait pour les changements de débit de SiHCl_3 , et nous nous sommes rendus compte de la nécessité de pouvoir réinitialiser automatiquement les coefficients du modèle (pour pallier d'une part cette imperfection et d'autre part d'éventuels changements brusques de caractéristiques du processus). Enfin, la troisième série (Avril 1975) nous a permis de tester le modèle sur d'importantes variations de débit d'hydrogène vecteur (DH_2), puis de vérifier qu'il s'adaptait suffisamment vite à de nouvelles conditions, grâce éventuellement à des réinitialisations.

Ces essais n'ont pas été simples à mettre en oeuvre. En effet, la jonction entre le réacteur et l'ordinateur n'était pas encore effectuée. Aussi, lorsque les plaquettes d'une fournée étaient mesurées, les opérateurs devaient nous téléphoner pour nous en communiquer les résultats et nous indiquer leurs souhaits pour la manipulation suivante. Nous devions alors perforer les cartes correspondantes, faire passer (en priorité !) le programme, pour pouvoir téléphoner les résultats aux opérateurs, qui les attendaient pour commencer la manipulation suivante. Un tel système - le seul possible en l'absence de jonction directe - a mis en évidence la bonne volonté, la disponibilité et la compétence de tout le personnel concerné.

42.2 - RESULTATS :

L'affichage de débits, ou même de temps, prévus étant quelquefois délicat, les opérateurs ont souvent été amenés à "arrondir" les valeurs que nous leur demandions d'afficher. Ceci a comme conséquence directe que les grandeurs "souhaitées" ($\hat{\alpha}$ ou $\hat{\rho}$) peuvent ne pas être exactement identiques au cours de plusieurs manipulations consécutives, bien que, sur le site, au moment de l'expérimentation, nous ayons souhaité des quantités identiques. S'ajoute d'ailleurs le fait que le modèle maintenant utilisé n'est pas exactement le même que celui des essais, et que les initialisations ont été modifiées depuis, ce qui influence bien sûr les valeurs des quantités souhaitées.

Précisons enfin que - comme pour les simulations - nous ne pouvons présenter ici l'interprétation que d'une petite partie seulement des essais effectués. Bien sûr, nous avons choisi ceux qui nous paraissaient les plus significatifs.

Dans la série que nous présentons, nous avons voulu étudier le comportement du modèle aux éventuelles variations de débit de SiHCl_3 (DSI). C'est pourquoi, nous avons opéré plusieurs sauts en DSI. La variation des caractéristiques du processus entre les manipulations 2213 et 2214 est due à un changement de la température de l'expérience : 1050°C pour 2213 et 1100°C pour les suivantes. Les premières manipulations montrent que le modèle est assez bien adapté au processus, tant pour l'épaisseur que pour la résistivité. La brusque variation que présente ϵ au niveau des manipulations 2224 et 2225 est caractéristique de la présence d'une manipulation aberrante. En effet, dans ce cas précis, les entrées relatives à la manipulation 2224 sont identiques à celles de 2223 ; l'épaisseur a cependant beaucoup évolué. Le modèle a donc été réévalué en fonction de cette manipulation ; comme il s'agissait d'une aberration du processus, la manipulation suivante est revenue à la normale, ce qui a provoqué un nouvel écart entre l'épaisseur prévue et l'épaisseur mesurée.

Si l'on ne tient pas compte de la manipulation 2223 (et c'est ce qui a été fait lors de l'expérimentation sur le site), l'épaisseur prévue de 2224 est assez bonne (erreur de prévision : 5 %). Ces résultats montrent que la partie du modèle relative à l'épaisseur est très bien adaptée au processus, y compris lors de variations de débits de SiHCl_3 (sauf au niveau de 2233, pour le passage de 2,5 l/mn à 4,5 l/mn où intervient un phénomène de saturation, qui ne peut être pris en compte par le modèle, linéaire).

Les courbes relatives à la résistivité montrent que, par contre, la partie du modèle relative à la résistivité, est beaucoup moins bien adaptée au processus lors de variations de débits SiHCl_3 : les erreurs de prévision sont importantes à chaque changement de valeur de DSI ; l'évolution du coefficient Θ_{31} , comparée à celle de DSI est significative et montre bien que Θ_{31} dépend de DSI, et donc que l'influence de ce terme n'est pas correctement prise en compte par le modèle.

43 - M I S E E N P L A C E D E L A C O M M A N D E
A U T O M A T I Q U E E T P R O L O N G E M E N T S
P O S S I B L E S :

- Description
- Programmes "d'intendance"
- Conséquences sur le travail de l'opérateur
- Prolongements possibles.

L'intérêt de cette étude trouve sa concrétisation s'il est possible d'afficher automatiquement les consignes calculées par l'ordinateur. La réalisation matérielle de cette automatisation est à la fois délicate et coûteuse ; de plus, elle exige des compétences très diverses (informatiques et techniques en particulier). Elle est cependant indispensable pour justifier et vérifier toute cette étude.

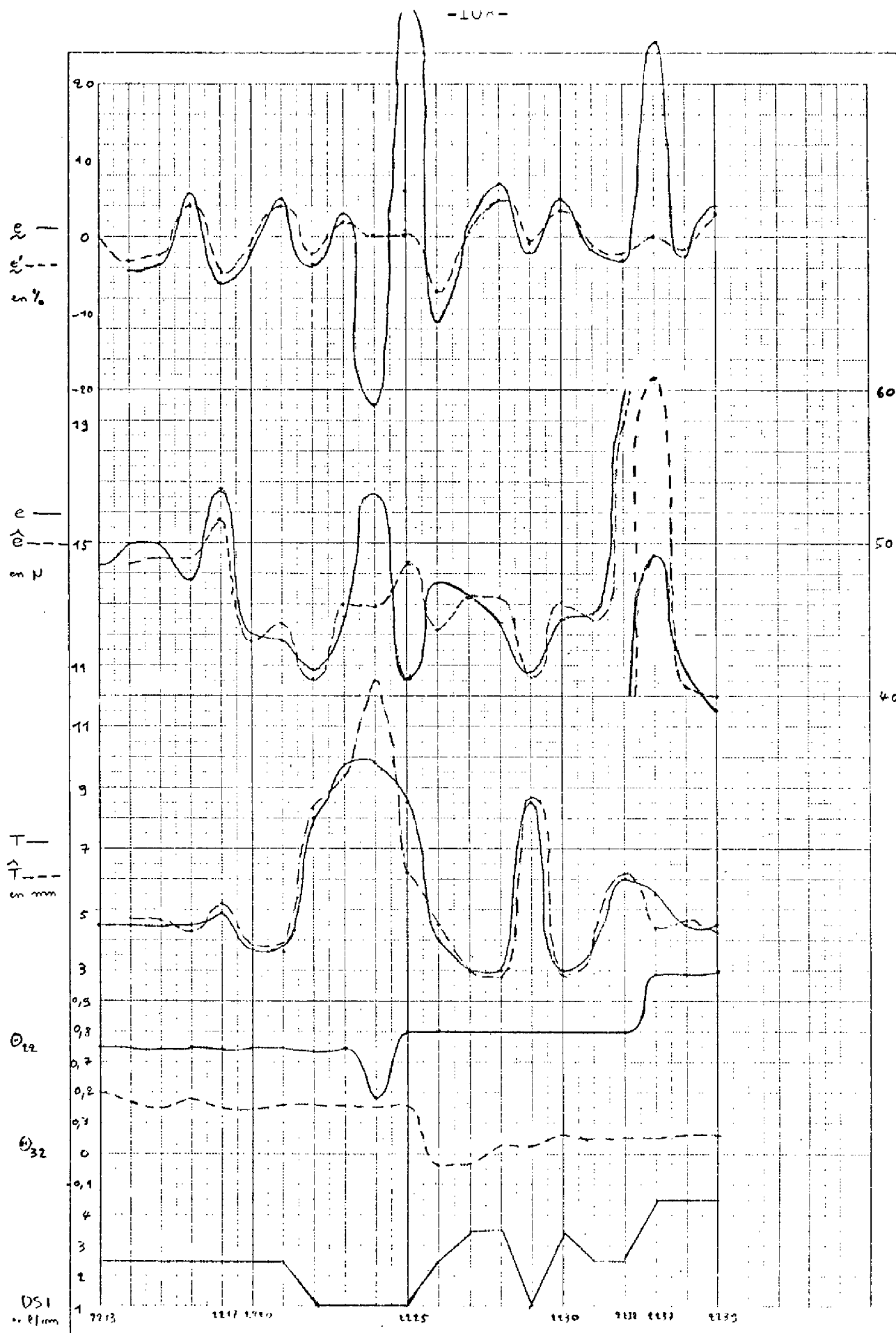


Figure 4-4 :
 Courbes représentatives d'essais sur le site (Réacteur 1).
 -EPAISSEUR-

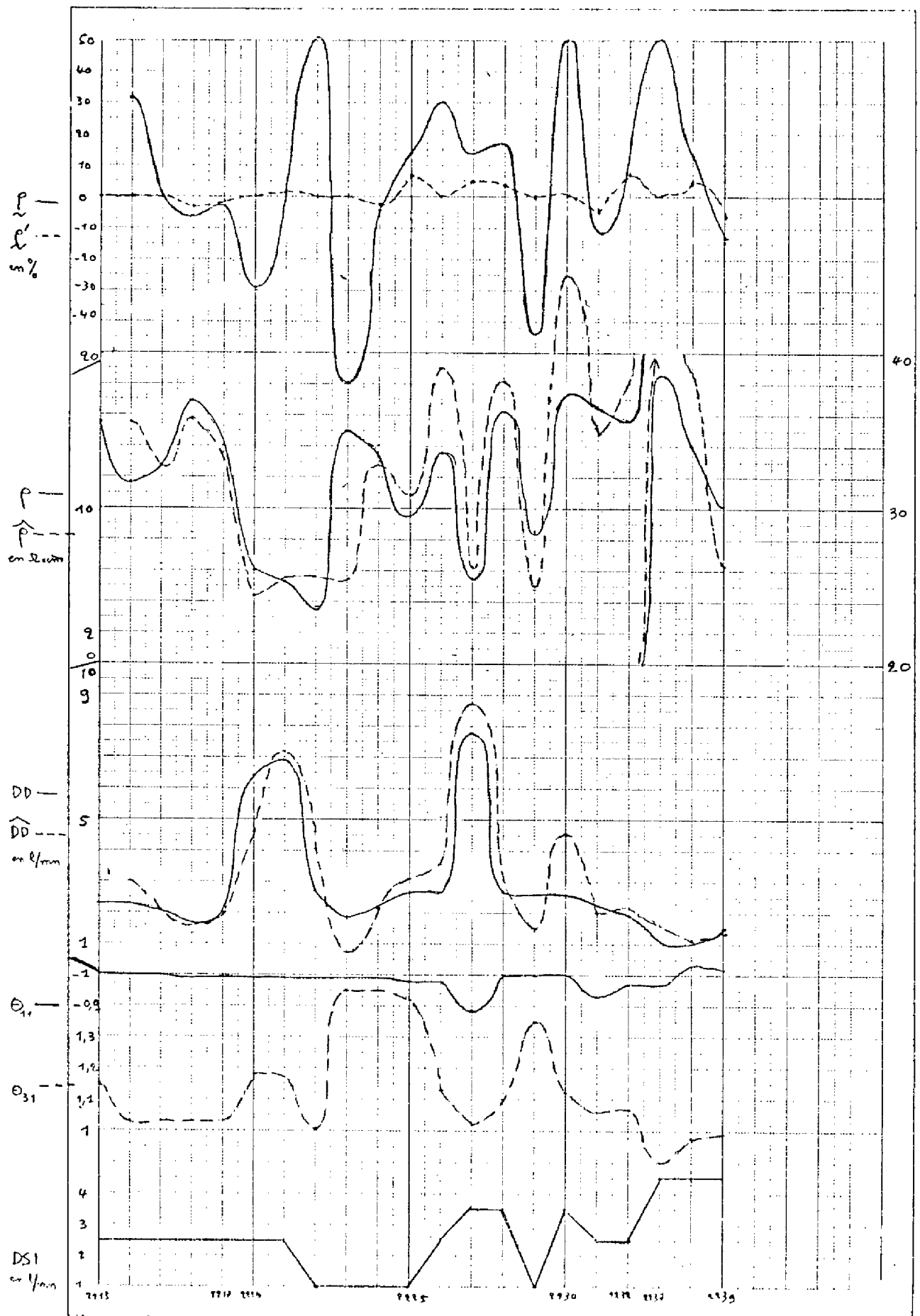


Figure 4-5 :
 Courbes représentatives d'essais sur le site (Réacteur 1).
 -RESISTIVITE-

Cette dernière phase est en cours de réalisation actuellement, et les premiers résultats devraient parvenir vers le mois de Septembre 1975. L'ensemble devrait être opérationnel en Janvier 1976. Il est donc trop tôt pour indiquer les problèmes soulevés lors de la mise en route du nouvel ensemble. Il est cependant déjà possible de préciser les moyens mis en oeuvre tant sur le plan du hardware que sur le plan du software.

43.1 - DESCRIPTION :

Tout un appareillage nouveau est nécessaire, puisque toutes les consignes doivent pouvoir être affichées automatiquement, et donc électroniquement. Ainsi, les débitmètres à billes ne conviennent plus, il en est de même des minuteriers utilisés. C'est donc l'ensemble du tiroir de commande qui est à changer. Ainsi, les débits seront mesurés par des débitmètres massiques, les temps par une horloge centrale. Ceci présente de nombreux avantages, en particulier au niveau de la fiabilité du matériel, et surtout au niveau de la précision de l'ensemble ; en particulier, les débits de gaz dopants seront mesurés directement, et non plus par une dilution, source d'une importante imprécision ; le débit de SiHCl_3 sera, lui aussi, mesuré directement, et ne sera donc plus un débit d'hydrogène barbotant dans une bouteille de SiHCl_3 liquide. Tout cela entraînera, bien sûr, des modifications importantes sur les initialisations des matrices de covariance.

Un micro-ordinateur (Micral), placé à proximité du four, gèrera l'ensemble de l'opération : régulations en température et en débit, mesure des temps, séquençement des phases, surveillance des sécurités La présence, sur le site, de cet ordinateur permet de libérer l'ordinateur central qui ne se consacrera qu'au calcul de la commande et à la gestion globale de l'épitaxie (en particulier, mise en mémoire des résultats). Il faut souligner l'importance de ce système qui tend de plus en plus à se généraliser : il permet de conserver

la souplesse d'un ordinateur important, sa capacité mémoire, tout en optimisant un certain nombre de tâches, bien définies, au niveau local. L'ordinateur central n'est pas embouteillé par toute une série de tâches de routine (comme la régulation des températures), et peut ainsi gérer de multiples processus.

Ce découplément permet, de plus, de ne pas arrêter le processus en cas de panne, ou de maintenance, de l'ordinateur central. Bien sûr, le calcul des valeurs de consigne sera alors impossible, mais l'opérateur pourra alors décider lui-même des entrées qu'il souhaite afficher à l'entrée du processus. Une telle "décentralisation" est appréciable.

Le dialogue opérateur - ordinateur se fera dans un sens à l'aide d'un clavier, et dans l'autre sens, à l'aide d'un écran cathodique et d'une console. De plus, un tableau synoptique indiquera à l'opérateur l'état du circuit de gaz (vannes ouvertes ou fermées). L'écran cathodique affichera les renseignements qui ont un caractère provisoire, et n'ont pas besoin d'être enregistrés ; ainsi, par exemple, les grandeurs importantes (temps, débit, température ...) seront indiquées toutes les dix secondes, ce qui permettra à l'opérateur d'être constamment au courant de l'état du processus ; l'écran permet de plus une plus grande souplesse dans le dialogue opérateur-ordinateur. La console est indispensable pour imprimer des renseignements destinés à être conservés (feuilles de manipulation par exemple).

43.2 - PROGRAMMES D'INTENDANCE :

Indiquons ici l'essentiel de ce qu'il est nécessaire de réaliser pour assurer l'ensemble de la commande.

Tous les renseignements relatifs à chaque manipulation seront enregistrés sur disque. Ainsi, seront conservés en mémoire les données physiques de l'ensemble de la réaction (et pas seulement ceux relatifs au dépôt épitaxial), ainsi que les éléments importants du filtrage K.B. : état des matrices Θ , P, O, R, PREVOI Ces renseignements pourront ainsi être listés à tout moment, sous des formats différents, permettant ainsi l'édition de fiches de manipulations, ou de suivis du modèle. Cette impression pourra être faite soit à l'appel du numéro de manipulation, soit en fonction des caractéristiques de celle-ci (par exemple, édition de toutes les manipulations postérieures à telle date, et dont la résistivité est comprise entre telle et telle valeur).

Un certain nombre de traitements devront pouvoir être effectués sur ces enregistrements. Citons les plus importants :

- 1 - Enregistrer des données relatives à une nouvelle manipulation. Notons que ceci peut avoir lieu aussi bien pour une manipulation récente que pour une manipulation plus ancienne, dont les mesures auront été retardées. Notons aussi que l'enregistrement des entrées du processus pilotées par le micral, seront transmises automatiquement à l'ordinateur central, sans passer par l'opérateur.
- 2 - Réajuster des coefficients du modèle pour tenir compte des résultats d'une manipulation (habituellement, cette seconde action est effectuée immédiatement après la première).

- 3 - Ne pas tenir compte des résultats d'une manipulation donnée (manipulation jugée aberrante au vu de résultats postérieurs à celle-ci), ou au contraire, reprendre en compte les résultats d'une manipulation "annulée" (manipulation a priori jugée aberrante, mais confirmée par la suite). Ceci nécessite la présence d'un "signal d'activité" indiquant si une manipulation est, ou n'est pas, prise en compte.
- 4 - Réinitialiser tout ou partie de certaines des matrices Θ , P, Q, R.

Enfin, pour le calcul des variables de commande, plusieurs opérations doivent être possibles :

- 1 - Tout d'abord, bien sûr, il faut pouvoir découpler l'ordinateur central (et donc toute la commande auto-adaptive) pour travailler en "manuel" ; l'opérateur indique alors directement au micral les valeurs des grandeurs à afficher en entrée du réacteur. Ceci est essentiel, non seulement pour ne pas être arrêté par d'éventuelles immobilisations de l'ordinateur principal (maintenance), mais aussi pour essayer tel ou tel type de manipulation, une nouvelle initialisation, ou même un nouveau modèle.

- 2 - L'opérateur doit aussi pouvoir "essayer" plusieurs "souhaits" différents (en particulier, il peut tester plusieurs débits de SiHCl_3 , ou de H_2).

- 3 - Ceci pourra être fait en se servant de l'état du modèle consécutif à la dernière manipulation ou à toute manipulation antérieure, désignée par l'opérateur (dont les sorties avaient, par exemple, un ordre de grandeur comparable à celui envisagé pour la prochaine manipulation).

43.3 - CONSEQUENCES SUR LE TRAVAIL DE L'OPERATEUR :

Il est clair que l'automatisation mise en oeuvre va profondément modifier les conditions de travail de l'ensemble du personnel lié à l'épitaxie, et plus particulièrement celles des opérateurs. Le contenu, la charge, et l'organisation du travail vont être complètement transformés. Il me paraît essentiel de ne ménager aucun effort pour que cette transformation soit réussie.

Il est possible, en effet, de réduire le rôle de l'opérateur à celui d'un manutentionnaire qui devrait introduire les plaquettes dans le four, les en sortir pour les mettre sur le banc de mesure, puis les ranger et faire confiance à l'ordinateur pour calculer les meilleures consignes possibles ... Une telle situation serait préjudiciable à tous niveaux : pour l'opérateur, d'abord, qui, très vite, ne trouverait plus d'intérêt dans son travail et se sentirait dominé par l'ordinateur ; pour la Radiotechnique aussi, qui se priverait alors d'un élément essentiel de contrôle dans la chaîne de commande.

En effet, toute automatisation suppose un nouveau degré de surveillance et d'action. L'intérêt de faire effectuer les séquences automatiquement (réglages et régulations des débits, de la température en particulier) est non seulement d'améliorer leur fiabilité et leur précision, mais surtout de libérer l'homme pour lui permettre d'effectuer des tâches plus globales. Ces tâches de surveillance - évolution du modèle, des matrices de covariance notamment - sont d'ailleurs essentielles pour assurer une identification aussi parfaite que possible. Le choix des débits DSI et DH2 reste d'ailleurs l'apanage de l'opérateur qui peut, de plus, prévenir une éventuelle aberration de la commande numérique.

Tout cela nécessite, bien sûr, une certaine formation de l'opérateur pour qui l'ordinateur ne doit pas être cette boîte noire, cette machine qui décide pour lui. Il est important qu'il connaisse le principe de la modélisation pour en saisir les limites. Une telle formation est difficile à mettre en oeuvre, mais elle est primordiale pour la réussite de la réalisation de la commande élaborée. Il me semble souhaitable que le personnel concerné ait pris contact avec le nouvel appareillage avant de connaître le principe qui est à l'origine de la commande. En effet, on constate généralement qu'il est plus facile de comprendre l'ensemble d'un phénomène (ici le principe de la commande auto-adaptative) lorsque l'on a déjà assimilé les moyens d'agir sur ce phénomène : connaître le mode d'emploi d'un mécanisme est souvent très utile pour mieux saisir le principe de ce mécanisme.

Ce personnel pourra alors prendre des décisions importantes, relatives au déroulement de l'identification ou de la commande : recalages de certains paramètres, réinitialisations de tout ou partie de certaines matrices. Compte-tenu des résultats obtenus et de l'expérience ainsi acquise, il sera alors, sans doute, possible de mettre au point un modèle mieux adapté au processus contrôlé.

Le rôle des opérateurs a été déterminant tout au long de la recherche effectuée, et je suis convaincu que la mise en place de l'ensemble de la commande étudiée ne pourra réussir qu'avec le concours de ceux-ci.

43.4 - PROLONGEMENTS POSSIBLES :

Le travail présenté ici appelle un certain nombre de prolongements et de recherches complémentaires, tant à propos de l'épitaxie proprement dite (recherche de nouveaux modèles par exemple), que sur un plan plus fondamental (identification d'un modèle de processus inverse, amélioration de filtrage ...).

Ainsi, nous avons vu qu'un inconvénient important du modèle utilisé est la présence des logarithmes dans la partie relative à la résistivité ; ce qui présente trois défauts essentiels : tout d'abord, les bruits du filtrage (équation 5, § 31.11.2 deviennent multiplicatifs au lieu d'être additifs, ce qui pose quelques problèmes). De plus, le modèle ainsi obtenu est très sensible aux variations du paramètre β , qui doit donc être connu très précisément. Enfin, cela crée, dans certains cas d'utilisation, des phénomènes de faible observabilité inattendus, comme ceux exposés au § 41.22 : pour une série de manipulations à normes souhaitées constantes, la résistivité moyenne mesurée varie assez peu (elle reste, par exemple, dans une fourchette 6 - 8 $\Omega \cdot \text{cm}$), ce qui entraîne une variation encore plus faible de $\log \rho$ (dans cet exemple, entre 0,77 et 0,9). Deux composantes du vecteur x , entrée du modèle, sont donc constantes, ou du moins presque constantes (en effet, le terme 1 de x est indispensable, car il représente l'ordonnée à l'origine des droites linéarisant les courbes fournies par les abaques). Ceci entraîne une non observabilité, ou du moins une faible observabilité du processus, par ce modèle. Pour y remédier, il est possible d'imposer une valeur fixe à α (qui est assez peu variable, et toujours voisin de -1) ; l'équation relative à la résistivité devient alors : $\frac{DD}{DSI} = \beta \frac{1}{\rho} + \epsilon$, ou bien $DD = \beta \frac{DSI}{\rho} + \epsilon$ (les ingénieurs de la Radiotechnique pourront préciser quelle forme est la plus proche du processus). Seules des simulations et éventuellement des essais sur le site, pourront confirmer, ou infirmer, la validité d'un tel modèle.

On peut aussi envisager de ne plus imposer les débits de SiHCl_3 et d' H_2 vecteur, mais de les calculer ; on peut pour cela les introduire dans le modèle, ou opérer un bluclage sur la partie "calcul des consignes", pour optimiser DSI et DH_2 suivant un certain critère.

Les autres prolongements concernent essentiellement la méthode de filtrage utilisée.

Ainsi, par exemple, on pourrait envisager de calculer la matrice de covariance P par une autre méthode, ce qui permettrait de tenir compte du fait que les bruits traités dans la pratique ne sont pas des bruits blancs. Par exemple, il est envisageable de calculer P (et R) par la méthode de maximum de vraisemblance, exposée au § 22.13, en prenant, pour effectuer les calculs, les cinq ou six manipulations qui précèdent. La matrice R deviendrait alors variable, ce qui est certainement plus proche de la réalité du processus étudié.

Il serait intéressant aussi de mettre en place un filtre dont le gain serait d'autant plus important que "l'erreur" serait grande ; en effet, lorsque l'erreur est uniquement due au bruit, il n'y a aucune raison d'effectuer la moindre modification. Par contre, si l'erreur dépasse le niveau normal de bruit, il est essentiel d'opérer un réajustement qui tienne compte de la manipulation concernée. On pourrait, ainsi, par exemple, envisager une correction proportionnelle au carré de l'erreur, au lieu d'être proportionnelle à l'erreur comme dans le filtrage K.B. . Mais cela pose certainement des problèmes de stabilité du filtre ; de plus, celui-ci serait certainement particulièrement sensible au niveau de bruit présumé, qui restera essentiellement arbitraire. Notons que cela revient pratiquement à généraliser la notion de seuil introduite au § 22.22, en la rendant plus progressive.

Mentionnons enfin la possibilité d'effectuer d'autres modifications (du modèle ou des paramètres du filtre) hors du filtrage K.B. proprement dit ; une exploitation systématique des des valeurs du tableau PREVOI (§ 22.11.2) (par exemple statistique) devrait permettre d'obtenir des renseignements intéressants concernant le processus comme l'identification et pourrait, dans ce cas, avoir des conséquences au niveau de la commande.

Nous terminerons enfin en précisant que l'étude s'applique à une gamme assez large de processus . D'abord, bien sûr, à ceux qui sont assez semblables au réacteur d'épitaxie : impossibilité de mesures en cours de réaction, évolution progressive (éventuellement interrompue par des sauts précis, de préférence prévus), et présence de bruits. Et puis aussi, à tout problème qui nécessite une modélisation auto-adaptive, en vue de la commande.

C O N C L U S I O N D E L A Q U A T R I E M E P A R T I E :

L'exploitation des résultats de la simulation et de la commande ont mis en valeur les possibilités de la méthode employée, mais aussi ses défauts : tout d'abord, le modèle est suffisamment souple pour s'adapter très rapidement à n'importe quel état du processus ; ceci est dû à la possibilité de réinitialiser les coefficients du modèle, hors filtrage, lorsqu'il y a un écart trop important entre l'état du processus et celui du modèle. De plus, il n'y a aucune conséquence sur les capacités de filtrage des bruits, puisque ces réinitialisations n'ont lieu que lorsque les perturbations dépassent un certain seuil fixé par l'utilisation, et supérieur au niveau normal du bruit. Cette souplesse du modèle est essentielle pour la facilité d'utilisation, puisqu'elle permet d'une part de ne pas se soucier de l'initialisation de la matrice θ du modèle, et d'autre part de ne pas être obligé de modifier celle-ci à chaque perturbation importante. Enfin, elle évite tout risque de divergence du modèle.

L'inconvénient essentiel est la sensibilité de la modélisation (et donc de la commande) aux initialisations des matrices de covariance P , Q , R d'une part, et aux valeurs attribuées aux seuils à partir desquels il faut opérer une réinitialisation. Le fait de pouvoir, dans le cadre de processus peu évolutifs, évaluer P et R par la méthode de maximum de vraisemblance est d'un intérêt appréciable.

Il serait évidemment préférable de disposer d'un algorithme permettant de calculer, sans initialisation préalable, les matrices P, Q et R du filtrage de Kalman-Bucy (remarquons d'ailleurs que Q et R peuvent aussi être variables).

Relativement au processus lui-même, la meilleure connaissance de la commande améliorera la qualité et la précision du produit fini. Elle permettra aussi la production de plaquettes spéciales, jusqu'alors impossibles (ou très difficiles) à fabriquer. Par exemple, il sera très facile de déposer une couche épitaxiale dont la résistivité sera fonction de la profondeur : il suffit, en effet, de discrétiser la courbe souhaitée et de faire, pour chaque élément d'épaisseur envisagé, le calcul de la commande correspondant à l'épaisseur et la résistivité souhaitée.

-121-

C O N C L U S I O N

L'objectif des travaux exposés dans ce mémoire de thèse concerne la réalisation d'une commande automatique d'un réacteur d'épitaixie. Pour ce faire, nous avons d'abord analysé le processus étudié, examinant les contraintes qui influeraient sur la nature de la commande. Nous avons alors choisi une modélisation auto-adaptative, dont le mécanisme d'adaptation est lié à l'utilisation des méthodes de filtrage dues à Kalman-Bucy, dont nous avons élargi le champ d'application.

Les simulations effectuées ont permis de tester la validité de différents modèles envisagés, tout en ajustant les valeurs des initialisations et des matrices de covariance, éléments essentiels pour la qualité du filtrage, donc de l'identification et de la commande. Nous avons effectué plusieurs séries d'essais sur le site qui nous ont apporté des renseignements décisifs, tant sur la forme d'un modèle mathématique du processus, que sur la certitude d'une convergence de la commande en temps réel. Ces résultats permettent la mise en oeuvre matérielle de la commande automatique, qui nécessite plusieurs transformations technologiques importantes.

Le réacteur d'épitaixie a donc d'abord été la motivation de ce travail, le prétexte qui nous a permis d'étudier les méthodes auto-adaptatives classiques, pour les généraliser en les rendant utilisables à des gammes de processus beaucoup plus étendues, dont fait partie le réacteur étudié. De plus, ce réacteur est aussi la concrétisation matérielle de cette recherche, qui trouve ainsi une authentification des résultats exposés. Bien sûr, cette justification ne prendra toute sa valeur qu'avec la réalisation opérationnelle sur le site de la commande élaborée, mais les résultats acquis sont suffisamment positifs pour affirmer que les problèmes seront plus liés aux changements d'appareillage qu'à la méthode de commande proprement dite, qui est assez souple pour s'adapter à des conditions quelque peu différentes. Nous espérons que le personnel lié à l'épitaixie s'adaptera sans heurt à la nouvelle méthode de commande.

Nous souhaitons, de plus, voir dans un proche avenir la réalisation de commandes utilisant des méthodes semblables de modélisation auto-adaptatives.

A N N E X E 1

PRESENTATION MATERIELLE DU REACTEUR D'EPITAXIE

Quelques photos du réacteur étudié sont présentées dans les figures A1, A2, A3, A4, A5 .

La figure A1 montre le lieu de chargement et de déchargement du réacteur . Le tube 1 est ouvert, permettant donc le chargement et le déchargement des plaques, tandis que le tube 2 est fermé, prêt à l'emploi, ou en fonctionnant .

La figure A2 est la vue générale du panneau de commande ; on remarquera en particulier les neuf débitmètres à billes situés dans la partie intermédiaire du panneau .

La figure A3 précise la vue précédente ; on y voit en particulier le tableau synoptique, qui permet à l'opérateur de connaître l'état du circuit de gaz, ainsi que la matrice à diodes permettant l'enchaînement automatique des différentes phases de l'épithaxie . On y voit aussi les trois minuteries qui font l'objet des modifications les plus fréquentes, et un certain nombre de boutons de commande .

La figure A4 présente le réacteur lui-même : les gaz vont de la droite vers la gauche, à l'intérieur du tube de quartz, qui contient le suscepteur que l'on distingue entre les spires de l'enroulement chauffant .

Enfin, la figure A5 montre le circuit de gaz ; on y voit essentiellement les vannes électro-magnétiques, et des mélangeurs de gaz . Les débitmètres sont situés derrière le fond du tiroir, et les gaz partent vers le réacteur sur la gauche .

Tout cet appareillage va être complètement transformé par l'automatisation (sauf ce qui est présenté en figure A1) .

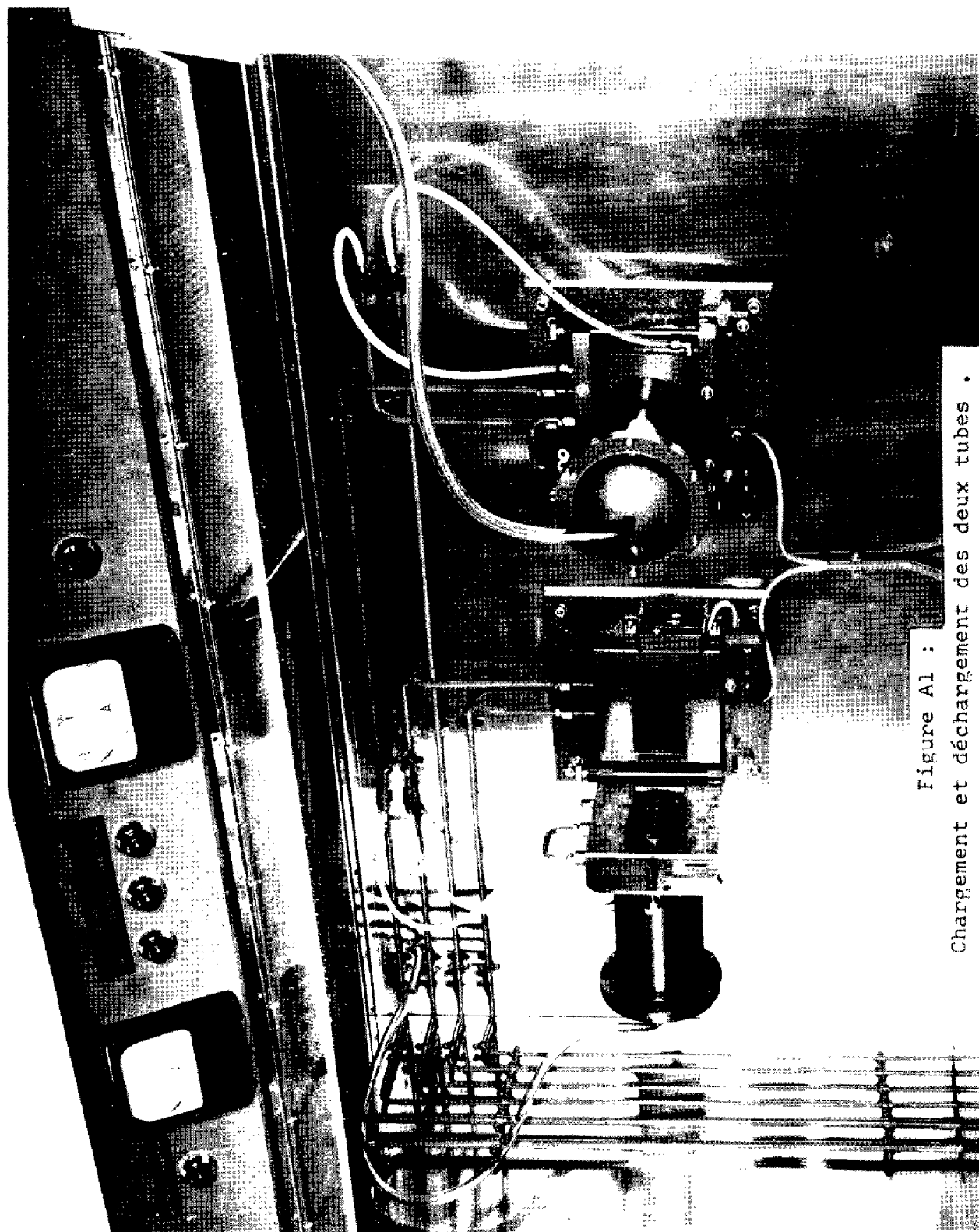


Figure A1 :
Chargement et déchargement des deux tubes .

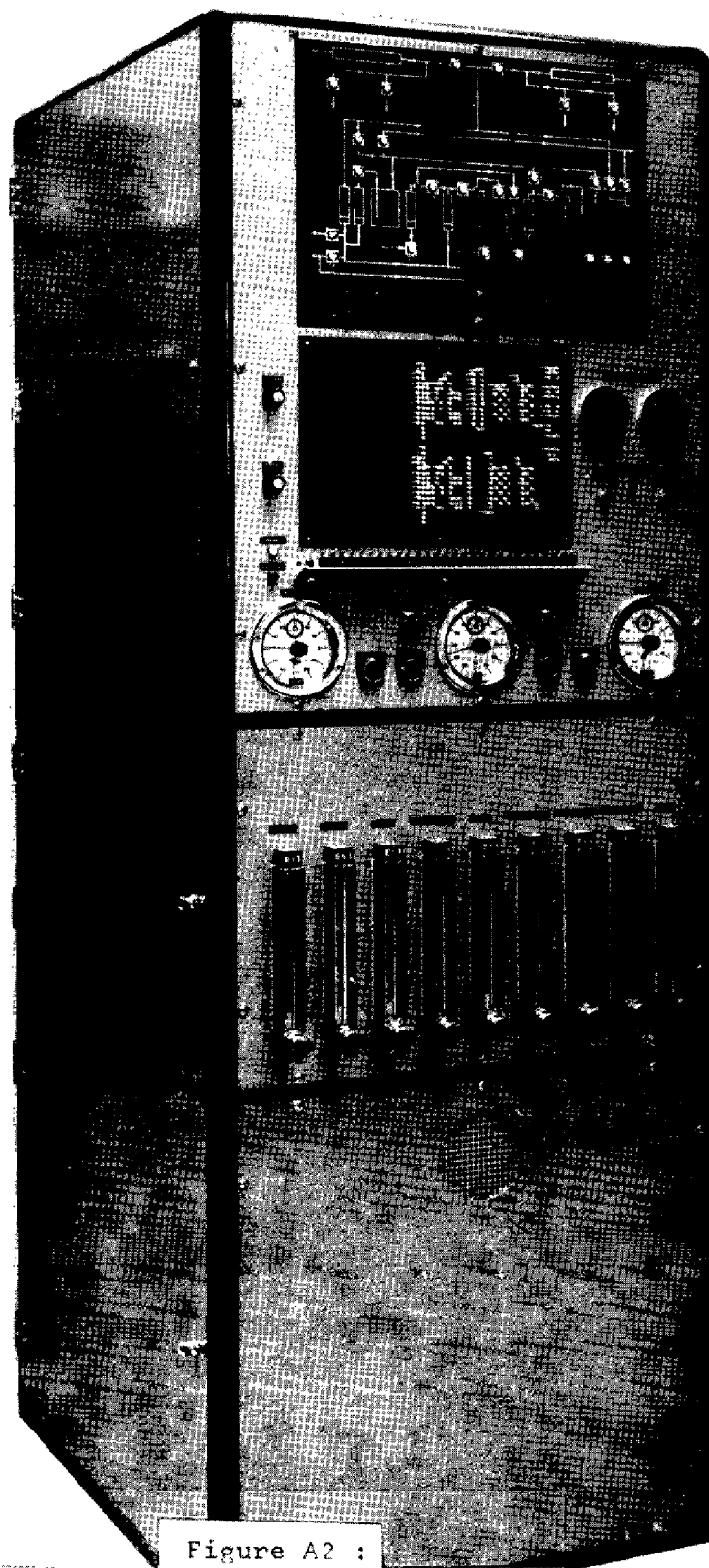


Figure A2 :
Panneau de commande : vue générale .

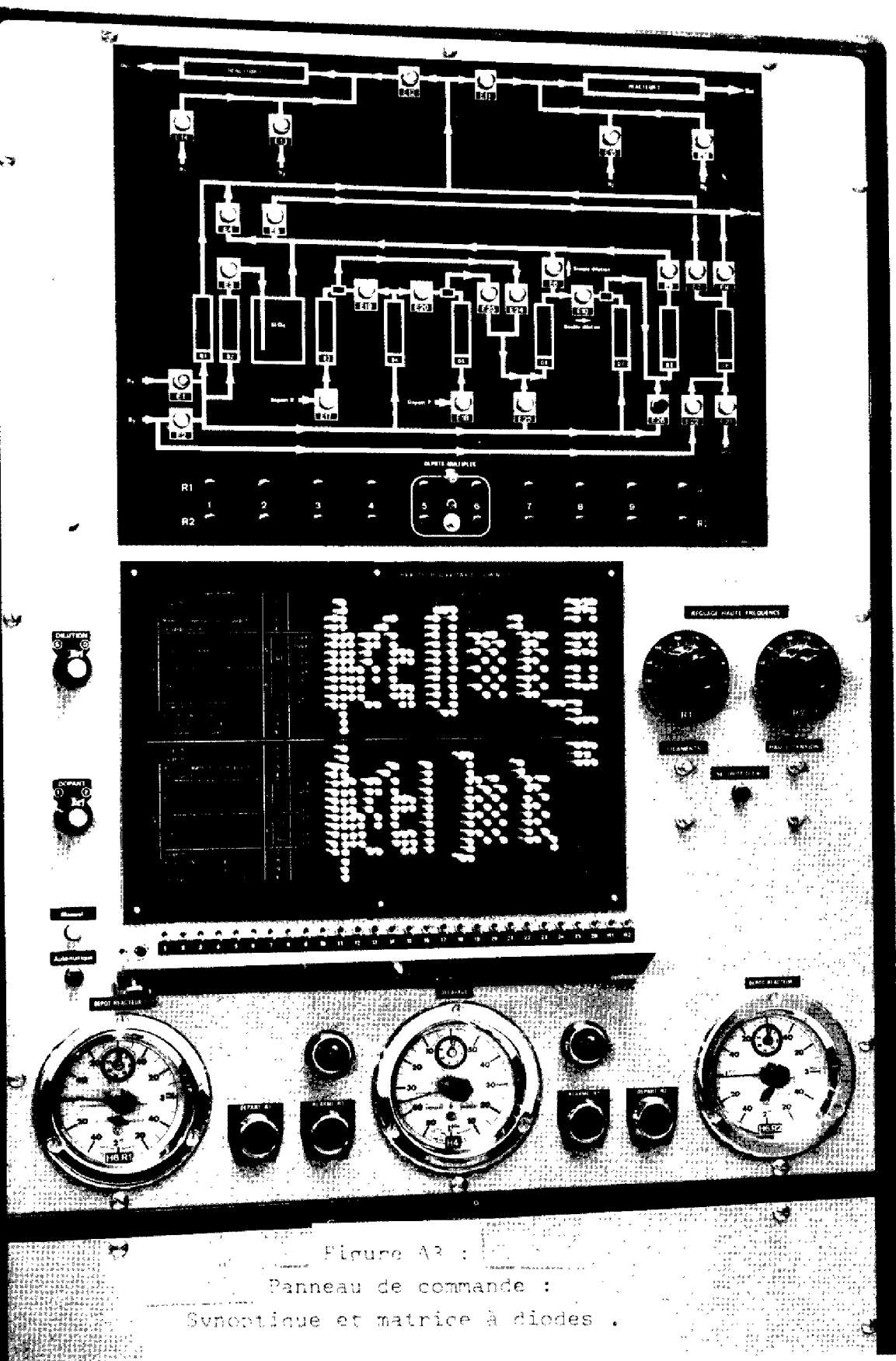


Figure A3 :
Panneau de commande :
Synoptique et matrice à diodes .

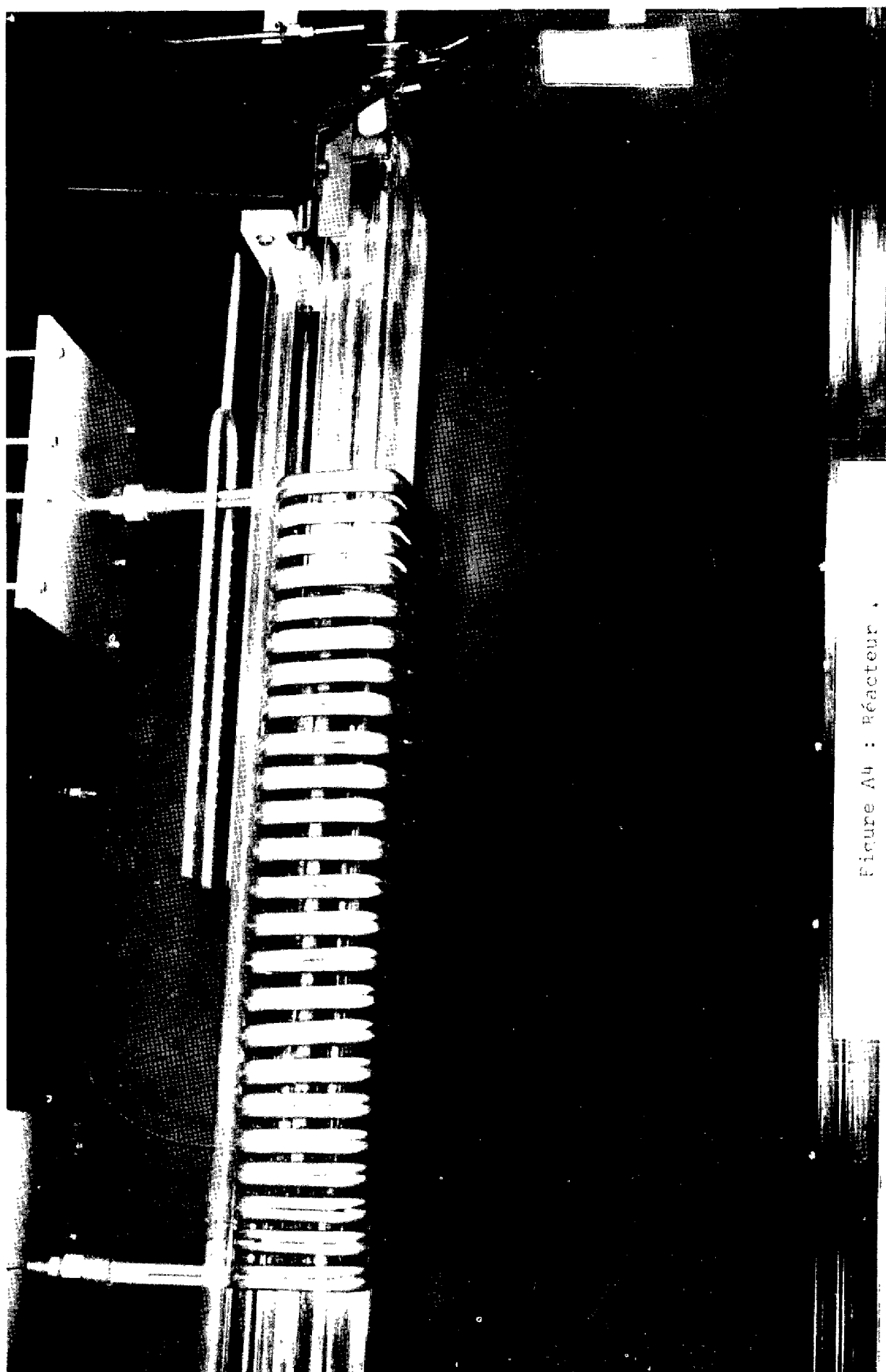


Figure A4 : Réacteur .

Tube de quartz, contenant le suscepteur,
et entouré de l'enroulement H.F.

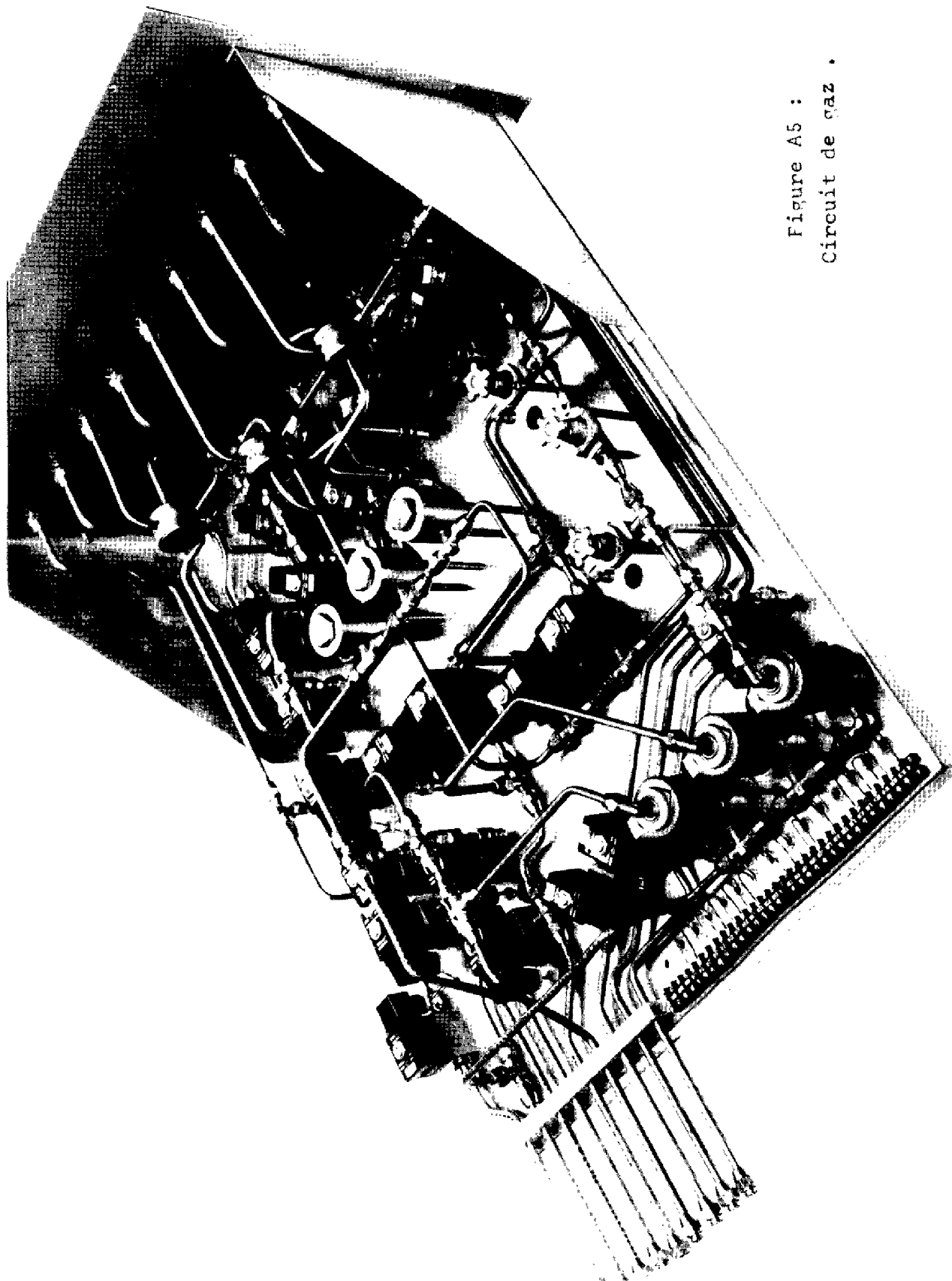


Figure A5 :
Circuit de gaz .

A N N E X E 2

ESTIMATION DES MATRICES θ , P, R
PAR LA METHODE DE MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE

P R E S E N T A T I O N :

Le modèle est écrit sous la forme :

$$y_k^t = x_k^t \Theta + w_k^t$$

où Θ est une matrice constante, de dimensions (m, n)

x_k est un vecteur de dimension m

y_k et w_k sont des vecteurs de dimension n .

Nous supposons disposer de N observations, c'est-à-dire de N couples (x_k, y_k) , et voulons calculer R et Θ par la méthode de maximum de vraisemblance.

La fonction de vraisemblance est :

$$F = (2\pi)^{-Nn/2} (\det R^{-1})^{N/2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (y_k^t - x_k^t \Theta)^t R^{-1} (y_k^t - x_k^t \Theta) \right\}$$

Nous cherchons à déterminer $\hat{\Theta}$ et $\hat{R}$, estimations de Θ et de R qui maximisent cette fonction. Pour cela, explicitons F en fonction des coordonnées des vecteurs utilisés.

Posons donc (les indices i et j varient de 1 à n , g et h de 1 à m) :

$$x_k = (x_{kg})$$

$$y_k = (y_{ki})$$

$$\Theta = \Theta_{gi}$$

$$\hat{R} = R_{ij}$$

$$S = \hat{R}^{-1} = S_{ij}$$

Pour chercher le maximum de f , nous chercherons celui de $\ln(F)$:

$$\ln(F) = -\frac{1}{2} N m \ln(2\pi) + \frac{1}{2} N \det R^{-1} - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \left\{ \sum_{i=1}^n \left(y_{ki} - \sum_{g=1}^m x_{kg} \Theta_{gi} \right) \left[\sum_{j=1}^n S_{ij} \left(y_{kj} - \sum_{h=1}^m x_{kh} \Theta_{hj} \right) \right] \right\}$$

ce qui revient à

$$\ln(F) = -\frac{1}{2} N m \ln(2\pi) + \frac{1}{2} N \det R^{-1} - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \sum_{i,j=1}^n S_{ij} \left(y_{ki} - \sum_{g=1}^m x_{kg} \Theta_{gi} \right) \left(y_{kj} - \sum_{h=1}^m x_{kh} \Theta_{hj} \right)$$

CALCUL DE (4) :

Décrivons cette expression par rapport à Θ_{ef} ;
remarquons pour cela que $\ln(F)$ est de la forme :

$$\sum_{k=1}^N \sum_{i,j=1}^n S_{ij} u_i v_j$$

dont la dérivée est :

$$\sum_{k=1}^N \sum_{i,j=1}^n S_{ij} (u'_i v_j + u_i v'_j)$$

On a donc :

$$\frac{\partial \ln(F)}{\partial \Theta_{ef}} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \sum_{i,j=1}^n S_{ij} \left[x_{ke} \delta_{fi} \left(y_{kj} - \sum_{h=1}^m x_{kh} \Theta_{hj} \right) + x_{ke} \delta_{fj} \left(y_{ki} - \sum_{g=1}^m x_{kg} \Theta_{gi} \right) \right]$$

Soit :

$$\frac{\partial \ln(F)}{\partial \Theta_{ef}} = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \left\{ x_{ke} \left[\sum_{j=1}^n S_{fj} \left(y_{kj} - \sum_{h=1}^m x_{kh} \Theta_{hj} \right) \right] + x_{ke} \left[\sum_{i=1}^n y_{ki} - \sum_{g=1}^m x_{kg} \Theta_{gi} \right] S_{if} \right\}$$

En changeant le nom des indices de sommation :

$$\frac{\partial \ln(F)}{\partial \Theta_{ef}} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N x_{ke} \left\{ \sum_{i=1}^n S_{if} \left(y_{ki} - \sum_{g=1}^m x_{kg} \Theta_{gi} \right) + \sum_{i=1}^n S_{fi} \left(y_{ki} - \sum_{g=1}^m x_{kg} \Theta_{gi} \right) \right\}$$

Comme S est une matrice symétrique :

$$\frac{\partial \ln(F)}{\partial \Theta_{ef}} = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^n x_{ke} S_{if} \left(y_{ki} - \sum_{g=1}^m x_{kg} \Theta_{gi} \right)$$

Les bornes de sommation étant constantes et finies, on peut les inverser ; cela donne :

$$\frac{\partial \ln(F)}{\partial \Theta_{ef}} = \sum_{i=1}^n S_{if} \left[\sum_{k=1}^N x_{ke} y_{ki} - \sum_{g=1}^m \left(\sum_{k=1}^N x_{ke} x_{kg} \right) \Theta_{gi} \right]$$

Posons maintenant :

$$B_{ei} = \sum_{k=1}^N x_{ke} y_{ki}$$

$$\text{et } A_{eg} = \sum_{k=1}^N x_{ke} x_{kg}$$

c'est-à-dire :

$$B = \sum_{k=1}^N x_k y_k^t$$

$$\text{et } A = \sum_{k=1}^N x_k x_k^t$$

Nous obtenons alors :

$$\frac{\partial \ln(F)}{\partial \Theta_{ef}} = \sum_{i=1}^n S_{if} \left(B_{ei} - \sum_{g=1}^m A_{eg} \Theta_{gi} \right) = \left[(B - A \Theta) S \right]_{ef}$$

Pour que $\ln(F)$ soit extrême, il est nécessaire que chacun des termes $\frac{\partial \ln(F)}{\partial \Theta_{ef}}$ soit nul. Il faut donc que $(B - A \Theta) S$ soit nul. La solution est unique lorsque A est inversible ; or, nous savons qu'il existe un maximum. Nous pouvons donc affirmer avoir déterminé la valeur de Θ qui rend F maximum :

$$\hat{\Theta} = B \cdot A^{-1}$$

C A L C U L D E R :

Pour obtenir la valeur de R qui rend minimal F, dérivons $\ln(F)$ par rapport à S_{ij} . Pour cela, remarquons d'abord que le développement d'un déterminant par ligne ou colonne permet d'affirmer que pour toute matrice $M = (M_{ij})$ symétrique, on a :

$$\frac{\partial(\det M)}{\partial M_{ij}} = M^{ji}$$

$$\text{et } \frac{\partial(\det M)}{\partial M_{ij}} = 2 M^{ij} \quad (i \neq j)$$

M^{ij} étant le cofacteur de M_{ij}

$$\text{Posons } D_{ij} = \left(y_{ki} - \sum_{g=1}^m x_{kg} \Theta_{gi} \right) \left(y_{kj} - \sum_{h=1}^m x_{kh} \Theta_{hj} \right)$$

C'est-à-dire

$$D = \left(y_k^t - x_k^r \Theta \right)^t \left(y_k^t - x_k^r \Theta \right)$$

Nous avons alors :

$$\ln(F) = -\frac{1}{2} N \ln(2\pi) + \frac{1}{2} N \ln(\det S) - \frac{1}{2} \sum_{h=1}^N \sum_{i,j=1}^n S_{ij} D_{ij}$$

et donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \ln(F)}{\partial S_{hh}} = \frac{N}{2} \frac{S_{hh}}{\det S} - \frac{1}{2} D_{hh} \\ \frac{\partial \ln(F)}{\partial S_{gh}} = N \frac{S_{gh}}{\det S} - D_{gh} \quad (g \neq h) \end{array} \right.$$

Pour que la dérivée s'annule, on doit avoir la relation :

$$D_{gh} = N \frac{S_{gh}}{\det S} \quad \text{soit} \quad D = N \cdot S^{-1}$$

Par conséquent, la valeur de R qui maximise la fonction de vraisemblance est :

$$\hat{R} = \frac{D}{N} = \frac{1}{N} \left(y_k^t - x_k^r \hat{\Theta} \right)^t \left(y_k^t - x_k^r \hat{\Theta} \right)$$

C A L C U L D E P :

La covariance de deux colonnes θ_i et θ_j de (4) s'écrit :

$$\begin{aligned} E(\hat{\theta}_i - \theta_i)(\hat{\theta}_j - \theta_j)^t &= A^{-1} E\left(\sum_{k=1}^N [y_{ki} - E(y_{ki})] x_k \cdot \sum_{k_1=1}^N [y_{k_1j} - E(y_{k_1j})] x_{k_1}^t\right) A^{-1} \\ &= A^{-1} \left[\sum_{k, k_1=1}^N E(y_{ki} - E(y_{ki})) \cdot E(y_{k_1j} - E(y_{k_1j})) x_k x_{k_1}^t \right] A^{-1} \\ &= A^{-1} \left[\sum_{k, k_1=1}^N \delta_{k, k_1} R_{ij} x_k x_{k_1}^t \right] A^{-1} \\ &= A^{-1} \left[\sum_{k=1}^N R_{ij} x_k x_k^t \right] A^{-1} \\ &= R_{ij} A^{-1} A A^{-1} = R_{ij} A^{-1} \end{aligned}$$

et donc :

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} R_{11} A^{-1} & \dots & R_{1n} A^{-1} \\ R_{21} A^{-1} & & \vdots \\ \vdots & & \\ R_{n1} A^{-1} & \dots & R_{nn} A^{-1} \end{pmatrix}$$

-A3.1-

A N N E X E 3

ESTIMATION DE θ , P, R

PAR LA METHODE DE MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE .

GENERALISATION

P R E S E N T A T I O N

Le modèle est écrit sous la forme :

$$y_k = X_k \theta + w_k$$

où θ est un vecteur constant, de dimension m

X_k est une matrice connue, de dimensions (m, n)

y_k est un vecteur connu, de dimension n

w_k est un vecteur de dimension n , aléatoire, de distribution gaussienne, de matrice de covariance R .

Nous supposerons disposer de N observations, c'est-à-dire de N couples (X_k, y_k) , et nous voulons calculer R et θ par la méthode de maximum de vraisemblance.

La fonction de vraisemblance est :

$$F = (2\pi)^{-Nn/2} (\det R)^{-N/2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (y_k - X_k \theta)^t R^{-1} (y_k - X_k \theta) \right\}$$

Remarquons qu'il s'agit exactement de la même fonction que précédemment (Annexe 2) dont l'écriture matricielle est cependant légèrement différente.

Nous cherchons à déterminer $\hat{\theta}$ et $\hat{R}$ estimations de θ et R , qui maximisent cette fonction. Pour cela, explicitons F en fonction des coordonnées des vecteurs utilisés.

Posons donc (les indices i et j variant de 1 à n , g et h de 1 à m)

$$X_k = (x_{ki})$$

$$y_k = y_{ki}$$

$$\theta = (\theta_g)$$

$$R = (R_{ij})$$

$$S = R^{-1} = (S_{ij})$$

Pour chercher le maximum de F, nous chercherons celui de $\ln(F)$:

$$\ln(F) = -\frac{1}{2} N m \ln(2\pi) + \frac{1}{2} N \ln(\det S) - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \left\{ \sum_{i=1}^n \left(y_{ki} - \sum_{g=1}^m x_{kig} \theta_g \right) \left[\sum_{j=1}^n S_{ij} \left(y_{kj} - \sum_{h=1}^m x_{kjh} \theta_h \right) \right] \right\}$$

soit :

$$\ln(F) = -\frac{1}{2} N m \ln(2\pi) + \frac{1}{2} N \ln(\det S) - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \sum_{i,j=1}^n S_{ij} \left(y_{ki} - \sum_{g=1}^m x_{kig} \theta_g \right) \left(y_{kj} - \sum_{h=1}^m x_{kjh} \theta_h \right)$$

CALCUL DE $\hat{\theta}$:

Décrivons cette expression par rapport à θ_f ($f \in [1, m]$); elle est de la même forme que précédemment. Nous obtenons donc :

$$\frac{\partial \ln(F)}{\partial \theta_f} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \left\{ \sum_{i,j=1}^n S_{ij} \left[x_{kif} \left(y_{kj} - \sum_{h=1}^m x_{kjh} \theta_h \right) + x_{kjf} \left(y_{ki} - \sum_{g=1}^m x_{kig} \theta_g \right) \right] \right\}$$

Soit (S est symétrique) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln(F)}{\partial \theta_f} &= \sum_{k=1}^N \sum_{i,j=1}^n S_{ij} x_{kif} \left(y_{kj} - \sum_{h=1}^m x_{kjh} \theta_h \right) \\ &= \sum_{k=1}^N \sum_{i,j=1}^n \left(\sum_{i=1}^n S_{ij} x_{kif} \right) \left(y_{kj} - \sum_{h=1}^m x_{kjh} \theta_h \right) \\ &= \sum_{k=1}^N \sum_{i,j=1}^n \left(S x_k^t \right)_{if} \left(y_k - x_k \theta \right)_j \\ &= \sum_{k=1}^N \left[S x_k^t (y_k - x_k \theta) \right]_f = \left[S \cdot \sum_{k=1}^N x_k^t (y_k - x_k \theta) \right]_f \end{aligned}$$

en posant

$$A = \sum_{k=1}^N x_k^t x_k$$

et

$$B = \sum_{k=1}^N x_k^t y_k$$

On obtient :

$$\left[S (B - A \theta) \right]_f = 0$$

soit :

$$\boxed{\hat{\theta} = B \cdot A^{-1}}$$

C A L C U L D E R :

D'une façon analogue à l'annexe précédente, posons :

$$D_{ij} = \left(y_{ki} - \sum_{g=1}^m x_{kig} \theta_g \right) \left(y_{kj} - \sum_{h=1}^m x_{kih} \theta_h \right)$$

soit : $D = (y_k - X_k \theta)(y_k - X_k \theta)^t$

$\ln(F)$ est alors de la forme :

$$\ln(F) = -\frac{1}{2} N_m \ln(\pi) + \frac{1}{2} N \ln(\det S) - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \sum_{i,j=1}^n S_{ij} D_{ij}$$

Et donc, de même que précédemment :

$$R = \frac{D}{N} = \frac{1}{N} (y_k - X_k \hat{\theta})(y_k - X_k \hat{\theta})^t$$

A N N E X E 4

TABLEAUX DE CORRESPONDANCE
LIANT
LA RESISTIVITE D'UNE COUCHE EPITAXIALE
A
SA CONCENTRATION EN ATOMES DE DOPANT

Wacker-Chemnitz
G.m.b.H.
Phys. Meß- u. Prüflab.
F.G. Kuehn - GUTR

Einsatz 18.10.72 Ra

NEQUESTE IRVINS - KUPFER (ASTM)

RESISTIVITY---(OHM-CM) TYPE-N

CONCENTRATION	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1.00000 14	50.00000	45.45455	41.66667	38.46154	35.71429	33.33333	31.25000	29.41176	27.77778	26.31579
2.00000 14	25.00000	22.80952	22.72727	21.73913	20.83333	20.00000	19.23077	18.51962	17.85714	17.24139
3.00000 14	16.66667	16.12903	15.62500	15.15152	14.70588	14.28571	13.88889	13.51351	13.15789	12.82051
4.00000 14	12.50000	12.19512	11.90476	11.62791	11.36364	11.11111	10.86957	10.63930	10.41667	10.20408
5.00000 14	10.00000	9.80392	9.61538	9.43396	9.25926	9.09091	8.92857	8.77193	8.62069	8.47458
6.00000 14	8.33333	8.19672	8.06452	7.93651	7.81250	7.69231	7.57576	7.46269	7.35294	7.24638
7.00000 14	7.14286	7.02253	6.90464	6.78932	6.67676	6.56667	6.45895	6.35351	6.25026	6.14911
8.00000 14	6.25000	6.17294	6.09756	6.02410	5.95239	5.88235	5.81395	5.74713	5.68182	5.61798
9.00000 14	5.55556	5.49451	5.43478	5.37634	5.31915	5.26315	5.20833	5.15464	5.10204	5.05051
1.00000 15	5.00000	4.54545	4.16667	3.84615	3.57143	3.33333	3.12500	2.94118	2.77778	2.63158
2.00000 15	2.50000	2.38095	2.27273	2.17391	2.08333	2.00000	1.92308	1.85185	1.78571	1.72414
3.00000 15	1.66667	1.61290	1.56250	1.51515	1.47059	1.40000	1.36918	1.33716	1.30454	1.27195
4.00000 15	1.25000	1.22706	1.20256	1.17911	1.15664	1.13509	1.11439	1.09451	1.07540	1.05700
5.00000 15	1.00000	1.00571	1.00571	0.98080	0.97444	0.95959	0.94522	0.93132	0.91786	0.90482
6.00000 15	0.83333	0.87803	0.86003	0.85648	0.84527	0.83417	0.82378	0.81347	0.80345	0.79369
7.00000 15	0.75000	0.77463	0.76591	0.75712	0.74855	0.74019	0.73203	0.72406	0.71629	0.70869
8.00000 15	0.66667	0.69401	0.68592	0.67978	0.67370	0.66657	0.66007	0.65372	0.64749	0.64140
9.00000 15	0.60000	0.62558	0.62385	0.61873	0.61272	0.60731	0.60201	0.59691	0.59171	0.58671
1.00000 16	0.50000	0.51179	0.50445	0.49645	0.48849	0.48136	0.47457	0.46715	0.46002	0.45319
2.00000 16	0.33333	0.34266	0.33722	0.33174	0.32660	0.32143	0.31653	0.31155	0.30672	0.30199
3.00000 16	0.25000	0.25568	0.25197	0.24718	0.24269	0.23898	0.23513	0.23143	0.22785	0.22432
4.00000 16	0.20000	0.20232	0.20196	0.20161	0.20124	0.20088	0.20052	0.20016	0.19980	0.19944
5.00000 16	0.16667	0.16878	0.16834	0.16793	0.16753	0.16713	0.16673	0.16633	0.16593	0.16553
6.00000 16	0.14286	0.14407	0.14364	0.14322	0.14280	0.14238	0.14196	0.14154	0.14112	0.14070
7.00000 16	0.12500	0.12607	0.12564	0.12522	0.12480	0.12438	0.12396	0.12354	0.12312	0.12270
8.00000 16	0.11111	0.11279	0.11148	0.11020	0.10895	0.10773	0.10654	0.10533	0.10412	0.10291
9.00000 16	0.10000	0.10101	0.09958	0.09897	0.09798	0.09702	0.09607	0.09515	0.09424	0.09335
1.00000 17	0.09091	0.09163	0.09080	0.08994	0.08919	0.08839	0.08762	0.08686	0.08612	0.08539
2.00000 17	0.08000	0.08050	0.07978	0.07932	0.07852	0.07802	0.07753	0.07704	0.07655	0.07606
3.00000 17	0.07143	0.07166	0.07125	0.07084	0.07043	0.07002	0.06961	0.06920	0.06879	0.06838
4.00000 17	0.06300	0.06323	0.06282	0.06241	0.06200	0.06159	0.06118	0.06077	0.06036	0.05995
5.00000 17	0.05556	0.05566	0.05525	0.05484	0.05443	0.05402	0.05361	0.05320	0.05279	0.05238
6.00000 17	0.04909	0.04919	0.04878	0.04837	0.04796	0.04755	0.04714	0.04673	0.04632	0.04591
7.00000 17	0.04348	0.04358	0.04317	0.04276	0.04235	0.04194	0.04153	0.04112	0.04071	0.04030
8.00000 17	0.03846	0.03856	0.03815	0.03774	0.03733	0.03692	0.03651	0.03610	0.03569	0.03528
9.00000 17	0.03333	0.03343	0.03302	0.03261	0.03220	0.03179	0.03138	0.03097	0.03056	0.03015
1.00000 18	0.02947	0.02957	0.02916	0.02875	0.02834	0.02793	0.02752	0.02711	0.02670	0.02629
2.00000 18	0.02500	0.02500	0.02459	0.02418	0.02377	0.02336	0.02295	0.02254	0.02213	0.02172
3.00000 18	0.02174	0.02174	0.02133	0.02092	0.02051	0.02010	0.01969	0.01928	0.01887	0.01846
4.00000 18	0.01818	0.01818	0.01777	0.01736	0.01695	0.01654	0.01613	0.01572	0.01531	0.01490
5.00000 18	0.01579	0.01579	0.01538	0.01497	0.01456	0.01415	0.01374	0.01333	0.01292	0.01251
6.00000 18	0.01370	0.01370	0.01329	0.01288	0.01247	0.01206	0.01165	0.01124	0.01083	0.01042
7.00000 18	0.01250	0.01250	0.01209	0.01168	0.01127	0.01086	0.01045	0.01004	0.00963	0.00922
8.00000 18	0.01136	0.01136	0.01095	0.01054	0.01013	0.00972	0.00931	0.00890	0.00849	0.00808
9.00000 18	0.01023	0.01023	0.00982	0.00941	0.00900	0.00859	0.00818	0.00777	0.00736	0.00695
1.00000 19	0.00926	0.00926	0.00885	0.00844	0.00803	0.00762	0.00721	0.00680	0.00639	0.00598
2.00000 19	0.00833	0.00833	0.00792	0.00751	0.00710	0.00669	0.00628	0.00587	0.00546	0.00505
3.00000 19	0.00750	0.00750	0.00709	0.00668	0.00627	0.00586	0.00545	0.00504	0.00463	0.00422
4.00000 19	0.00676	0.00676	0.00635	0.00594	0.00553	0.00512	0.00471	0.00430	0.00389	0.00348
5.00000 19	0.00609	0.00609	0.00568	0.00527	0.00486	0.00445	0.00404	0.00363	0.00322	0.00281
6.00000 19	0.00545	0.00545	0.00504	0.00463	0.00422	0.00381	0.00340	0.00299	0.00258	0.00217
7.00000 19	0.00481	0.00481	0.00440	0.00399	0.00358	0.00317	0.00276	0.00235	0.00194	0.00153
8.00000 19	0.00420	0.00420	0.00379	0.00338	0.00297	0.00256	0.00215	0.00174	0.00133	0.00092
9.00000 19	0.00360	0.00360	0.00319	0.00278	0.00237	0.00196	0.00155	0.00114	0.00073	0.00032

NAUTIC OFFICIAL

CONCENTRATION-(ATMS/CCI) TYPE-N

RESISTIVITY	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.80000	6.840 15	6.730 15	6.640 15	6.540 15	6.450 15	6.360 15	6.270 15	6.180 15	6.100 15	6.020 15
0.90000	5.940 15	5.860 15	5.780 15	5.710 15	5.640 15	5.570 15	5.500 15	5.430 15	5.360 15	5.300 15
1.00000	5.240 15	5.170 15	5.100 15	5.030 15	4.960 15	4.890 15	4.820 15	4.750 15	4.680 15	4.620 15
2.00000	2.500 15	2.380 15	2.270 15	2.170 15	2.080 15	2.000 15	1.920 15	1.850 15	1.780 15	1.720 15
3.00000	1.670 15	1.610 15	1.560 15	1.520 15	1.470 15	1.430 15	1.390 15	1.350 15	1.320 15	1.280 15
4.00000	1.250 15	1.220 15	1.190 15	1.160 15	1.140 15	1.110 15	1.090 15	1.060 15	1.040 15	1.020 15
5.00000	1.000 15	9.800 14	9.620 14	9.450 14	9.280 14	9.090 14	8.930 14	8.770 14	8.620 14	8.470 14
6.00000	8.330 14	8.200 14	8.060 14	7.940 14	7.810 14	7.690 14	7.580 14	7.460 14	7.350 14	7.250 14
7.00000	7.140 14	7.040 14	6.940 14	6.850 14	6.760 14	6.670 14	6.580 14	6.490 14	6.410 14	6.330 14
8.00000	6.250 14	6.170 14	6.100 14	6.020 14	5.950 14	5.880 14	5.810 14	5.750 14	5.680 14	5.620 14
9.00000	5.560 14	5.490 14	5.430 14	5.380 14	5.320 14	5.260 14	5.210 14	5.150 14	5.100 14	5.050 14
10.00000	5.000 14	4.950 14	4.900 14	4.850 14	4.800 14	4.750 14	4.700 14	4.650 14	4.600 14	4.550 14
20.00000	2.500 14	2.380 14	2.270 14	2.170 14	2.080 14	2.000 14	1.920 14	1.850 14	1.780 14	1.720 14
30.00000	1.670 14	1.610 14	1.560 14	1.520 14	1.470 14	1.430 14	1.390 14	1.350 14	1.320 14	1.280 14
40.00000	1.250 14	1.220 14	1.190 14	1.160 14	1.140 14	1.110 14	1.090 14	1.060 14	1.040 14	1.020 14
50.00000	1.000 14	9.800 13	9.620 13	9.450 13	9.280 13	9.090 13	8.930 13	8.770 13	8.620 13	8.470 13
60.00000	8.330 13	8.200 13	8.060 13	7.940 13	7.810 13	7.690 13	7.580 13	7.460 13	7.350 13	7.250 13
70.00000	7.140 13	7.040 13	6.940 13	6.850 13	6.760 13	6.670 13	6.580 13	6.490 13	6.410 13	6.330 13
80.00000	6.250 13	6.170 13	6.100 13	6.020 13	5.950 13	5.880 13	5.810 13	5.750 13	5.680 13	5.620 13
90.00000	5.560 13	5.490 13	5.430 13	5.380 13	5.320 13	5.260 13	5.210 13	5.150 13	5.100 13	5.050 13
100.00000	5.000 13	4.950 13	4.900 13	4.850 13	4.800 13	4.750 13	4.700 13	4.650 13	4.600 13	4.550 13
200.00000	2.500 13	2.380 13	2.270 13	2.170 13	2.080 13	2.000 13	1.920 13	1.850 13	1.780 13	1.720 13
300.00000	1.670 13	1.610 13	1.560 13	1.520 13	1.470 13	1.430 13	1.390 13	1.350 13	1.320 13	1.280 13
400.00000	1.250 13	1.220 13	1.190 13	1.160 13	1.140 13	1.110 13	1.090 13	1.060 13	1.040 13	1.020 13
500.00000	1.000 13	9.800 12	9.620 12	9.450 12	9.280 12	9.090 12	8.930 12	8.770 12	8.620 12	8.470 12
600.00000	8.330 12	8.200 12	8.060 12	7.940 12	7.810 12	7.690 12	7.580 12	7.460 12	7.350 12	7.250 12
700.00000	7.140 12	7.040 12	6.940 12	6.850 12	6.760 12	6.670 12	6.580 12	6.490 12	6.410 12	6.330 12
800.00000	6.250 12	6.170 12	6.100 12	6.020 12	5.950 12	5.880 12	5.810 12	5.750 12	5.680 12	5.620 12
900.00000	5.560 12	5.490 12	5.430 12	5.380 12	5.320 12	5.260 12	5.210 12	5.150 12	5.100 12	5.050 12

USCIB OFFICIAL

RESISTIVITY---(OHM-CM) TYPE-P

CONCENTRATION	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1.00000 14	136.8899	126.2623	115.7407	106.8376	99.20635	92.59259	86.80556	81.69935	77.16049	73.05962
2.00000 14	69.44444	66.13757	63.13131	60.38647	57.87037	55.55556	53.41080	51.44033	49.50317	47.66272
3.00000 14	46.29630	44.50287	42.40278	40.84974	39.68234	38.68254	37.80023	37.03754	36.34971	35.71254
4.00000 14	34.72222	33.87534	33.05879	32.26974	31.56566	30.86420	30.19324	29.55083	28.93519	28.34657
5.00000 14	27.77778	27.23312	26.70540	26.20545	25.72014	25.25253	24.80159	24.36647	23.94636	23.54049
6.00000 14	23.14615	22.76857	22.40143	22.04596	21.70139	21.36752	21.04377	20.72968	20.42484	20.12892
7.00000 14	19.84127	19.56192	19.29012	19.02598	18.76877	18.51852	18.27485	18.03752	17.80627	17.58087
8.00000 14	17.36111	17.14679	16.93767	16.73360	16.53439	16.33987	16.14987	15.96424	15.78283	15.60549
9.00000 14	15.43210	15.26252	15.09652	14.93429	14.77591	14.62188	14.46759	14.31844	14.17234	14.02918
1.00000 15	13.88889	12.62626	11.57037	10.68376	9.92053	9.25926	8.68056	8.16993	7.71605	7.30994
2.00000 15	6.94444	6.61376	6.31313	6.03865	5.78704	5.55556	5.34188	5.14403	4.96032	4.78527
3.00000 15	4.62963	4.48029	4.34028	4.20875	4.08497	3.96825	3.85802	3.75375	3.65497	3.56125
4.00000 15	3.47222	3.39753	3.30888	3.22997	3.15657	3.08642	3.01932	2.95508	2.89352	2.83447
5.00000 15	2.77778	2.72331	2.67094	2.62055	2.57202	2.52535	2.48016	2.43665	2.39464	2.35405
6.00000 15	2.31481	2.27687	2.24014	2.20459	2.17014	2.13675	2.10438	2.07297	2.04248	2.01288
7.00000 15	1.98413	1.95818	1.92901	1.90259	1.87688	1.85195	1.82749	1.80375	1.78043	1.75809
8.00000 15	1.73611	1.71468	1.69377	1.67336	1.65344	1.63399	1.61499	1.59642	1.57828	1.56055
9.00000 15	1.54321	1.52625	1.50966	1.49343	1.47754	1.46199	1.44676	1.43184	1.41723	1.40292
1.00000 16	1.38889	1.26263	1.15741	1.06818	0.99206	0.92689	0.86881	0.81446	0.76330	0.71487
2.00000 16	0.76881	0.74481	0.72262	0.70204	0.68239	0.66501	0.64827	0.63256	0.61778	0.60385
3.00000 16	0.59069	0.57823	0.56652	0.55520	0.54433	0.53437	0.52467	0.51541	0.50656	0.49807
4.00000 16	0.48304	0.48214	0.47465	0.46745	0.46031	0.45333	0.44740	0.44119	0.43519	0.42940
5.00000 16	0.42379	0.41837	0.41313	0.40804	0.40312	0.39834	0.39370	0.38920	0.38482	0.38057
6.00000 16	0.37643	0.37241	0.36859	0.36498	0.36097	0.35735	0.35392	0.35038	0.34702	0.34374
7.00000 16	0.33034	0.32742	0.32466	0.32118	0.31846	0.31581	0.31322	0.31069	0.30821	0.30577
8.00000 16	0.31233	0.30972	0.30726	0.30495	0.30269	0.30017	0.29789	0.29566	0.29348	0.29133
9.00000 16	0.29022	0.28715	0.28412	0.28116	0.27923	0.27734	0.27548	0.27365	0.27185	0.26995
1.00000 17	0.27008	0.26585	0.26199	0.25773	0.25302	0.24850	0.24416	0.23998	0.23593	0.23195
2.00000 17	0.17211	0.16674	0.16174	0.15717	0.15298	0.14903	0.14513	0.14161	0.13820	0.13513
3.00000 17	0.13254	0.12845	0.12461	0.12101	0.11763	0.11443	0.11146	0.10877	0.10643	0.10414
4.00000 17	0.10968	0.10794	0.10636	0.10485	0.10310	0.10160	0.10016	0.09877	0.09743	0.09614
5.00000 17	0.09498	0.09366	0.09249	0.09135	0.09021	0.08918	0.08814	0.08713	0.08615	0.08520
6.00000 17	0.08427	0.08337	0.08250	0.08164	0.08081	0.08000	0.07921	0.07844	0.07769	0.07695
7.00000 17	0.07654	0.07554	0.07455	0.07353	0.07249	0.07149	0.07052	0.06956	0.06861	0.06767

RESISTANCE OFFICIAL

CONCENTRATION-(ATMS/CCI) TYPE-I

RESISTIVITY	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.00000	1.850 16	1.810 16	1.780 16	1.750 16	1.710 16	1.680 16	1.650 16	1.620 16	1.600 16	1.600 16
0.00000	1.570 16	1.540 16	1.520 16	1.490 16	1.460 16	1.450 16	1.430 16	1.420 16	1.400 16	1.400 16
1.00000	1.390 16	1.360 16	1.340 16	1.310 16	1.280 16	1.260 16	1.240 16	1.220 16	1.200 16	1.200 16
2.00000	6.940 15	6.410 15	6.070 15	5.790 15	5.560 15	5.340 15	5.140 15	4.960 15	4.790 15	4.790 15
3.00000	4.620 15	4.480 15	4.340 15	4.210 15	4.080 15	3.950 15	3.820 15	3.690 15	3.560 15	3.560 15
4.00000	3.470 15	3.330 15	3.210 15	3.090 15	2.970 15	2.850 15	2.730 15	2.600 15	2.480 15	2.480 15
5.00000	2.790 15	2.720 15	2.670 15	2.620 15	2.570 15	2.530 15	2.480 15	2.440 15	2.390 15	2.390 15
6.00000	2.310 15	2.280 15	2.240 15	2.200 15	2.170 15	2.140 15	2.100 15	2.070 15	2.040 15	2.040 15
7.00000	1.990 15	1.960 15	1.930 15	1.900 15	1.870 15	1.840 15	1.810 15	1.780 15	1.760 15	1.760 15
8.00000	1.740 15	1.710 15	1.690 15	1.670 15	1.650 15	1.630 15	1.610 15	1.590 15	1.580 15	1.580 15
9.00000	1.540 15	1.530 15	1.510 15	1.490 15	1.480 15	1.460 15	1.450 15	1.430 15	1.420 15	1.420 15
10.00000	1.290 15	1.260 15	1.240 15	1.210 15	1.190 15	1.170 15	1.150 15	1.140 15	1.120 15	1.120 15
20.00000	6.940 14	6.610 14	6.310 14	6.040 14	5.790 14	5.560 14	5.340 14	5.140 14	4.960 14	4.790 14
30.00000	4.630 14	4.480 14	4.340 14	4.210 14	4.080 14	3.950 14	3.820 14	3.700 14	3.580 14	3.580 14
40.00000	3.470 14	3.330 14	3.210 14	3.090 14	2.970 14	2.850 14	2.730 14	2.600 14	2.480 14	2.480 14
50.00000	2.780 14	2.720 14	2.670 14	2.620 14	2.570 14	2.530 14	2.480 14	2.440 14	2.390 14	2.390 14
60.00000	2.310 14	2.280 14	2.240 14	2.200 14	2.170 14	2.140 14	2.100 14	2.070 14	2.040 14	2.040 14
70.00000	1.990 14	1.960 14	1.930 14	1.900 14	1.880 14	1.850 14	1.830 14	1.810 14	1.790 14	1.790 14
80.00000	1.740 14	1.710 14	1.690 14	1.670 14	1.650 14	1.630 14	1.610 14	1.590 14	1.580 14	1.580 14
90.00000	1.540 14	1.530 14	1.510 14	1.490 14	1.480 14	1.460 14	1.450 14	1.430 14	1.420 14	1.420 14
100.00000	1.390 14	1.360 14	1.340 14	1.310 14	1.280 14	1.260 14	1.240 14	1.220 14	1.200 14	1.200 14
200.00000	6.940 13	6.610 13	6.310 13	6.040 13	5.790 13	5.560 13	5.340 13	5.140 13	4.960 13	4.790 13
300.00000	4.630 13	4.480 13	4.340 13	4.210 13	4.080 13	3.950 13	3.820 13	3.700 13	3.580 13	3.580 13
400.00000	3.470 13	3.330 13	3.210 13	3.090 13	2.970 13	2.850 13	2.730 13	2.600 13	2.480 13	2.480 13
500.00000	2.780 13	2.720 13	2.670 13	2.620 13	2.570 13	2.530 13	2.480 13	2.440 13	2.390 13	2.390 13
600.00000	2.310 13	2.280 13	2.240 13	2.200 13	2.170 13	2.140 13	2.100 13	2.070 13	2.040 13	2.040 13
700.00000	1.980 13	1.960 13	1.930 13	1.900 13	1.880 13	1.850 13	1.830 13	1.810 13	1.790 13	1.790 13
800.00000	1.740 13	1.710 13	1.690 13	1.670 13	1.650 13	1.630 13	1.610 13	1.590 13	1.580 13	1.580 13
900.00000	1.540 13	1.530 13	1.510 13	1.490 13	1.480 13	1.460 13	1.450 13	1.430 13	1.420 13	1.420 13

BIBLIOGRAPHIE

Nous avons divisé la bibliographie en cinq parties, relatives à l'épithaxie et les phénomènes physico-chimiques qui l'entourent (1), aux problèmes liés aux méthodes de modélisation et d'identification (2), aux moyens de modélisation (filtrage, processus stochastiques) (3) ; la quatrième partie récapitule les moyens de connaître, hors ligne, les caractéristiques (en particulier les covariances des bruits) des processus ; dans la cinquième partie le lecteur trouvera quelques références sur les conséquences de l'automatisation sur les conditions de travail.

B1 : E P I T A X I E

- [1.1] : Epithaxie . Application aux semi-conducteurs
RTC. 1968

- [1.2] L.P. HUNT et E. SIRT
A Through Thermodynamic Evaluation of the Silicon-Hydrogen
Journal Electrochemical Society : Vol 119 n°12 pp. 1741-1745

- [1.3] G. SKELLY - A.C. ADAMS
Impurity Atom transfer during Epitaxial Deposition of Silicon.
IDem - Vol 120 n°1. janvier 1973

- [1.4] DON JACKSON
Computer Control of Epitaxial Production Systems
Solid State Technology Nov. 1972

B 2 : METHODES DE MODELISATION

- [2.1] : I. D. LANDAU
Sur la théorie et les applications des systèmes adaptatifs.
Journée d'Etudes sur les systèmes adaptatifs. Grenoble 11 février 70
 - [2.2] : E. SINNER
Conception et performances des systèmes adaptatifs avec modèle.
Journée d'Etudes sur les systèmes adaptatifs. Grenoble 11 février 70
 - [2.3] : J. WIESLANDER
Real time identification, part 1.
Report 6908, Lund Institute of Technology - Suède nov. 1969
 - [2.4] : J. WIESLANDER
Real time identification, part 2.
Report 6909, Lund Institute of Technology - Suède nov. 1969
 - [2.5] : C. RABUT
Commande auto-adaptative d'un réacteur d'épitaxie.
Note interne, LAAS - PPR 74 I 02, janvier 1974
 - [2.6] : C. RABUT
Self adaptive numerical control of an epitaxy reactor, using kalman -
Bucy filtering. Congrès IFAC, Boston 1975
 - [2.7] : E. E. FISHER
Identification of linear systems.
Paper JACC 473-475 (1965)
 - [2.8] : K. STEILGLITZ - LE Mc BRIDE
A technique for the identification of linear systems.
Short paper IEEE trans. Aut. Control AC 10 , 461 - 464 (1965)
 - [2.9] : I. D. LANDAU
Les systèmes adaptatifs avec modèles (Théorie, mise en oeuvre, applications)
Automatisme, Vol. n°5 pp. 272-291 - mai 1971
 - [2.10] : I. D. LANDAU
A hyperstable algorithm for identification through the equation error method
Fifth Hawaii International Conference on system sciences - 1972
 - [2.11] : B. COURTIOL - I. D. LANDAU
Design of multi-variable adaptive model following control system.
 - [2.12] : C. A. BOZZO
A discrete suboptimal adaptive estimation scheme for linear systems with
unknown plant and measurement noise covariance.
Congrès IFAC 1975, Boston
-

B 3 : MOYENS DE MODELISATION

- [3.1] : R.E. KALMAN - R. S. BUCI
New results in linear filtering and prediction theory.
Trans. ASME J. Basic Eng., vol 83 pp 95-108 mars 1961
- [3.2] : G. ALENGRIN
La théorie du filtrage non linéaire et ses applications au traitement du signal et à l'identification en Automatique.
Thèse docteur ès Sciences - TOULOUSE 1974
- [3.3] : J. AGUILAR MARTIN
Estimation et filtrage dans la modélisation stochastique en automatique.
Thèse Docteur ès Sciences - Toulouse 1974
- [3.4] : C. HERNANDEZ
Estimation linéaire des paramètres de systèmes dynamiques multidimensionnels et validation statistique du modèle - Application à l'identification de processus.
Thèse de docteur 3ème cycle-Toulouse 1972
- [3.5] : B.L. HO - R.E KALMAN
Effective construction of linear State variable models from input-output fonctions.
Regelungstechnik 14, 545-548 (1966)
- [3.6] : R.E. KALMAN
Mathematical description of linear dynamical systems
SIAM. Control 1 152-192 (1963)
- [3.7] : T. BOHLIN
Real Time estimation of time variable processes characteristics
Report IBM Nordic Lab. Liding, Sweden (1968)
- [3.8] : J. AGUILAR-MARTIN - G. CONTINENTE
Aspects fondamentaux du filtrage recurrent
Journées d'études LAAS-GRETSI - Toulon 1972
- [3.9] : J. WIEJLANDER - B. WITTENMARK
An approach to adaptive control using real time identification
Automatica Vol 7 - 1971
- [3.10] : B. WITTENMARK
On adaptive control of low order systems
Lund Institute of Technology - Suède 1969
- [3.11] : R.E KALMAN - T.S ENGLAR - R.S BUCI
"Fundamental Study of adaptive control systems"
ASD - TR - 61 - 27 - I Avril 1962
-

B4 : ETUDE HORS LIGNE DES PROCESSUS

- [4.1] : T.W. ANDERSON
An introduction to multivariable statistical analysis
John Wiley & Sons, Inc. (1958)
- [4.2] : L.M. SILVERMAN
Inversion of multivariable linear systems
I.E.E.E. Trans. Aut. Control AC14, 270-276 (1969)
- [4.3] : H. SILVERMAN
Identification of linear systems using fast Fourier Transform
technique
Ph. D. Thesis, Brown University (1970)
- [4.4] : GUSTAVSON
Maximum likelihood identification of dynamics of the
agasta reactor and comparison with results of spectral analysis.
Aut. Control, Lund Institute of Technology, Report 6903- (1969)
- [4.5] : N. HAYASHI
On a method of correlation analysis for multivariate systems
Proc. fourth I.F.A.C. congress, Warsaw paper 33.1 (1969)
- [4.6] : K.T. WOO
Maximum likelihood identification of noisy systems
2nd I.F.A.C. Symp. identification and process parameter estimation
Prague- paper 1.8. (1967)
- [4.7] : L. TELKSNYS
Determination of changes in the properties of random processes
with incomplete a priori data
Congrès I.F.A.C. 1975 - Boston-

B 5 : CONSEQUENCES DE L'AUTOMATISATION
SUR LES CONDITIONS DE TRAVAIL

- [5.1] : ESTEVE - de TERSAC
Automatique et condition de travail
L.A.A.S. 1975
- [5.2] R. MAITLANO
Is technology a constraint on humanization of work ?
Congres I.F.A.C 75 - Boston -
- [5.3] E. WESESLINDTNER - F. MARGUILES
Application of various work organisation in the use of numerical
control machines and their technological, economical and human
implications
Congres I.F.A.C 75 - Boston -
- [5.4] W. KREIG
Social effects of automation at Volvo
Congres I.F.A.C. 75 - Boston -