

confidentiel

MINISTÈRE DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE  
DIRECTION GÉNÉRALE DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE  
1, rue Descartes - 75231 PARIS CEDEX 05 - Tél.: (16) 1 46.34.33.33



poste de contrôle intelligent  
dédié aux procédés de traitement  
des minerais

compte rendu de fin d'étude d'une recherche  
financée par le Ministère de la Recherche et de la Technologie  
décision d'aide n° 86.E.0006

J.-C. Guillaneau  
A. Broussaud

avec la collaboration de

D. Legret  
P. Conil

F. Albera  
J.-L. Boulard  
J.-P. Faby

février 1987  
87 DAM 006 MIN

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES  
DIRECTION DES ACTIVITÉS MINIÈRES  
Département Minéralurgie  
B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - Tél.: 38.64.34.34

## R E S U M E

Le rapport présente les recherches effectuées par le B.R.G.M., dans le cadre d'une action concertée avec le Laboratoire d'Automatique et de Recherche Appliquée (LARA) et la société Lafarge-Coppée-Lavalin (L.C.L.), aidée par le Ministère de la Recherche et de la Technologie (décision 86.E.0006) sur le thème :

"Poste de contrôle intelligent dédié aux procédés de traitement des minerais".

Conformément au programme initial, les recherches ont comporté trois phases successives :

### **A. Définition d'un système** de conduite adapté aux petites usines de traitement des minerais.

Une **réflexion conjointe** des trois partenaires sur les problèmes spécifiques à l'automatisation des petites usines de traitement des minerais a été entreprise, les partenaires apportant des connaissances complémentaires :

- Le **B.R.G.M.** par ses travaux sur les **bilans matière**, la **simulation** statique de procédés et son **expérience en minéralurgie**.
- Le **LARA** par ses études sur la **validation des données**, les bilans matière, le **diagnostic de défauts** de capteurs et la conduite automatique d'installations.
- **L.C.L.** par son expérience **industrielle** de la **conduite automatique** de grosses usines.

Cette démarche a conduit à une **définition d'un système original** de commande présentée au Congrès de la Société de l'Industrie Minérale à Douai en juin 1986 comportant :

- **une structure matérielle** basée sur des micro-ordinateurs et automates programmables donc légère et bon marché,
- une grande **souplesse de configuration** du système (modularité de l'architecture et définition interactive de l'installation),
- une indépendance partielle par rapport aux **capteurs** et un diagnostic du fonctionnement de ceux-ci,
- des **logiciels** permettant l'**interprétation** du fonctionnement du procédé (bilans, simulations, diagnostics...).

Après cette définition commune du système, chacun des partenaires a suivi une approche propre.

## B. Elaboration de logiciels

Deux logiciels essentiels pour utiliser au mieux en temps réel et compléter les informations fournies par les capteurs ont été développés sur micro-ordinateurs :

- \* **Un logiciel de calcul de bilans matières cohérents :BILCO**  
permettant le calcul d'estimateurs cohérents plus précis que les mesures et la validation du régime permanent.
- \* **Un logiciel de simulation des procédés minéralogiques en régime permanent : USIM**  
permettant l'évaluation du fonctionnement du procédé, la prédiction de l'impact d'un changement des conditions opératoires et la connaissance de grandeurs mesurables.

## C. Application pour l'usine pilote du B.R.G.M.

Une **structure de commande** dédiée au circuit broyage-classification de l'**usine pilote** du B.R.G.M. à Orléans a été développée, implantée et testée.

Elle a été conçue comme un **outil** pour les opérateurs du pilote permettant :

- la suppression des tâches répétitives : scrutation des capteurs, relevés manuels....,
- le contrôle de certains paramètres de fonctionnement du circuit à partir d'un micro-ordinateur,
- une meilleure évaluation du fonctionnement du circuits, grâce à l'utilisation en temps réel des logiciels développés en phase B,

et elle permet de tester les idées à l'origine de cette recherche.

Des **résultats concrets** ont été obtenus mais **il reste un long chemin à parcourir vers la réalisation du système industriel** défini au début de la recherche.

## TABLE DES MATIERES

	Pages
<u>RESUME</u>	
I. <u>INTRODUCTION</u> .....	1
II. <u>DEFINITION D'UN SYSTEME DE CONDUITE</u> .....	2
III. <u>ELABORATION DE LOGICIELS D'INTERPRETATION ET DE VALORISATION DES MESURES</u> .....	4
III.1. BILCO : calcul de bilans matière cohérents .....	4
III.2. USIM : simulateur d'usines minéralurgiques en régime per- manent .....	8
IV. <u>APPLICATION A L'USINE PILOTE DU B.R.G.M.</u> .....	10
IV.1. ANAPROC : un outil d'aide à l'analyse en ligne des procé- dés .....	10
IV.2. Présentation du circuit-pilote du B.R.G.M. ....	11
IV.3. Premières observations .....	13
V. <u>CONCLUSIONS</u> .....	14
<u>BIBLIOGRAPHIE</u> .....	15

\*\*\*

## A N N E X E S

ANNEXE 1 : Guide de l'utilisation d'ANAPROC

ANNEXE 2 : Logiciel de calcul de bilan matière cohérent : BILCO

ANNEXE 3 : Présentation générale du simulateur statique : USIM

ANNEXE 4 : Vers un système de conduite automatique intelligente des  
petites usines en minéralurgie.  
A. BROUSSAUD, J. RAGOT, E. HANTON  
Communication présentée au Congrès de la Société de  
l'Industrie Minérale - Douai (juin 1986).

\*\*\*

## LISTE DES FIGURES

	Pages
<u>FIGURE 1</u> : BILCO : menu général .....	5
<u>FIGURE 2</u> : BILCO : choix de la configuration .....	5
<u>FIGURE 3</u> : BILCO : entrée des valeurs mesurées .....	6
<u>FIGURE 4</u> : BILCO : visualisation des résultats .....	7
<u>FIGURE 5</u> : BILCO : visualisation de la précision des valeurs estimées	7
<u>FIGURE 6</u> : USIM : menu principal .....	8
<u>FIGURE 7</u> : USIM : résultats globaux .....	9
<u>FIGURE 8</u> : ANAPROC : visualisation du circuit étudié .....	11
<u>FIGURE 9</u> : circuit de broyage classification de l'usine pilote du B.R.G.M. ....	12

\*\*\*

## I - INTRODUCTION

Le rapport présente les recherches effectuées par le B.R.G.M. dans le cadre d'une action concertée avec le Laboratoire d'Automatique et de Recherche Appliquée (LARA) et la société Lafarge-Coppée-Lavalin (L.C.L.) aidée par le Ministère de la Recherche et de la Technologie (décision n° 86.E.0006) sur le thème :

"Poste de contrôle intelligent dédié aux procédés de traitement des minerais".

Le **B.R.G.M.**, **L.C.L.** et le **LARA** ont apporté des compétences particulières pour cette recherche :

- Le **B.R.G.M.** par ses travaux antérieurs sur le calcul de bilans matière cohérents, la simulation des procédés minéralurgiques en régime permanent et sa connaissance des procédés.
- Le **LARA** par ses études sur la validation des données, sur les bilans matières et ses réalisations en automatisation.
- **L.C.L.** par sa connaissance des systèmes de conduite automatique des grosses usines.

Les objectifs initiaux étaient centrés sur deux axes :

- Définir un système complet de conduite automatique d'usine adapté aux problèmes spécifiques des petites usines de traitement de minerais.
- Mettre au point des logiciels temps réel sur micro-ordinateur pour l'interprétation en ligne des informations : validation de mesure, bilans, simulations, optimisation et diagnostic.

et, conformément au programme initial, les travaux du **B.R.G.M.** se sont déroulés en trois phases présentées dans ce rapport :

- **réflexion** sur les problèmes spécifiques à l'automatisation des petites usines minéralurgiques,
- **élaboration de logiciels** d'analyse et d'évaluation du fonctionnement d'une unité de production,
- **réalisation d'un petit système** dédié au circuit broyage-classification de l'usine-pilote du B.R.G.M. à Orléans.

## II - DEFINITION D'UN SYSTEME DE CONDUITE

Le **contrôle automatique** ne connaît qu'un développement très lent dans l'industrie minérale française. Cette lenteur s'explique en partie par :

- la **fiabilité limitée des capteurs** spécifiques (débit volumique, densité, humidité, composition chimique, composition granulométrique),
- le **coût élevé des systèmes** de conduite automatique proposés sur le marché mondial (de 300 000 à 3 000 000 \$ environ).

La principale réalisation industrielle, en France est l'automatisation de broyeurs pendulaires aux "Talcs de Luzenac", réalisée avec la collaboration du LARA. Peu d'installations ont un point de fonctionnement optimal et les **gains potentiels** en économies de matières premières et d'énergie, et en accroissement de productivité sont encore **considérables**.

Cette étude a été conçue au départ comme la **première étape** d'un projet de système de conduite automatique d'usine de traitement de minerais, particulièrement adapté aux petites installations :

- **Utilisation de matériel informatique de faible coût** : micro-ordinateur et automate programmable,
- **Modularité du système** de supervision comportant :
  - \* des interfaces conviviales avec l'utilisateur (graphiques, aide en ligne, interactivité des logiciels, synoptiques),
  - \* un système de communication avec l'automate programmable permettant l'accès aux grandeurs mesurées et la commande à distance (possibilité de choix des points de consignes ou d'une régulation numérique),
  - \* une utilisation simultanée des grandeurs mesurées en ligne et celles acquises "hors ligne" comme les granulométries ou les compositions chimiques (possibilité de fonctionnement avec un nombre limité de capteurs),
  - \* un archivage des grandeurs mesurées ou calculées.
- **Incorporation de logiciels d'interprétation en ligne** des résultats :
  - \* bilans matières cohérents (cf annexe 2),
  - \* simulateur statique d'opérations minéralurgiques (cf annexe 3),
  - \* validation des données et diagnostic de défauts sur capteurs,
  - \* traitement des défauts.

Ces logiciels d'interprétation sont absents des systèmes existant actuellement en minéralurgie. Ils ont pourtant une importance particulière pour assurer la fiabilité dans une industrie où les capteurs sont délicats et pas toujours éprouvés. Ce système cumule donc les avantages des "guide-opérateurs" et ceux des systèmes de régulation classique.

Les trois intervenants se sont concertés pour définir précisément les caractéristiques d'un tel système et les ont présentées dans une communication au congrès de la Société de l'Industrie Minérale de Douai en juin 1986 intitulée "Vers un système de conduite automatique des petites usines en minéralurgie" qui est reproduite en annexe 4.

Après avoir présenté l'intérêt et les possibilités de l'automatisation des procédés, les auteurs décrivent la structure globale d'un système de conduite modulaire et précisent le contenu de chacun des modules :

- module de constitution et de gestion de la base de données,
- modules de dialogue homme-procédé :
  - interpréteur graphique
  - acquisition de données
  - signalisation des défauts
  - tracé de courbes en temps réel
  - historique
  - édition de documents
  - archivage automatique
- modules de calcul et d'analyse de l'information : l'intelligence du système,
  - bilans matière cohérents en ligne
  - simulation statique/optimisation en ligne
  - modélisation statique du procédé
  - diagnostic des procédés.

Ce travail commun réalisé, le B.R.G.M., le LARA et L.C.L. ont continué leurs recherches séparément. Le B.R.G.M. a orienté ses travaux sur deux axes :

- la réalisation de logiciels d'interprétation et de valorisation des mesures,
- la réalisation d'un petit système pour le circuit broyage-classification de son usine pilote, proche dans son esprit du système industriel défini.

### III - ELABORATION DE LOGICIELS D'INTERPRETATION ET DE VALORISATION DES MESURES

Ces logiciels constituent "l'intelligence" du système. Destinés à être intégrés dans le système décrit au § II, ils ont été, dans un premier temps, implantés sur micro-ordinateur dans le système de commande de l'usine pilote du B.R.G.M. : **ANAPROC**. Ce sont :

- **BILCO** : logiciel de calcul de bilans matière cohérents
- **USIM** : simulateur statique d'usines minéralurgiques en régime permanent.

#### III.1. BILCO : calcul de bilans matière cohérents

Ce logiciel permet d'établir des **bilans matière cohérents** détaillés pour des unités de flowsheet quelconque fonctionnant à l'équilibre : il calcule des estimateurs des débits et compositions de tous les flux du flowsheet, qui satisfont les équations de **conservation de la matière** en tous points du circuit et qui sont aussi proches que possible des débits et des compositions mesurés, au sens des moindres carrés pondérés en fonction de la précision de chaque mesure (cf. présentation en annexe 2).

Il est utilisé sous deux formes par le système d'analyse de procédé (ANAPROC) implanté à l'usine pilote du B.R.G.M. (cf. annexe 1) :

- Sous une forme totalement transparente à l'utilisateur ; les grandeurs issues des capteurs sont moyennées et intégrées dans le fichier initial du logiciel. Les valeurs calculées s'inscrivent ensuite directement sur l'écran sans intervention de l'opérateur. Ainsi, le bilan est réalisé sur les grandeurs macroscopiques du système (débits et densités) disponibles par les capteurs.
- Sous une forme interactive et très conviviale, il permet l'introduction "hors ligne" des distributions granulométriques quand celles-ci sont disponibles afin de permettre un calcul plus précis des grandeurs macroscopiques et de déterminer des grandeurs inconnues grâce à l'augmentation de la redondance des mesures. Pour cette seconde forme, **BILCO** est utilisé avec ses propres écrans d'acquisition qui permettent une **configuration très facile** et interactive des flowsheets (cf figure 1).

BILAN MATIERE COHERENT	MENU PRINCIPAL	logiciel BRGM
1 Liste des fichiers de données existants 2 Création ou modification d'un fichier de données 3 Calcul du bilan cohérent 4 Résultats : présentation avec les écarts 5 Résultats : présentation avec les rendements 6 Précision du bilan cohérent (calcul et édition) 7 Sortie vers le D.O.S.		
VOIRE CHOIX ?      2		
ESC pour continuer		

FIGURE 1 : BILCO : menu général

Après que l'utilisateur ait indiqué quelle configuration est utilisée (cf figure 2), apparaît un écran d'acquisition comportant le symbolisme du flowsheet (numérotation des flux et des noeuds), les dernières valeurs introduites et leurs précisions estimées (cf figure 3).

BILAN MATIERE COHERENT	ACQUISITION	logiciel BRGM
NOM DU FICHIER LU TEST2	NOM DU FICHIER CREE TEST2	
TITRE DE L'ETUDE FICHIER DE PRESENTATION : TEST2		
NOMBRE DE NOEUDS	8	
NOMBRE DE FLUX	16	
NOMBRE DE CONSTITUANTS	2	
CRITERE DE CONVERGENCE(%)	0.10000	
NOMBRE DE BROYEURS	0	
LA SOMME DES COMPOSITIONS PAR FLUX DOIT ELLE FAIRE 100 ? O/N N		
ATTENTION... le programme ne peut pas toujours résoudre cette contrainte !		
ESC pour continuer		

FIGURE 2 : BILCO : choix de la configuration

BILAN MATIERE COHERENT			VALEURS MESUREES						logiciel BRGM	
FLUX no de à	DEBIT	ERR. %	C1 Cu teneur	ERR. %	C2 Fe teneur	ERR. %	C3 teneur	ERR. %		
1 0 1	325.000	10.00	2.300	5.00	10.000	5.00				
2 1 2	205.000	50.00	0.720	20.00	9.000	10.00				
3 1 3	27.000	50.00	18.300	2.00	23.200	5.00				
4 2 4	225.900	50.00	0.210	20.00	7.600	10.00				
5 2 3	59.000	50.00	3.500	5.00	14.300	10.00				
6 4 0	223.800	50.00	0.160	20.00	8.500	10.00				
7 4 2	23.000	50.00	2.600	5.00	25.300	5.00				
8 3 5	103.500	50.00	8.000	30.00	17.000	30.00				

ESC pour continuer

FIGURE 3 : BILCO : entrée des valeurs mesurées

Après avoir effectué le calcul, les résultats peuvent être visualisés (cf figure 4) sous deux formes :

- avec les écarts (en pourcentage relatifs) par rapports aux valeurs mesurées introduites,
- avec les rendements (en pourcentages) calculés par rapport au flux 1.

Ces valeurs sont sauvegardées dans un fichier et peuvent être imprimées par une copie d'écran.

BILAN MATIERE COHERENT			VALEURS CALCULEES				logiciel BRGM	
FLUX no de à	DEBIT	RENT %	C1 Cu teneur	RENT %	C2 Fe teneur	RENT %	C3 teneur	RENT %
1 0 1	297.135	100.00	2.275	100.00	9.727	100.00		
2 1 2	268.404	90.33	0.556	22.07	8.293	77.01		
3 1 3	28.731	9.67	18.338	77.95	23.125	22.99		
4 2 4	245.327	82.56	0.158	5.73	8.994	76.34		
5 2 3	53.837	18.12	3.567	28.42	14.474	26.96		
6 4 0	274.590	92.41	0.199	8.10	8.022	76.21		
7 4 2	30.759	10.35	2.656	12.09	24.707	26.29		
8 3 5	82.568	27.79	8.707	106.37	17.484	49.95		

ESC pour continuer

FIGURE 4 : BILCO : visualisation des résultats

Enfin, un calcul de la **précision des valeurs calculées** par le bilan peut être effectué pour connaître le degré de validité des résultats obtenus.

BILAN MATIERE COHERENT			PRECISION DES VALEURS CALCULEES				logiciel BRGM	
FLUX no de à	DEBIT %	RENT %	C1 Cu teneur %	RENT %	C2 Fe teneur %	RENT %	C3 teneur %	RENT %
1 0 1	5.34	0.00	4.28	0.00	2.93	0.00		
2 1 2	8.26	2.99	15.31	16.32	5.16	4.47		
3 1 3	7.29	7.75	1.99	4.95	4.82	8.87		
4 2 4	7.45	3.28	18.89	21.33	6.88	7.76		
5 2 3	18.34	18.21	4.82	17.96	7.49	19.88		
6 4 0	7.54	2.21	18.97	20.46	4.99	3.68		
7 4 2	30.47	30.57	4.97	30.62	4.96	31.56		
8 3 5	9.71	9.92	7.55	2.06	4.24	9.20		

ESC pour continuer

FIGURE 5 : BILCO : visualisation de la précision des valeurs estimées

### III.2. USIM : simulateur d'usines minéralurgiques en régime permanent

Ce logiciel, dont la présentation est faite en Annexe 3, a une fonction analogue à celle d'un programme sur ordinateur VAX couramment utilisé pour les travaux contractuels du B.R.G.M.

L'algorithme général a été modifié pour optimiser les temps de calcul et les entrées-sorties ont été complètement transformées pour les rendre **interactives** et **conviviales** tout en étant compatibles avec le système développé.

Ce logiciel est facilement configurable pour un flowsheet et un minerai donné grâce à un tracé interactif de schéma de traitement et à une acquisition conviviale et structurée des paramètres des appareils, de l'initialisation des flux d'alimentation et de la description du minerai (cf figure 6).

USIM	MENU PRINCIPAL	logiciel BRGM
1 Création ou modification de flowsheet (graphique interactif) 2 Impression de flowsheet (sur table traçante) 3 Description du modèle de minerai  4 Description des caractéristiques des appareils 5 Description de l'alimentation de l'usine  6 Traitement des données (calcul)  7 Résultats : présentation globale 8 Résultats : présentation détaillée par flux  9 Liste des fichiers de données disponibles 10 Sortie vers D.O.S.		
VOIRE CHOIX ? 1		ESC pour continuer

FIGURE 6 : USIM : menu principal

Le calcul effectué, les résultats peuvent être présentés globalement (cf figure 7) ou d'une manière très détaillée, flux par flux.

SIMULATION			RESULTATS						logiciel BRGM	
FL. no	DEBIT solide t/h	DEBIT liquide t/h	WOLF		SCHE		GANG		TENEUR RECUP.	
			TENEUR	RECUP.	TENEUR	RECUP.	TENEUR	RECUP.	TENEUR	RECUP.
1	14.00	1.00	2.20	100.00	0.19	100.00	97.61	100.00		
2	18.51	7.93	1.84	110.60	0.16	110.70	98.00	132.72		
3	18.51	7.93	1.84	110.60	0.16	110.70	98.00	132.72		
4	0.00	6.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
5	18.51	7.93	1.84	110.60	0.16	110.70	98.00	132.72		
6	4.51	0.45	0.72	10.60	0.06	10.70	99.21	32.72		
7	14.00	7.48	2.20	100.00	0.19	100.00	97.61	100.00		
8	14.70	27.30	2.58	123.17	0.23	125.16	97.20	104.56		
9	0.00	17.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

ESC pour continuer

FIGURE 7 : USIM : résultats globaux

Les résultats issus de la simulation donnent des informations à trois niveaux :

i) ils permettent de **détecter un mauvais fonctionnement** au niveau d'une opération unitaire ou d'un atelier (complétant ainsi le diagnostic fourni par BILCO sur les capteurs),

ii) ils peuvent permettre d'**estimer les caractéristiques d'un flux** (granulométrie, composition chimique...) non mesuré,

iii) ils peuvent aussi permettre d'étudier l'**impact d'une modification** de flowsheet ou de condition opératoire du circuit sur son fonctionnement.

Une information riche peut donc être ainsi recueillie et cela représente un progrès important comme aide à la conduite d'opération.

#### IV - APPLICATION A L'USINE PILOTE DU B.R.G.M.

Les logiciels présentés au paragraphe précédent ont été intégrés dans un petit système de conduite de procédé dédié au circuit broyage-classification de l'usine pilote du B.R.G.M. : ANAPROC.

##### IV.1. ANAPROC : un outil d'aide à l'analyse en ligne des procédés

Ce logiciel, dont la structure et les possibilités sont détaillées en annexe 1, constitue un **petit système** utilisé à la fois comme **outil** pour la conduite d'opération et comme structure de base pour tester les idées à l'origine de la recherche.

L'ensemble des travaux réalisés dans le cadre de cette étude (logiciel L.V.D. du LARA...) n'ont pas pu y être intégrés à cette étape de développement et ce système concrétise essentiellement la somme des travaux réalisés par le B.R.G.M.

Le développement a été effectué avec une cible : le circuit broyage-classification de l'usine pilote du B.R.G.M.

ANAPROC est une structure logicielle permettant de mettre en relation en temps réel le circuit automatisé, des calculs scientifiques élaborés et l'opérateur. Cette structure a pour fonction d'exploiter et de comparer les informations issues de ces trois sources pour fournir des arguments d'aide à la décision à l'opérateur.

L'**instrumentation** du circuit broyage-classification du pilote du B.R.G.M. est reliée à un **automate programmable MICON P 200** qui comporte huit boucles de régulation PID qui peuvent être placées en commande à distance. Cet automate est relié à un **micro-ordinateur** qui reçoit les valeurs mesurées par les capteurs et peut transmettre des valeurs comme les points de consigne ou les coefficients P, I et D des boucles de régulation du MICON.

**ANAPROC réalise trois grandes fonctions :**

##### **A. Communiquer avec le MICON :**

- lire les valeurs issues des capteurs
- **envoyer** les messages de l'opérateur.

##### **B. Renseigner l'opérateur :**

- **afficher** sur l'écran un flowsheet (cf figure 8) avec les valeurs mesurées et celles qui en sont déduites (plus riche qu'un synoptique classique),
- **visualiser** en ligne le graphe de l'évolution des grandeurs mesurées en fonction du temps,
- **archiver** toutes les valeurs mesurées pour une utilisation ultérieure.

C. Enrichir les valeurs mesurées :

- établir un bilan matière cohérent en temps réel, afficher les résultats sur le flowsheet et les archiver,
- exécuter des simulations statiques en cours d'opération pour prédire le fonctionnement du circuit.

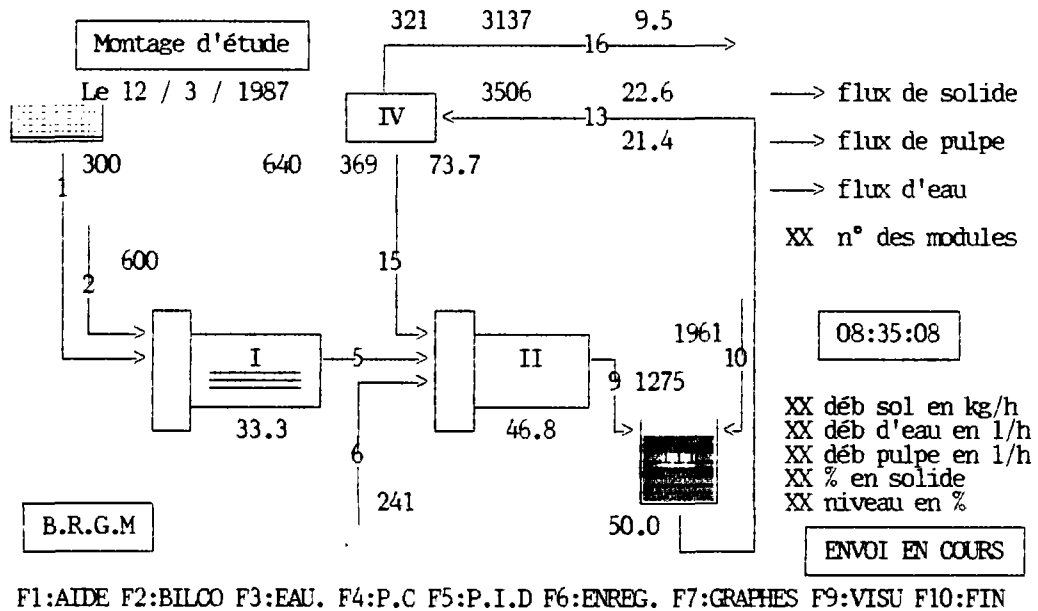


FIGURE 8 : ANAPROC : visualisation du circuit étudié

Ces fonctions sont accessibles en ligne en restant aussi **transparentes** et **conviviales** que possible pour l'**opérateur**.

#### IV.2. Présentation du circuit-pilote du B.R.G.M.

Le circuit étudié (cf figure 9) est couramment utilisé pour les **prestations du B.R.G.M.** et a fait l'objet antérieurement d'une automatisation en collaboration avec le LARA.

## CIRCUIT PILOTE DU B.R.G.M.

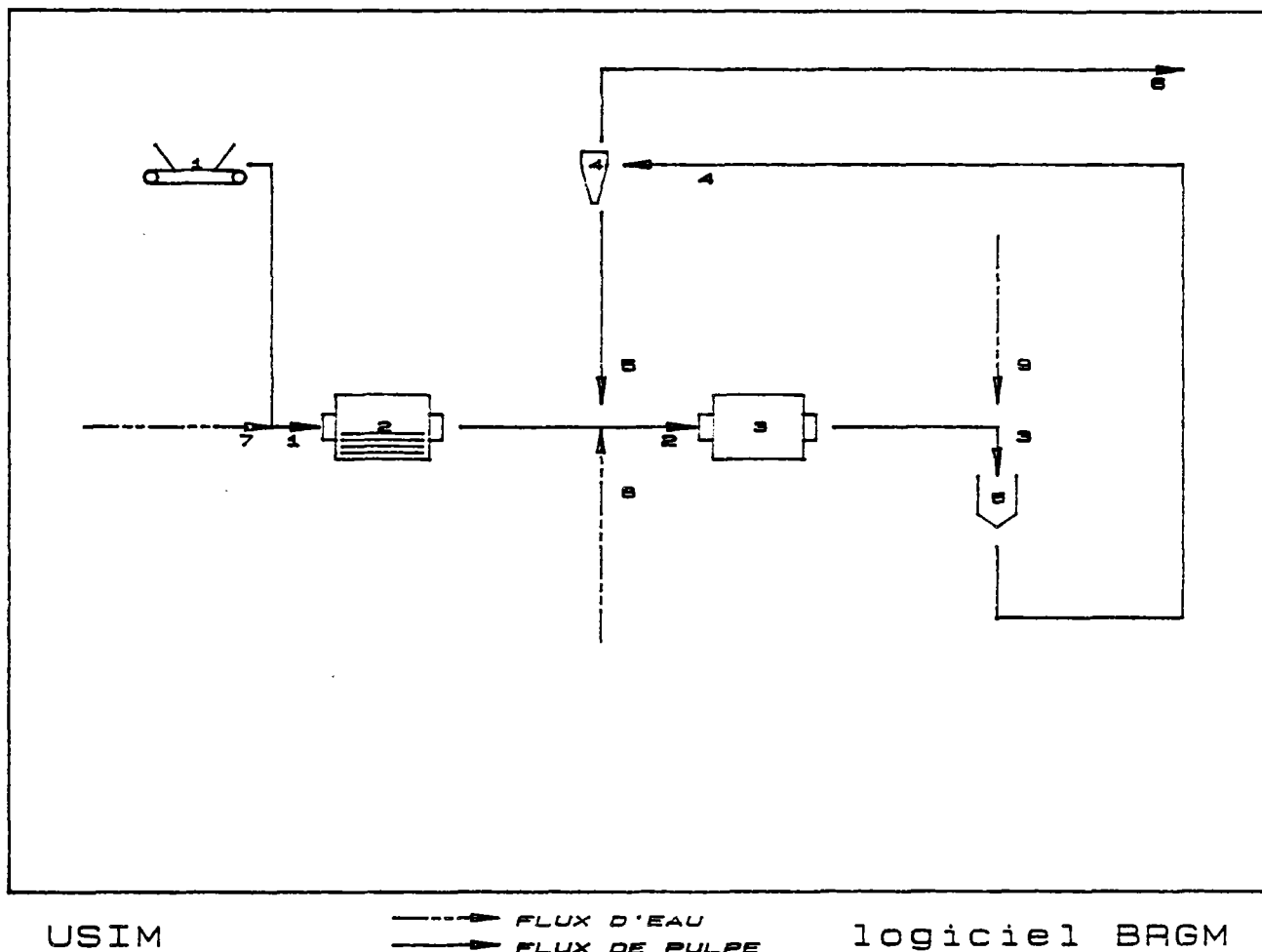


FIGURE 9 : circuit de broyage classification de l'usine pilote du B.R.G.M.

Ce circuit est composé par :

- un alimentateur K-TRON,
- un broyeur à barres (Dragon TBR 90 x 180),
- un broyeur à boulets (Dragon TBB 90 x 180),
- un hydrocyclone (Mozley tube C570 de 5 pouces),

et comporte trois densimètres à rayons  $\gamma$  (DG5 Sereg-Schlumberger), cinq débitmètres (Alto flux K 350, Krone), des capteurs de niveau à ultrason et des vannes de commande.

Les capteurs et les actionneurs sont reliés à un automate programmable MICON P200 de Matra comportant huit boucles de régulation et vingt pas de programme par boucle.

### IV.3. Premières observations

La définition de l'interface système-opérateur et d'une partie des fonctionnalités s'est effectuée en **collaboration étroite** avec la **section usine-pilote du B.R.G.M.**

Des essais ont été réalisés sur le **circuit broyage-classification de l'usine-pilote du B.R.G.M.** à Orléans et se sont déroulés en trois temps.

- i) **Essais de la communication micro-ordinateur-automate programmable (MICON)** et de mise en commande à distance de celui-ci ;
- ii) **Essais de la stratégie de commande du circuit** et de la convivialité du système,
- iii) **Essais complet du système** avec le calcul du bilan matière en ligne (BILCO) et archivage des données.

Ces tests ont déjà permis de mettre en évidence trois faits très encourageants :

- i) la visualisation simultanée sur le flowsheet des informations mesurées et le calcul des données manquantes augmentent notablement la **connaissance de l'état du circuit** et ont permis de détecter rapidement une erreur de calibrage d'un capteur,
- ii) la **comparaison en ligne**, sur le même flowsheet, des grandeurs mesurées et rendues cohérentes par BILCO permet de déterminer plus rapidement et avec une plus grande confiance l'établissement du régime stationnaire. Dès les premiers essais, cette innovation a engendré indirectement des progrès notables dans les méthodes de travail des opérateurs de l'usine pilote,
- iii) l'**archivage automatique** des valeurs mesurées et équilibrées permet, en évitant un travail fastidieux, un meilleur suivi des paramètres de fonctionnement et une optimisation de ceux-ci.

Enfin, la **convivialité** du système :

- changement en ligne des points de consigne avec visualisation de leur sens physique et leur affichage sur le flowsheet,
- changement des coefficients des boucles de régulation (P, I et D) en ligne,
- changement des fréquences d'archivage des grandeurs mesurées et calculées (ou de leurs moyennes).

**facilite la conduite du circuit** (une connaissance détaillée de l'automate programmable n'est plus nécessaire) et permet une analyse a posteriori d'une campagne de pilotage plus fiable, plus rapide et plus complète.

## V - CONCLUSIONS

La recherche a permis de franchir **une première étape** vers la mise au point d'un système de conduite intelligent d'ateliers minéralurgiques.

La concertation entre le B.R.G.M., le LARA et L.C.L. a conduit à la **conception d'un superviseur** de procédé prenant en compte les problèmes liés à l'automatisation des petites usines de traitement des minerais.

Le **B.R.G.M.** a développé des **logiciels** pour micro-ordinateurs (bilans matière et simulation) capables de s'intégrer dans une structure fonctionnant en temps réel et de permettre une **appréciation de la marche du circuit**.

Un **petit système** dédié au circuit de broyage-classification de l'usine pilote du B.R.G.M. a été développé, implanté et testé. Conçu comme un **outil** pour les opérateurs, ce système permet de **tester** l'intérêt des algorithmes développés.

Cette recherche a conduit à des réalisations **concrètes** mais un long chemin reste à parcourir vers l'**édification d'un système industriel**.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BROUSSAUD A., RAGOT J., HANTON E.  
"Vers un système de conduite automatique intelligente des petites usines en minéralurgie"  
Congrès de la Société de l'Industrie Minérale, juin 1986, Douai, France.
- [2] BROUSSAUD A., ALBERA F.  
"Models of selective grinding and mineral liberation in rod and ball mills for mineral processing plant simulation"  
Society of Mining Engineers, 1987 Annual Meeting - Denver U.S.A.
- [3] BROUSSAUD A., ALBERA F.  
"Selection of a model for the B.R.G.M. pilot plant rod mill"  
Vth, IFAC, Symposium on Automation in Mining Mineral and Metal Processing, Tokyo, Japon.
- [4] BROUSSAUD A., BRACHET C., FOURNIGUET G., AUDOLI H., LAPLACE G.  
"Prediction par simulation de l'influence de modifications de flowsheet sur les performances de l'usine de flottation de Barytine de Chaillac."  
XVe Congrès International de Minéralurgie. Cannes 1985 - t. III p. 49-61.
- [5] BROUSSAUD A., BLOISE R., BRACHET C.  
"Contribution de l'outil informatique à l'amélioration et à la conception d'installations de traitement."  
Revue de l'Industrie Minérale - Novembre 1984.
- [6] BLOISE R., REINHART C., MABILLE A.  
"Simulation d'unités complexes".  
Revue de l'Industrie Minérales. Janvier 1983.
- [7] MORIZOT G., MORIO M., CECCHIN T.  
"The flotation at pilot scale of sulphide ores".  
Stockholom Workshop on flotation of sulphide ores. Junes 12-16th 1984.
- [8] CECCHIN T., MORIO M., BOULARD J.J.  
"Instrumentation d'une unité pilote de broyage-flottation adaptée aux minerais sulfurés complexes : conduite automatisée du circuit de broyage-classification".  
XVe Congrès International de Minéralurgie. Cannes. Juin 1985; t III p. 99-111.
- [9] KAGGERAUD I.  
"Experiences with optimal control in a chalcopyrite flotation circuit".  
4th IFAC Symposium in Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, Finland, 1983 - pp. 427-433.

- [10] KORTELA U.K.J., NIEMI T.J.  
"Modeling and prediction of copper concentration in a grinding process".  
Automatica - 1978 - Vol. 14 - pp. 547-556.
- [11] HERBST J.A., BASCUR O.A.  
"Mineral Processing Control in the 1980's - Realities and Dream - Control 1984".
- [12] TWIDLE T.R., ENGELBRECHT P.C., KOEL J.W.S.  
"Optimising control of lead flotation at Black Mountain".  
XVe Congrès International de Minéralurgie. Cannes 1985. t. III -p. 189-198.
- [13] MISTTUNEN J.  
"The Pyhäsalmi Concentrator - 13 years of computer control."  
4th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, Helsinki, 1983 - p. 423.
- [14] GOLOVKOV B.Y., APPELBERG V.  
"Automation in a potassium concentration plant".  
XVe Congrès International de Minéralurgie. Cannes 1985. t. III -p. 163-174.
- [15] LAGUITTON D., FLINTOFF B.L.  
"Computer applications in mineral processing".  
86th Annual General Meeting of the CIM, Ottawa - Avril 1984.
- [16] NENONEN L., GRAEFE P., CHAN A.  
"Industrial applications of interactive computer models".  
APCOM - Londres - Mars 1984.
- [17] HERBST J.A., ALBA J.  
"An approach to adaptive optimal control of Mineral Processing operations".  
XVe Congrès International de Minéralurgie - Cannes 1984 - t. III -p. 75-87.

**ANNEXE 1 : GUIDE DE L'UTILISATION D'ANAPROC**

GUIDE DE L'UTILISATEUR

D'ANAPROC

LOGICIEL D'ANALYSE EN LIGNE DE PROCÉDÉ

POUR LE CIRCUIT DE BROYAGE

CLASSIFICATION DU PILOTE DU B.R.G.M.

SECTIONS INFORMATIQUE ET PILOTE

DÉPARTEMENT MINÉRALURGIE

B.R.G.M.

Janvier 1987

J.C. GUILLANEAU  
A. BROUSSAUD  
D. LEGRET

## TABLE DES MATIERES

	Pages
I. <u>INTRODUCTION</u> .....	1
II. <u>MISE EN MARCHÉ DE L'ORDINATEUR</u> .....	6
III. <u>NOTIONS GÉNÉRALES SUR LE FONCTIONNEMENT DU LOGICIEL</u> .....	7
IV. <u>DESCRIPTION DES FONCTIONS DISPONIBLES DANS ANAPROC</u> .....	8
IV.1. Au lancement .....	8
IV.2. En opération .....	12
2.1. Présentation du flowsheet .....	12
2.2. Le bilan matière cohérent .....	13
IV.3. Liste des fonctions accessibles en ligne .....	14
3.1. Fonction F1 : Aide .....	14
3.2. Fonction F2 : BILCO .....	15
3.3. Fonction F3 : Eau .....	16
3.4. Fonction F4 : Points de consigne .....	17
3.5. Fonction F5 : P.I.D. ....	18
3.6. Fonction F6 : ENREG. ....	19
3.7. Fonction F7 : Graphes .....	20
3.8. Fonction F8 .....	24
3.9. Fonction F9 : DOS .....	24
3.10 Fonction F10 : FIN .....	24
V. <u>CONCLUSION</u> .....	25

\*  
\*\*\*  
\*

## LISTE DES FIGURES

<u>FIGURE 1</u> : Structure d'ANAPROC .....	2
<u>FIGURE 0A</u> : Gestion du disque dur de l'ordinateur de contrôle ....	3
<u>FIGURE 0B</u> : Description du clavier (1) .....	4
<u>FIGURE 0C</u> : Description du clavier (2) .....	5
<u>FIGURE 2</u> : Page titre du logiciel .....	6
<u>FIGURE 3A</u> : Initialisation des paramètres .....	8
<u>FIGURE 3B</u> : Initialisation des paramètres .....	9
<u>FIGURE 4</u> : Spécification des points de consigne .....	10
<u>FIGURE 5</u> : Présentation du circuit pilote .....	11
<u>FIGURE 6</u> : Visualisation du circuit étudié .....	11
<u>FIGURE 7</u> : Visualisation des valeurs mesurées .....	12
<u>FIGURE 8</u> : Visualisation des valeurs mesurées et des valeurs rendues cohérentes par bilan matière (soulignées) .....	13
<u>FIGURE 9</u> : Aide en ligne (clef F1) .....	14
<u>FIGURE 10</u> : Fréquence de calcul BILCO (clef F2) .....	15
<u>FIGURE 11</u> : Prise en compte des ajouts manuels d'eau (clef F3) ...	16
<u>FIGURES 12A et 12B</u> : Changement de la valeur du point de consigne d'une boucle (clef F4) .....	17
<u>FIGURE 13</u> : Intégration de la nouvelle valeur dans l'automate ....	17
<u>FIGURES 14A et 14B</u> : Changement des valeurs des gains P, I et D d'une boucle (clef F5) .....	18
<u>FIGURE 15</u> : Fréquence d'archivage des valeurs mesurées (clef F6) .	19
<u>FIGURE 16A</u> : Visualisation graphique des valeurs mesurées (clef F7)	20
<u>FIGURE 16B - 16C - 16D</u> : Ecran de contrôle de la visualisation ...	21
<u>FIGURE 17A - 17B - 17C - 17D</u> : Exemples de graphes .....	23

\*  
\*\*\*  
\*

## I - INTRODUCTION

**ANAPROC** est une **structure logicielle** permettant de mettre en relation en temps réel le **circuit automatisé**, des **calculs scientifiques élaborés** et **l'opérateur** (cf figure 1). Cette structure a pour but d'exploiter et de comparer les informations issues de ces trois sources pour fournir des arguments **d'aide à la décision à l'opérateur**.

L'**instrumentation** du circuit broyage-classification du pilote du B.R.G.M. est reliée à un **automate programmable MICON P 200** qui comporte huit boucles de régulation PID qui peuvent être placées en commande à distance. Cet automate est relié à un **micro-ordinateur de type IBM-AT** qui reçoit les valeurs mesurées par les capteurs et peut transmettre des valeurs comme les points de consigne ou les coefficients P, I et D des boucles de régulation du MICON.

**ANAPROC** comporte **trois grandes fonctions** :

**A. Communiquer avec le MICON :**

- lire les valeurs issues des capteurs
- **envoyer** les messages de l'opérateur.

**B. Renseigner l'opérateur :**

- **afficher** sur l'écran un flowsheet avec les valeurs mesurées et celles qui en sont déduites
- **visualiser** en ligne le graphe de l'évolution des grandeurs mesurées en fonction du temps
- **archiver** toutes les valeurs mesurées pour une utilisation ultérieure.

**C. Enrichir les valeurs mesurées :**

- **établir un bilan matière cohérent** en temps réel, **afficher** les résultats sur le flowsheet et les **archiver**
- **exécuter des simulations statiques** en cours d'opération pour prédire le fonctionnement du circuit.

Ces fonctions sont accessibles en ligne en restant aussi **transparentes** et **conviviales** que possible pour l'**opérateur**.

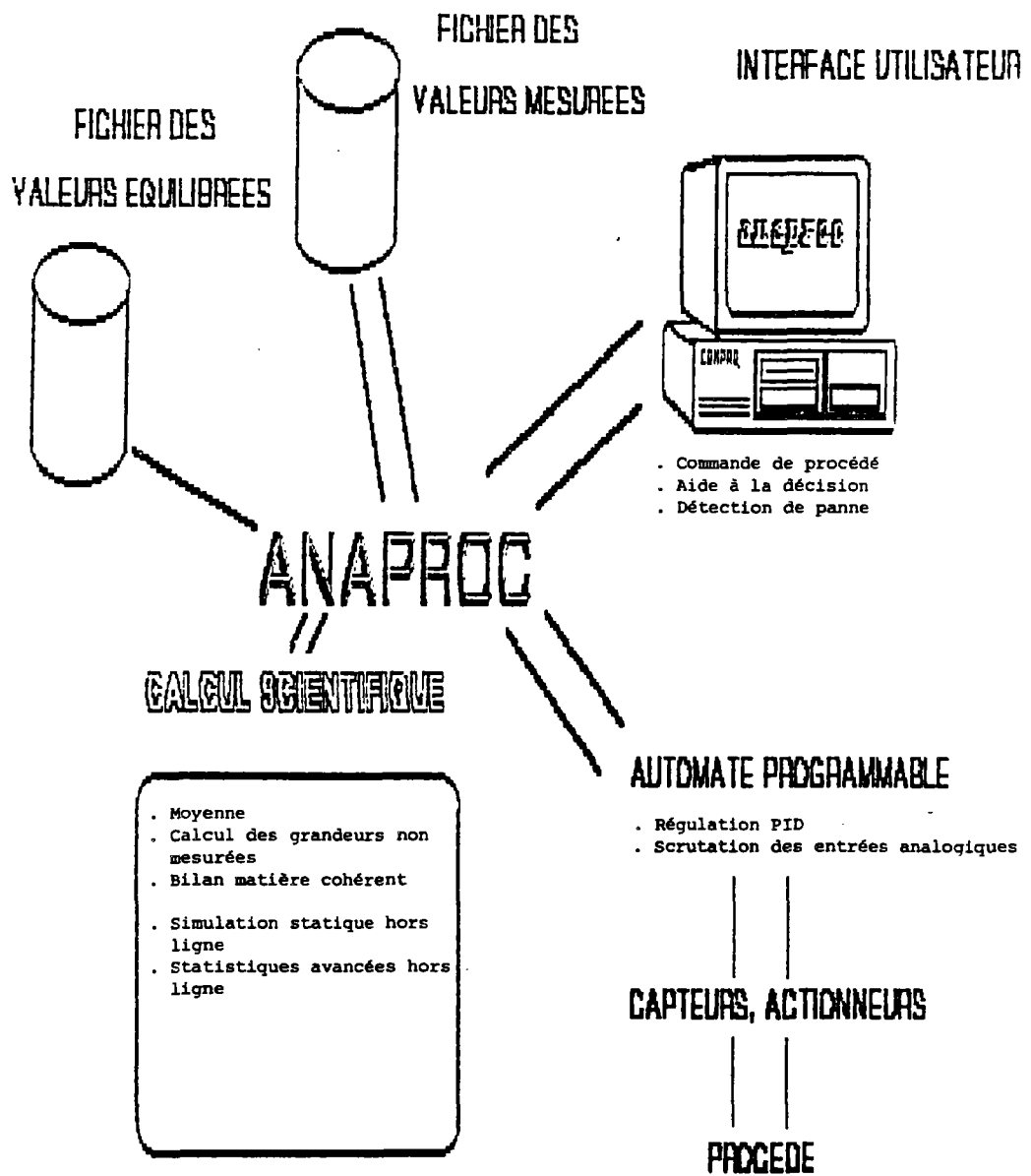


FIGURE 1 : Structure d'ANAPROC

PARTITION DE LA MEMOIRE	M E N U	Logiciel B.R.G.M.
1 - Utilisation des fonctions du D.O.S.		
2 - Utilisation du Logiciel ANAPROC		
3 - Utilisation du Logiciel BILCO		
4 - Utilisation du Logiciel ECHANT		
5 - Utilisation du Logiciel USIM		
6 - Programmation en BASIC		
7 - Programmation en PASCAL		
8 - Programmation en FORTRAN		
9 - Programmation en TURBO PASCAL		
10 - Programmation en TURBO PROLOG		
Votre Choix 2		
<ESC> pour continuer		

FIGURE 0 A : Gestion du disque dur de l'ordinateur de contrôle.

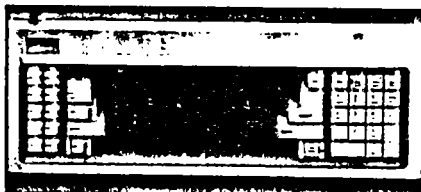


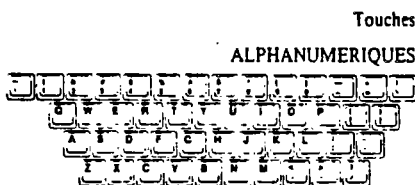
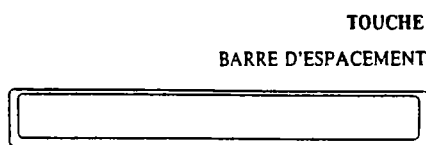
Figure 3.3. Zone 1 : Les touches alphanumériques.

## ZONES DU CLAVIER

Le clavier de l'ordinateur personnel COMPAQ DESKPRO 286 se divise en quatre groupes de touches, appelés zones. Les zones étant décrites plus en détail dans les paragraphes qui suivent, vous noterez que les touches à l'intérieur des zones concernées sont représentées par des trames dans les figures qui les accompagnent.

Toutes les touches ont une fonction de répétition, à l'exception de CTRL, SHIFT, ALT, NUM, ARRET DEFIL, MAJ, INS et APP.SYS. Quand vous appuyez sur une touche et que vous la maintenez enfoncée, le caractère ou la fonction concernée se répète jusqu'à ce que vous relâchiez la touche. Les fonctions de ces touches sont exposées dans les paragraphes qui suivent.

### Zone 1 : Les touches alphanumériques



Les touches alphanumériques servent à générer des lettres, des nombres et des symboles de façon très similaire à celle d'une machine à écrire.

**NOTE :** N'introduisez pas un 'L' minuscule à la place du 'l' ni un 'O' majuscule à la place du nombre zéro '0'. Ces caractères ne sont pas interchangeables.

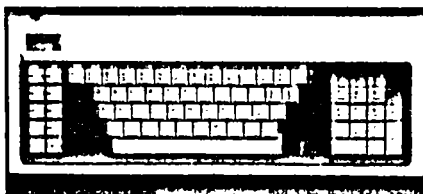
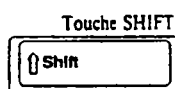
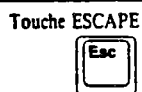
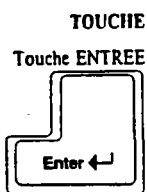


Figure 3.3. Zone 2 : Les touches de contrôle.

### Zone 2 : Les touches de contrôle

**NOTE :** La fonction de certaines de ces touches peut varier selon le programme d'application utilisé. Ces touches sont tributaires de l'application. Pour plus d'informations, reportez-vous au manuel concernant le programme d'application spécifique.



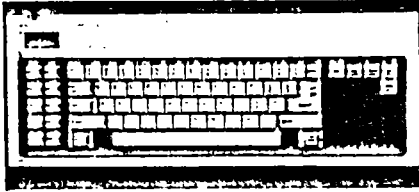


Figure 3.4. Zone 3 : Les touches du curseur et les touches numériques.

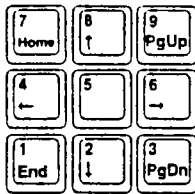
### Zone 3 : Les touches du curseur et les touches numériques

La fonction de certaines touches peut varier suivant le programme d'application utilisé. Avec certains programmes d'application, vous avez la possibilité d'enfoncer la touche NUM pour frapper les nombres indiqués (au lieu de déplacer le curseur). Pour revenir en mode curseur, enfoncée à nouveau la touche NUM, ou appuyez sur la touche SHIFT pour une restauration temporaire du mode curseur.

**NOTE :** Toutes les touches de curseur et touches numériques sont tributaires de l'application. Pour plus d'informations, reportez-vous au manuel du logiciel ou du programme d'application concerné.

#### TOUCHE

Touches NUMERIQUES (de 1 à 9)



#### FONCTION

Le bloc de touches numériques est utilisé pour introduire des données numériques ou pour contrôler les déplacements du curseur (indicateur de position). L'introduction de données numériques est possible lorsque la touche NUM est activée (dans ce cas le voyant LED de NUM sera allumé). Quand la touche NUM est inactive, le curseur se déplacera dans la direction des flèches indiquées sur les touches correspondantes.

#### Touche HOME



La touche HOME vous permet de vous déplacer à partir de n'importe quel endroit du fichier vers le premier caractère introduit ou vers le premier caractère de l'écran, en fonction du programme d'application que vous utilisez.

#### Zone 3 : Les touches du curseur et les touches numériques Suite

#### TOUCHE

#### Touche FIN



#### FONCTION

La touche FIN vous permet de vous déplacer à partir d'un endroit quelconque du fichier vers le dernier caractère introduit sur la dernière ligne du fichier ou de l'image écran en cours, en fonction du programme d'application que vous utilisez.

#### Touches PAGEHAUT (9) et PAGEBAS (3)



Les touches PAGEHAUT et PAGEBAS vous permettent de scruter le contenu d'un fichier de données en déplaçant l'image écran vers le haut ou vers le bas d'environ 12 lignes. Cette procédure porte le nom de procédure de défilement. Pour pouvoir utiliser les touches PAGEHAUT et PAGEBAS, il faut que la touche NUM soit désactivée. Ces touches sont tributaires de l'application.

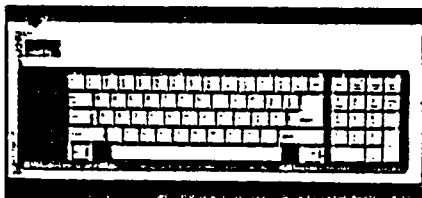


Figure 3.5. Zone 4 : Les touches de fonction.

### Zone 4 : Les touches de fonction

Un programme d'application qui tourne sur un ordinateur peut affecter diverses attributions aux touches de fonction qui sont libellées de F1 à F10. Ces touches sont considérées comme tributaires de l'application. Toutes les fois que vous lancez un programme d'application, n'oubliez pas de consulter son manuel d'utilisation où vous trouverez la liste des touches et leurs fonctions spécifiques.

## II - MISE EN MARCHÉ DE L'ORDINATEUR DE CONTRÔLE

Ce chapitre a pour but de rappeler toutes les **opérations à effectuer** pour lancer le système d'aide à la décision.

1. S'assurer que l'automate programmable MICON, les capteurs et les actionneurs sont bien **sous tension**.
2. Retirer la feuille cartonnée du lecteur de disquette sur la face avant du micro-ordinateur.
3. Introduire la **clef de verrouillage** du disque dur à gauche sur la face avant du micro-ordinateur et la tourner à droite d'un quart de tour.
4. Mettre l'imprimante sous tension.
5. Mettre l'écran sous tension en tournant le bouton supérieur vers la droite.
6. Mettre l'ordinateur sous tension en basculant la touche se trouvant à l'arrière du micro-ordinateur sur la position 1.
7. Lorsque l'écran "PARTITION DE LA MEMOIRE" (cf figure 0) apparaît, presser deux fois la touche <ESC> car le choix 2 est proposé par défaut.
8. Inscrire <ANAPROC> sur l'écran et presser la touche <RETURN>, la page titre (cf figure 2) apparaît, le logiciel est lancé.

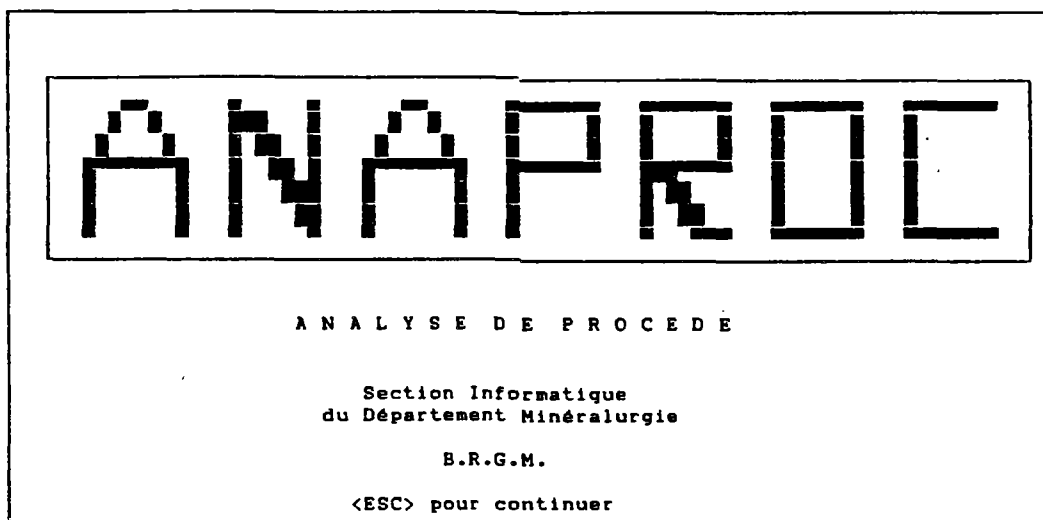


FIGURE 2 : Page titre du logiciel

### III - NOTIONS GENERALES SUR LE FONCTIONNEMENT DU LOGICIEL

La première chose à avoir en tête est que la **fonction principale du logiciel** est la **communication avec l'automate programmable**. Ceci impose des contraintes à deux niveaux :

- A. L'automate programmable ne communiquant que toutes les **huit secondes** (quatre secondes pour recevoir, quatre secondes pour émettre), les valeurs mesurées ne sont donc renouvelées sur l'écran qu'à ce rythme et il y a un temps de latence maximal de huit secondes avant l'exécution d'une commande (clefs F1-f10).
- B. Lors de l'exécution d'une commande (clefs F1-F10) ou d'un calcul (bilan matière cohérent en ligne), le micro-ordinateur ne peut pas faire d'enregistrements.

Au niveau de l'utilisation, les manipulations sont standardisées pour toutes les fonctions.

#### **Pour appeler une fonction (clef F1-F10) :**

quand le flowsheet est sur l'écran, il suffit de presser la touche adéquate (F1-F10) pour lancer une fonction.

#### **Pour entrer une variable :**

partout où des nombres, des noms de fichier ou des titres sont attendus, **l'espace disponible est visualisé par un champ coloré**. Dans chacun de ces champs se trouve une valeur par **défaut** qui peut être modifiée ou conservée sans changement.

Un **message** apparaît au bas de l'écran si il y a une **erreur de manipulation** (si la réponse attendue est **Oui** ou **Non** et que l'on inscrit un chiffre ou si l'on attend un nombre et que l'on inscrit un alphanumérique...).

Ainsi les **variables sont aussi bornées** (par exemple, pour un menu à 7 options, les chiffres supérieurs à sept ou inférieurs à 1 ne sont pas pris en compte) pour éviter les aberrations.

A tout moment, il est possible de faire une copie d'écran en pressant les touches **<SHIFT>** et **<IMPEC>**.

#### **Pour sortir d'une fonction :**

A l'intérieur d'une fonction ou pour revenir au flowsheet, il faut **presser la clef <ESC>** puis la clef **<PgDn>** (respectivement **<PgUp>**) pour passer à l'écran suivant (respectivement précédent). Tant qu'une des clefs **<PgUp>** ou **<PgDn>** n'est pas pressée, il est possible de changer les variables figurant sur l'écran.

#### IV - DESCRIPTION DES FONCTIONS DISPONIBLES DANS ANAPROC

##### IV.1. Au lancement

Un fois les opérations décrites au § II effectuées, la page titre (cf figure 2) apparaît, pressez <ESC> puis <PgDn> et la page-écran de l'**initialisation des paramètres** (cf figure 3A) s'affiche. La première question concerne l'existence d'un système (configuration de l'automate, flowsheet, fichiers du bilan matière, densité du minerai...) prédéfini, si tel est le cas il suffit de taper 0 puis le nom de ce système et de presser les touches <ESC> et <PgDn>.

Dans le cas contraire, il faut introduire :

- . la **densité** du minerai solide en g/cc
- . le nom de la configuration de l'automate si elle est différente de celle qui y est implantée
- . le **nom du fichier** d'enregistrement de toutes les valeurs mesurées et la fréquence (supérieure à huit secondes) de cet archivage
- . le **nom du fichier** d'enregistrement des valeurs rendues cohérentes et la fréquence du lancement du calcul du bilan matière et de l'archivage de toutes les valeurs calculées.

Ensuite, la communication est établie avec l'automate (cf figure 3B) et les boucles de régulation sont mises en commande à distance.

ANALYSE DE PROCÉDE	A N A P R O C	Logiciel B.R.G.M.
INITIALISATION DU SYSTEME		
Utilisation d'un système prédéfini	N	Nom PILOTE
DEFINITION D'UN NOUVEAU SYSTEME		
Densité du minerai utilisé :	4.550 g/cc	
Reconfiguration de l'automate programmable :	MICON N	Nom PILOTE
Enregistrement automatique des moyennes des valeurs mesurées		0
Nom du fichier d'enregistrement		PILOTE
Fréquence d'enregistrement		30 sec
Utilisation du bilan cohérent pour la détermination des flux		0
Nom du fichier d'enregistrement		PILOTE
Fréquence de calcul et d'enregistrement		900 sec
<ESC> pour continuer		

FIGURE 3 A : Initialisation des paramètres

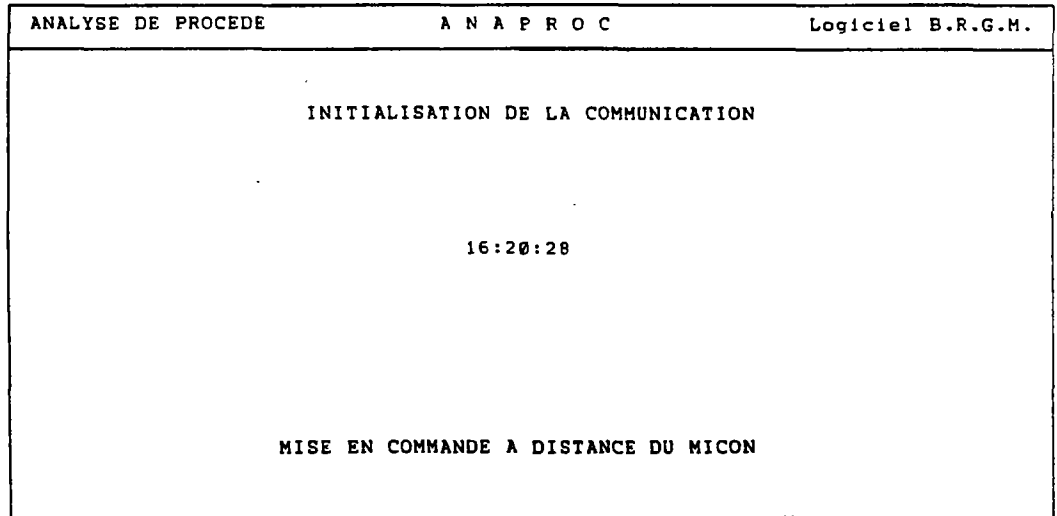


FIGURE 3 B : Initialisation des paramètres

Enfin, la page écran de la **spécification des points de consigne** apparaît. Les valeurs affichées par défaut sont celles de l'automate (cf figure 4) et on peut les changer ou les conserver. Cette opération faite, le flowsheet s'affiche avec les valeurs mesurées.

ANALYSE DE PROCEDE		A N A P R O C	Logiciel B.R.G.M.
INITIALISATION DES POINTS DE CONSIGNE			
N° de Boucle	Valeur	Utilisation	
1	1.200	Densité de l'alimentation du cyclone	
2	200.000	Débit d'eau à l'alimentation du circuit	
3	200.000	Débit d'eau pour le broyeur à boulets	
4	1000.000	Débit d'eau à l'alimentation du cyclone	
5	50.000	Niveau en pourcentage dans la bache H12	
6	50.000	Niveau en pourcentage dans la bache PW4	
7	0.000	Niveau en pourcentage dans la bache PW7	
8	0.000	Non utilisée pour cette configuration	
	<ESC>	pour continuer	

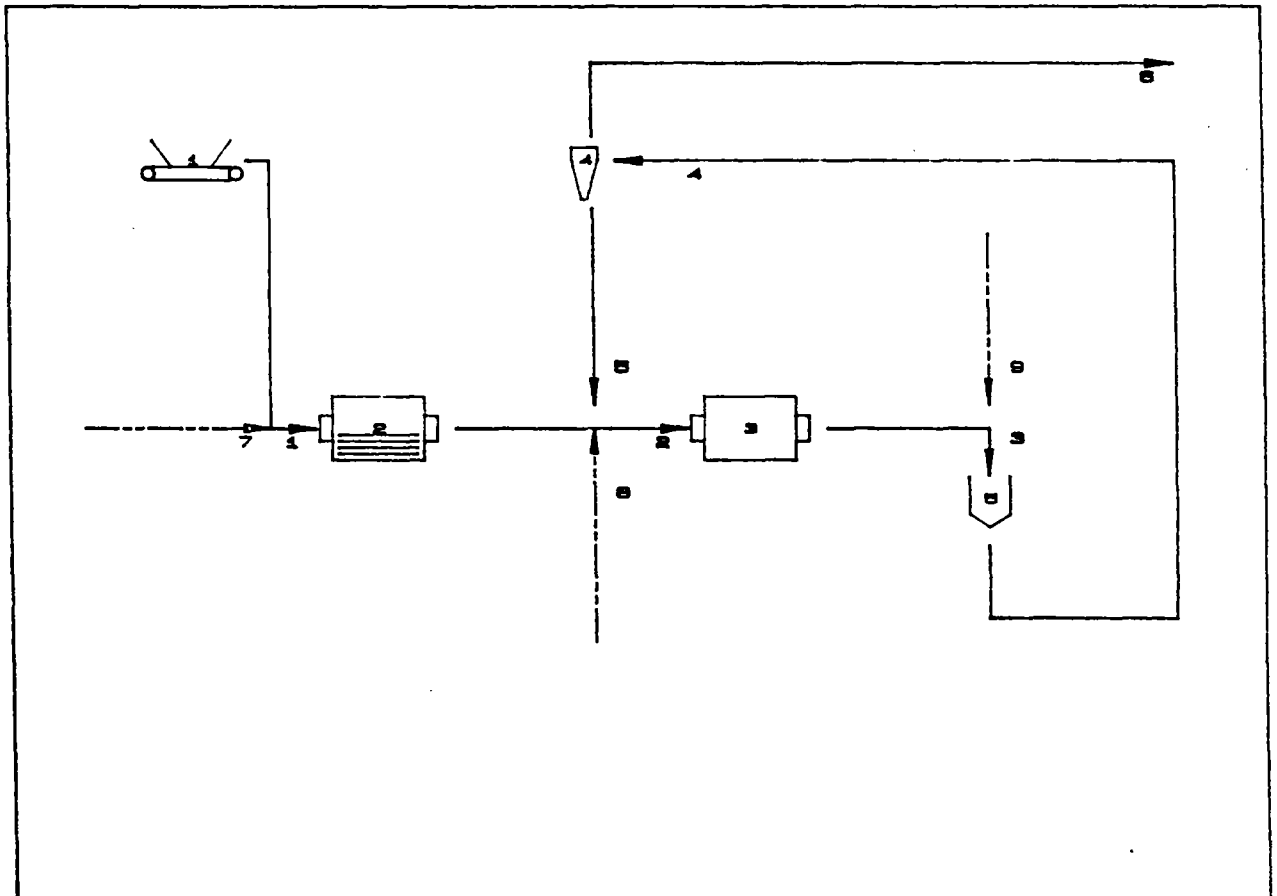
FIGURE 4 : Spécification des points de consigne.

Le flowsheet utilisé à titre d'exemple est celui du **circuit broyage-classification du pilote du B.R.G.M.** (cf figure 5) ; il comporte :

- une trémie d'alimentation (1)
- un broyeur à barres (2)
- un broyeur à boulet (3)
- un hydrocyclone classificateur (5).

Ce circuit s'affiche sur l'écran comme le montre la figure 6.

CIRCUIT PILOTE DU B.R.G.M.



USIM

-----> FLUX D'EAU  
 —————> FLUX DE PULPE

logiciel BRGM

FIGURE 5 : Présentation du circuit pilote.

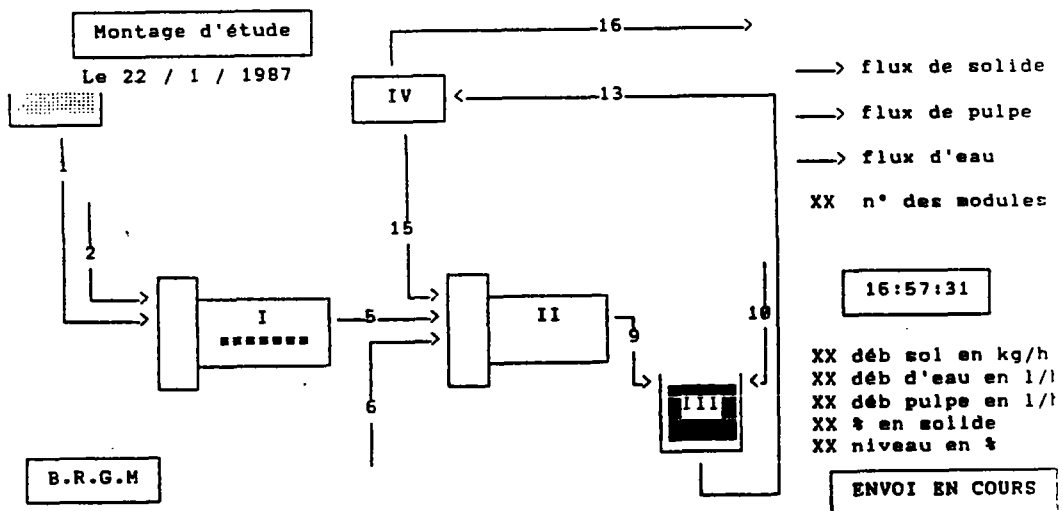


FIGURE 6 : Visualisation du circuit étudié.

## IV.2. En opération

### 2.1. Présentation du flowsheet

Lors du déroulement d'un essai pilote, le **flowsheet** reste en permanence affiché à l'écran avec la numérotation des flux et des appareils (cf figure 7). Des codes de couleur explicités sur l'écran permettent d'identifier les valeurs mesurées et calculées inscrites :

- vert : flux de solide en kg/h
- rouge : flux de pulpe en l/h
- bleu : flux d'eau en l/h
- blanc : concentrations en solide en pourcentage
- magenta : niveau de pulpe dans les baches en pourcentage du volume total.

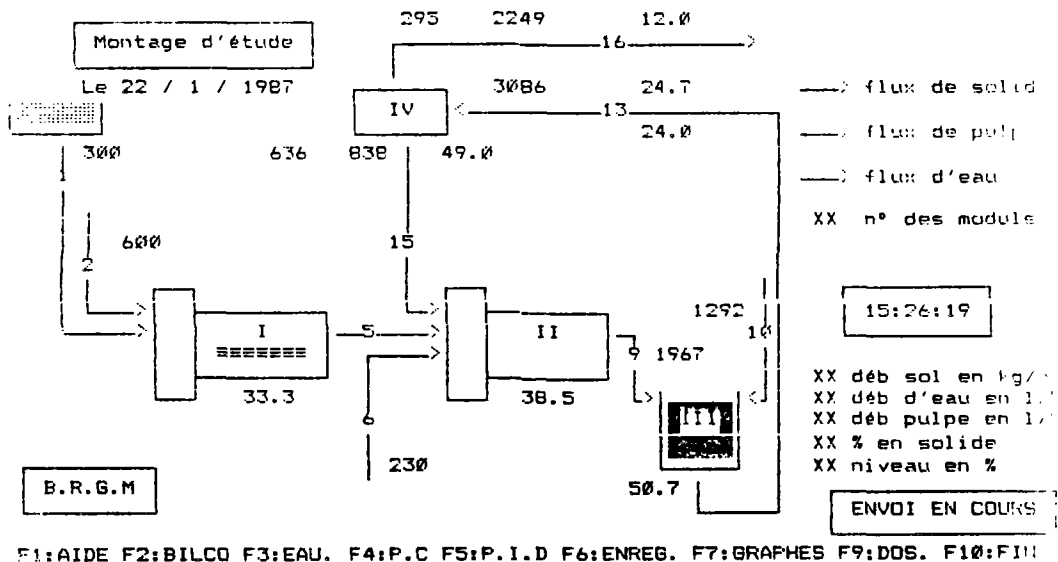


FIGURE 7 : Visualisation des valeurs mesurées.

2.2. Le bilan matière cohérent

Sans intervention de l'opérateur et d'une façon totalement transparente, le calcul du bilan matière cohérent s'effectue à intervalles réguliers à partir des moyennes des valeurs mesurées déterminées entre deux calculs et les résultats viennent s'inscrire sur l'écran (cf figure 8) sous les valeurs mesurées avec le même code de couleur mais de faible intensité lumineuse.

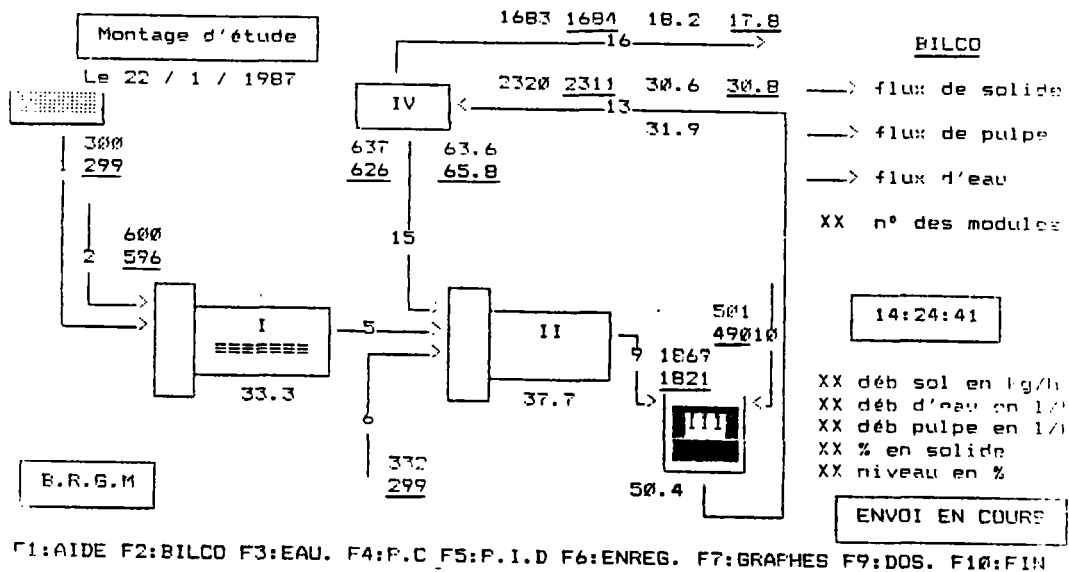


FIGURE 8 : Visualisation des valeurs mesurées et des valeurs rendues cohérentes par bilan matière (soulignées).

A n'importe quel moment (compte tenu des délais inhérents à la communication avec l'automate programmable), il est possible d'utiliser une des fonctions proposées dans le menu inscrit au bas de l'écran.

F1:AIDE F2:BILCO F3:EAU. F4:P.C. F5:P.I.D F6:ENRIG. F7:GRAPHES F9:DOS. F10:FIN  
en pressant la clef correspondante sur la gauche du clavier.

### IV.3. Liste des fonctions accessibles en ligne

#### 3.1. Fonction F1 : AIDE

Cette clef permet d'appeler l'affichage de l'écran présenté en figure 9 qui est un **rappel**, en ligne, **des commandes possibles**. Pour revenir au flowsheet, il suffit, comme cela est décrit au chapitre § III, de presser la clef <ESC> puis la clef <PgDn>.

ANALYSE DE PROCÉDE	A N A P R O C	Logiciel B.R.G.M.
<b>RAPPEL DES COMMANDES</b>		
F1 : Visualisation de cet écran		
F2 : Changement de la fréquence de calcul du bilan matière BILCO et de l'enregistrement des résultats		
F3 : Réglage des ajouts d'eau dans le circuit		
F4 : Changement des valeurs des points de consigne		
F5 : Changement des valeurs des paramètres P, I et D		
F6 : Changement de la fréquence d'enregistrement des grandeurs mesurées		
F7 : Visualisation graphique des grandeurs mesurées		
F10 : Retour au système d'exploitation ( D.O.S. )		
<ESC> pour continuer		

FIGURE 9 : Aide en ligne (clef F1).

### 3.2. Fonction F2 : BILCO

Cette clef permet de **changer la fréquence de calcul du bilan matière cohérent BILCO** et donc celle d'**archivage de toutes les valeurs calculées** dans le fichier défini au lancement (cf. figure 10). Durant l'intervalle de temps représenté par cette fréquence, les valeurs mesurées sont accumulées et moyennées ; lors du lancement du calcul, ces valeurs sont directement introduites dans le fichier de données de BILCO sans intervention de l'opérateur et les valeurs calculées viennent s'afficher sur l'écran et sont archivées.

ANALYSE DE PROCEDURE	A N A P R O C	Logiciel B.R.G.M.
<b>CHANGEMENT DE LA FREQUENCE DE CALCUL DU BILAN COHERENT</b>		
Nouvelle fréquence		900 sec
<p>Rmq : Cette fréquence caractérise le lancement automatique du bilan matière cohérent BILCO. Les valeurs mesurées sont moyennées dans l'intervalle et directement utilisées pour le calcul.</p>		
<ESC> pour continuer		

FIGURE 10 : Fréquence de calcul BILCO (clef F2).



### 3.4. Fonction F4 : P.C.

Cette fonction permet de **changer en ligne les points de consigne** des huit boucles de régulation. La première page-écran (cf. figure 12A) permet de sélectionner la boucle et la seconde (accessible par <ESC> <PgDn> permet de choisir la valeur du point de consigne (cf figure 12B). Le sens physique de ces consignes est indiqué à la figure 4. Le dernier changement opéré est ensuite envoyé à l'automate (cf. figure 13) et l'on revient au flowsheet.

ANALYSE DE PROCEDE	A N A P R O C	Logiciel B.R.G.M.
CHOIX DE LA BOUCLE		
Numéro de la boucle : 1		
<ESC> pour continuer		

ANALYSE DE PROCEDE	A N A P R O C	Logiciel B.R.G.M.
CHANGEMENT DES POINTS DE CONSIGNE		
Boucle n°1		
Ancienne valeur : 1.200 Nouvelle valeur : 1.200		
<p>Rmq : Il est possible, par &lt;PgUp&gt; et &lt;PgDn&gt;, de visualiser tous les points de consignes mais seul le dernier changement opéré avant de retourner au flowsheet sera pris en compte par le MICON.</p>		
<ESC> pour continuer		

FIGURES 12A et 12B : Changement de la valeur du point de consigne d'une boucle (clef F4).

ANALYSE DE PROCEDE	A N A P R O C	Logiciel B.R.G.M.
ENVOI DU MESSAGE AU MICON		

FIGURE 13 : Intégration de la nouvelle valeur dans l'automate

### 3.5. Fonction F5 : P.I.D.

Cette fonction permet de **changer en ligne des coefficients proportionnels, intégraux et différentiels** des huit boucles de régulation. La première page-écran (cf figure 14A) permet de sélectionner la boucle et la seconde (accessible pour <ESC> <PgDn> permet de choisir les valeurs des trois coefficients (cf figure 14B). le dernier changement opéré est ensuite envoyé à l'automate (cf figure 13) et l'on revient au flowsheet.

ANALYSE DE PROCEDE	A N A P R O C	Logiciel B.R.G.M.
CHOIX DE LA BOUCLE		
Numéro de la boucle : 1		
<ESC> pour continuer		

ANALYSE DE PROCEDE	A N A P R O C	Logiciel B.R.G.M.
CHANGEMENT DES VALEURS DES P, I ET D		
BOUCLE n°1		
P : ancienne valeur :	1.7	nouvelle valeur : 1.7
I : ancienne valeur :	2.0	nouvelle valeur : 2.0
D : ancienne valeur :	0.0	nouvelle valeur : 0.0
Rmq : il est possible de visualiser tous les points de consignes mais seul le dernier changement effectué sera pris en compte.		
<ESC> pour continuer		

FIGURES 14 A et 14 B : Changement des valeurs des gains P, I et D d'une boucle (clef F5).

### 3.6. Fonction F6 : ENREG.

Cette fonction permet de **changer la fréquence d'enregistrement de toutes les valeurs mesurées** dans le fichier d'archivage défini au lancement (cf figure 15). Durant l'intervalle de temps représenté par cette fréquence, les valeurs mesurées sont accumulées et moyennées. Les moyennes sont ensuite introduites dans le fichier d'archivage.

ANALYSE DE PROCEDE	A N A P R O C	Logiciel B.R.G.M.
<b>CHANGEMENT DE LA FREQUENCE D'ENREGISTREMENT</b>		
Nouvelle fréquence		30 sec
<p>Rmq : Cette fréquence caractérise l'enregistrement des valeurs mesurées à travers le MICON. La lecture de ces valeurs étant effectuée toutes les 8 secondes, la fréquence réelle sera un multiple de ce nombre et une moyenne sera calculée entre deux enregistrements.</p>		
<ESC> pour continuer		

FIGURE 15 : Fréquence d'archivage des valeurs mesurées (clef F6).

### 3.7. Fonction F7 : GRAPHES

Cette fonction permet la visualisation rapide de l'évolution des variables mesurées en fonction du temps. Sur la page-écran qui s'affiche (cf figure 16A) un choix est offert entre six grandeurs mesurées. Par défaut, cette visualisation est proposée entre l'heure de lancement d'ANAPROC et l'heure actuelle mais il est possible de changer ces valeurs. Des protections sont insérées au cas où la grandeur mesurée serait constante (cf figure 16B), ou si l'intervalle de temps est trop court (cf figure 16C) ou trop long (cf figure 16D).

ANALYSE DE PROCÉDE		A N A P R O C		Logiciel B.R.G.M.	
VISUALISATION GRAPHIQUE					
CHOIX DE LA VARIABLE MESURÉE :					
1 - Alimentation en solide du circuit					
2 - Débit Q13 ( alimentation cyclone )					
3 - Pourcentage en solide d13				Votre choix	6
4 - Débit Q16 ( surverse du cyclone )					
5 - Pourcentage en solide d16					
6 - Débit Q9 ( sortie du broyeur à boulets )					
Temps Initial		Temps Final			
de	16 h 54 min	à	17 h	3 min	
<ESC> pour continuer					

FIGURE 16A : Visualisation graphique des valeurs mesurées (clef F7).

Enfin, les graphes obtenus sont automatiquement mis à l'échelle et les extrema sont indiqués (cf figures 17A, 17B, 17C et 17D). Des calculs statistiques simples peuvent être effectués sur ces intervalles de temps.

ANALYSE DE PROCEDE	A N A P R O C	Logiciel B.R.G.M.
VISUALISATION GRAPHIQUE		
Il est impossible de présenter le graphe choisi		
car		
la grandeur est constante sur l'intervalle donné.		
<ESC> pour continuer		

FIGURE 16 B

ANALYSE DE PROCEDE	A N A P R O C	Logiciel B.R.G.M.
VISUALISATION GRAPHIQUE		
Il est impossible de présenter le graphe choisi		
car		
il n'y a pas assez de valeurs sur cet intervalle de temps.		
<ESC> pour continuer		

FIGURE 16 C

ANALYSE DE PROCEDE	A N A P R O C	Logiciel B.R.G.M.
VISUALISATION GRAPHIQUE		
Il est impossible de présenter le graphe choisi		
car		
il y a trop de valeurs dans cet intervalle de temps		
<ESC> pour continuer		

FIGURE 16 D

Ecrans de contrôle de la visualisation.

## Débit Q16 (OF)

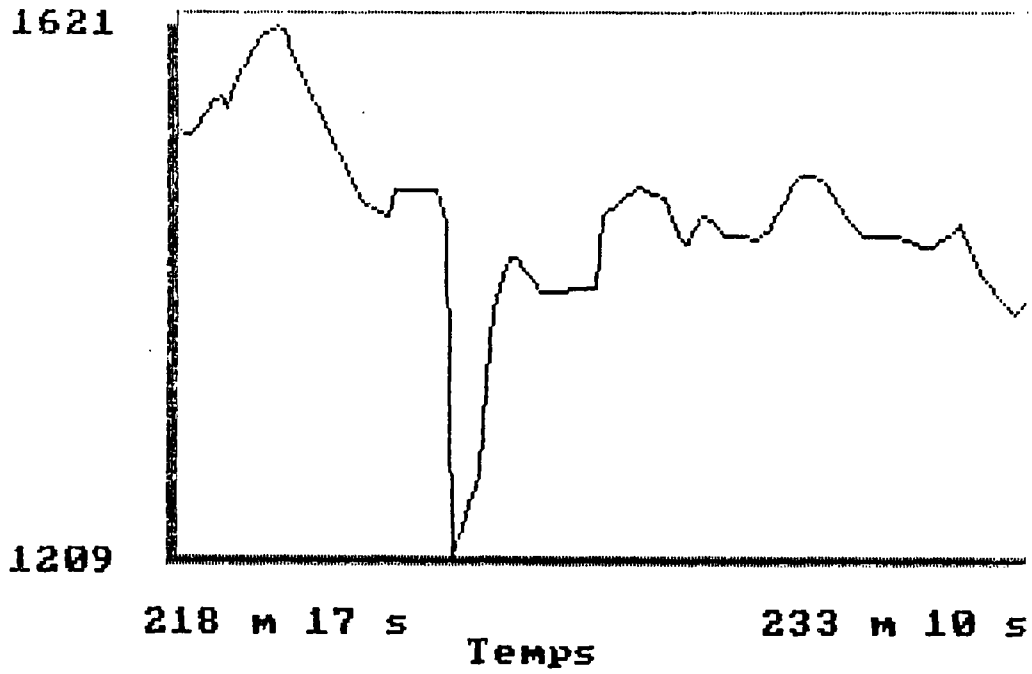


FIGURE 17 A : Débit de la surverse du cyclone en l/h.

## Densité d16

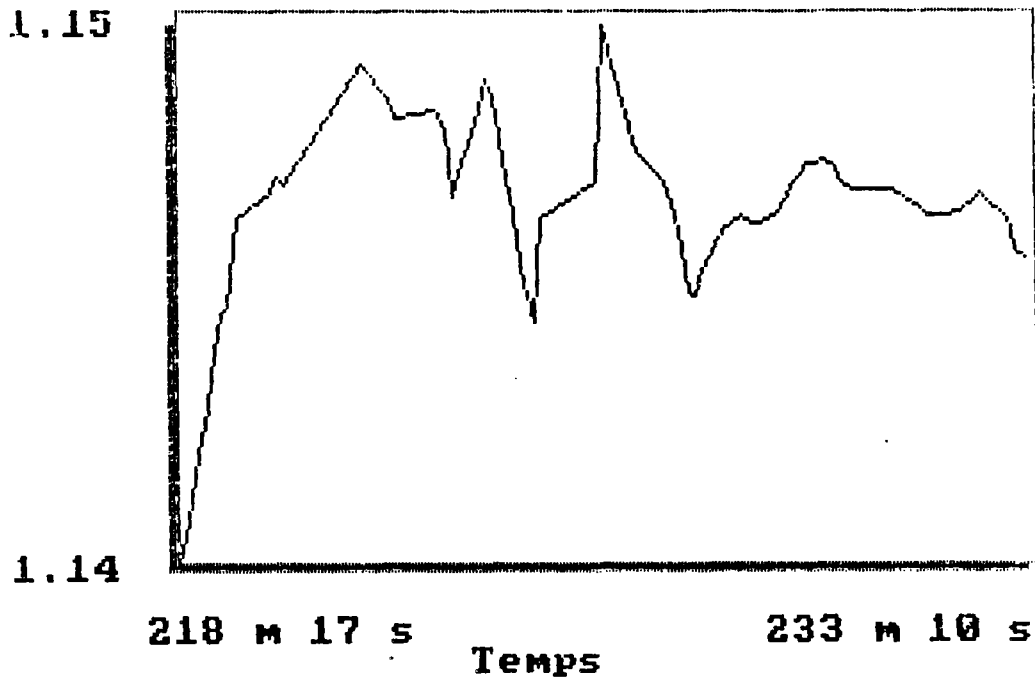


FIGURE 17 B : Densité de la surverse en g/cc

Exemples de graphes.

## Débit Q13 (AC)

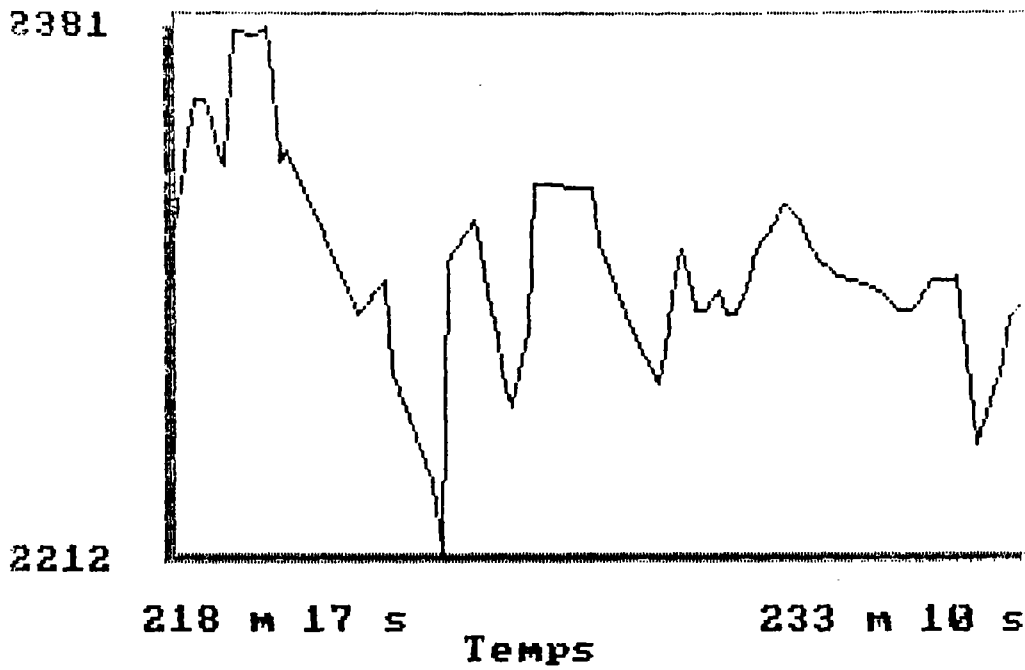


FIGURE 17 C : Débit de l'alimentation du cyclone.

## Densité d13

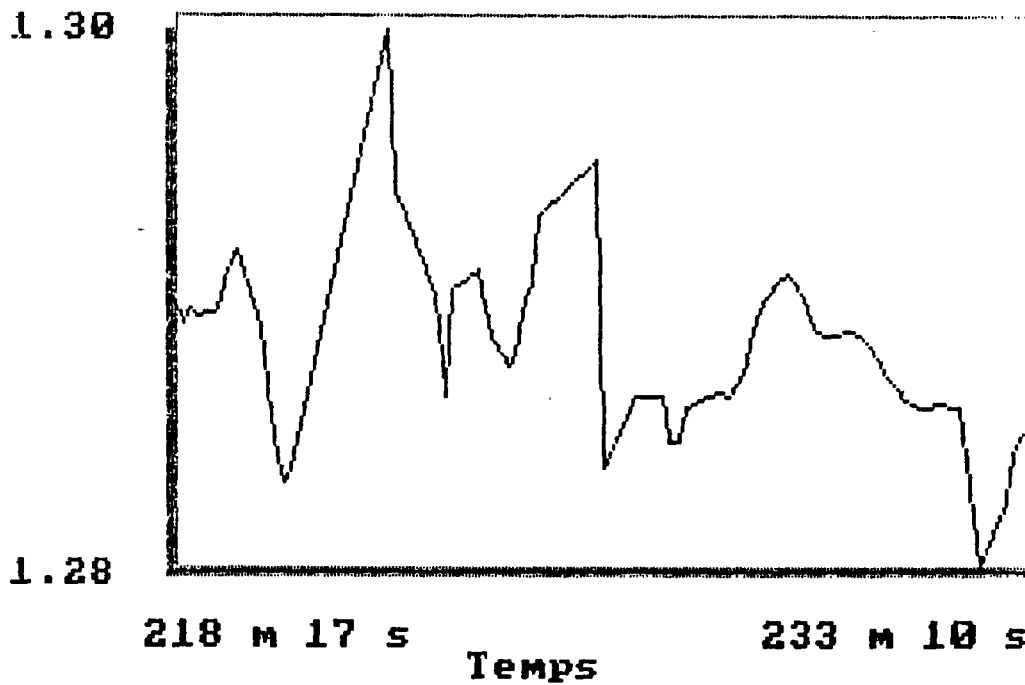


FIGURE 17 D : Densité de l'alimentation du cyclone.

Exemples de graphes.

### 3.8. Fonction F8

Cette fonction permet d'effacer temporairement l'affichage des valeurs calculées par bilan matière cohérent.

### 3.9. Fonction F9 : DOS

Cette fonction permet une sortie **provisoire** au système d'exploitation (Disk Operating System). Pour revenir au flowsheet il faut inscrire <EXIT> puis presser la touche <RETURN>. Durant la sortie du programme, tout reste en l'état.

### 3.10. Fonction F10 : FIN

Cette fonction permet de quitter définitivement ANAPROC en fermant tous les fichiers. Un message demandant confirmation apparait pour éviter les fausses manoeuvres.

Chacune de ces fonctions étant indépendante, il est possible de développer des applications nouvelles et d'offrir ainsi un choix initial à l'utilisateur.

## V - CONCLUSION

**ANAPROC** est un outil au **service de l'opérateur** qui permet :

- a. D'avoir une **vision d'ensemble** de l'état du procédé à un instant donné (affichage) et dans le temps (graphiques).
- b. **D'utiliser plus facilement la régulation** effectuée par le MICON (coefficients PID, points de consigne).
- c. **D'éviter les relevés manuels** instantanés des valeurs mesurées (archivage).
- d. De fournir une **vision ajustée des grandeurs** (bilan matière cohérent) et de **prédire l'évolution de celles-ci** en cas de changement d'un paramètre opératoire (simulation statique).

et est fait pour être utilisé par tous les opérateurs du circuit pilote.

\*\*\*

**ANNEXE 2 : LOGICIEL DE CALCUL DE BILAN MATIERE COHERENT : BILCO**

## GENERALITE

Les bilans matière globaux ou détaillés constituent un élément d'appréciation fondamental du fonctionnement de toute installation de transformation : traitement des minerais, métallurgie, chimie, agro-alimentaire...

Pour réaliser un tel bilan sur une installation particulière, il est d'abord nécessaire de disposer de données expérimentales issues de mesures effectuées sur l'installation : mesures de débits, analyse chimique ou granulométrique d'échantillons. Cependant dans le cas général l'établissement du bilan à partir de ces données se heurte à deux difficultés :

- difficulté de "boucler" le bilan, en raison de la non cohérence des informations redondantes,
- grand nombre d'équations à traiter pour établir un bilan détaillé lorsque l'installation est complexe.

Le premier point résulte en général surtout des imperfections de mesure. Le logiciel BILCO permet d'utiliser simultanément toutes les informations disponibles sur les flux de matière pour établir sur une installation dont la configuration peut être quelconque un **bilan matière cohérent**. Il fournit une **estimation des débits et de la composition** de tous les flux, cette estimation vérifiant l'ensemble des équations de bilan matière et étant aussi proche que possible des valeurs expérimentalement mesurées compte tenu de la précision indiquée pour chacune de ces mesures.

## ELEMENTS DE THEORIE

### Représentation du système

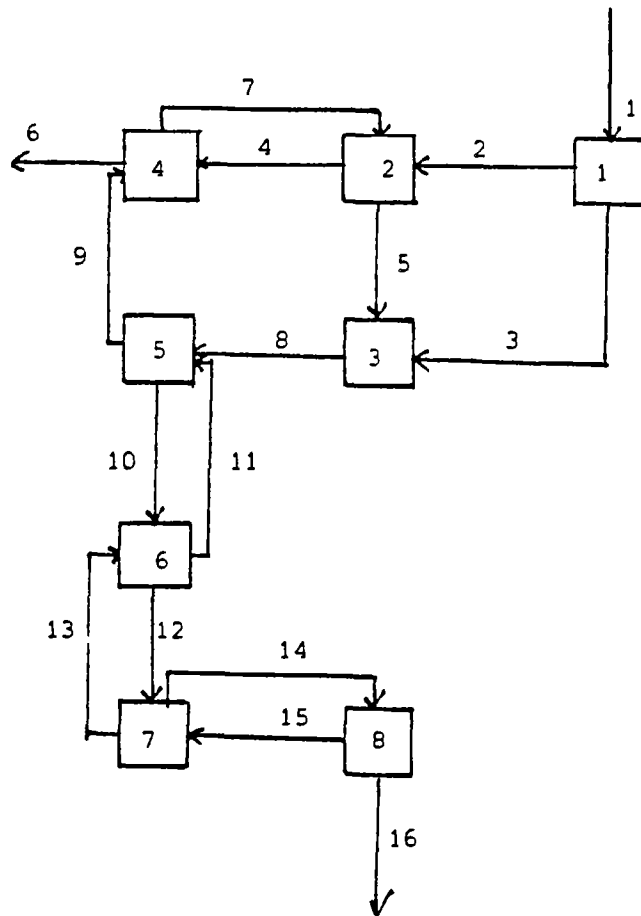
Le procédé est représenté schématiquement par un graphe comme celui de la figure 4, comportant NF arcs correspondant à des flux de matière numérotés  $i = 1$  à NF, et NN noeuds numérotés  $j = 1$  à NN, pouvant recouvrir une réalité physique quelconque.

La numérotation des flux peut être quelconque et est laissée à l'initiative de l'utilisateur. Il est cependant recommandé de réserver le n° 1 au flux d'alimentation de l'installation, car BILCO calcule tous les rendements par rapport au flux 1.

La numérotation des noeuds est aussi quelconque. Cependant si certains noeuds représentent des appareils dans lesquels certains constituants du système sont transformés - par exemple les tranches granulométriques sont transformées dans un broyeur -, alors ces noeuds doivent obligatoirement porter les derniers numéros.

La matière circulant dans l'installation est représentée par :

- des débits globaux. Ceux-ci peuvent être selon le désir de l'utilisateur des débits solide, ou liquide, ou pulpe...etc. Dans le cas de procédés discontinus, ces débits sont remplacés par des masses totales de matière.



graphe comportant :

- 16 arcs (NF = 16)
- 8 noeuds (NN = 8)

FIGURE 4

- des constituants. Il ne s'agit pas nécessairement d'une description complète de la matière, mais uniquement des constituants utilisés pour établir le bilan matière. Leur choix est à l'initiative de l'utilisateur. Il peut s'agir d'espèces chimiques, ou d'espèces minéralogiques, ou de tranches granulométriques, ou de phases liquides...etc. Dans certains cas particuliers les constituants retenus permettent une description "complète" de la matière : par exemple analyses granulométriques complètes, ou analyses chimiques complètes, ou phase liquide + phase solide. Alors, la somme des teneurs des constituants égale 100 % pour chaque flux.

Le tableau 1 récapitule les dimensions maximum des systèmes qui peuvent actuellement (mars 1986) être traités par BILCO, dans sa version IBM.PC et dans sa version VAX.

	BILCO version IBM.PC	BILCO version VAX
nombre maxi de noeuds	15	30
nombre maxi de flux	16	50
nombre maxi de constituants	3	6 ou 10
prise en compte d'appareils de transformation des constituants	oui	oui
prise en compte des cas où la somme des constituants atteint 100 %	oui	oui
prise en compte simultanée de constituants granulométriques et des teneurs chimiques de chaque tranche granulométrique	non	oui

TABLEAU 1 - Dimension maximum des systèmes traités par BILCO

Notations utilisées

## Grandeurs mesurées (données du problème)

$\overline{Q_i}$	débit global flux i	$1 \leq i \leq NF$
$\overline{\theta_{ik}}$	teneur en constituant k pour le flux i	$1 \leq i \leq NC$
$2\sigma_i$	erreur estimée possible pour la mesure $\overline{Q_i}$ en %	
$2\sigma_{ik}$	erreur estimée possible pour la mesure $\overline{\theta_{ik}}$ en %.	

## Grandeurs estimées (calculées par BILCO)

$Q_i$	débit global flux i
$\theta_{ik}$	teneur en constituant k du flux i

## Représentation matricielle du flowsheet

Pour faciliter l'écriture des équations ultérieures, il est possible d'introduire une matrice de circulation dont les termes  $m_{ij}$  sont :

$m_{ij} = 1$	si le flux i arrive au noeud j
$m_{ij} = 0$	si le flux i ne passe pas par le noeud j
$m_{ij} = -1$	si le flux i sort du noeud j.

Equations de bilan

Lorsqu'une installation fonctionne à l'équilibre, il est possible d'écrire des équations de conservation de la matière au niveau de chaque noeud :

débit global :

$$\forall j \in [1, NN] \quad \sum_{i=1}^{NF} m_{ij} Q_i = 0 \quad (1)$$

débit partiel de chaque constituant :

$$\forall j \in [1, NN] \quad \sum_{i=1}^{NF} m_{ij} Q_i \theta_{ik} = 0 \quad (2)$$

$$\forall k \in [1, NC]$$

Il est clair que les mesures  $\overline{Q_i}$  et  $\overline{\theta_{ik}}$  ne satisfont jamais ces équations, à cause d'une part d'écarts à l'équilibre et d'autre part de difficultés de mesure.

BILCO calcule des estimateurs  $Q_i$  et  $\theta_{ik}$  qui d'une part satisfont ces équations, et d'autre part tentent d'approcher au mieux la réalité (à ne pas confondre avec la mesure). Ce dernier point est pris en compte en recherchant des estimateurs  $Q_i$  et  $\theta_{ik}$  aussi proches que possible des grandeurs mesurées  $\overline{Q_i}$  et  $\overline{\theta_{ik}}$ . Mathématiquement, ceci revient à rechercher  $Q_i$  et  $\theta_{ik}$  tels qu'ils minimisent une fonction pénalité du type :

$$H = \sum_{i=1}^{NF} \left( \frac{1}{(\sigma_i/100)^2} \right) \left( \frac{Q_i - \bar{Q}_i}{\bar{Q}_i} \right)^2 + \sum_{i=1}^{N'} \sum_{k=1}^{NC} \left( \frac{1}{(\sigma_{ik}/100)^2} \right) \left( \frac{\theta_{ik} - \bar{\theta}_{ik}}{\bar{\theta}_{ik}} \right)^2$$

### Algorithme de résolution

Le problème consiste donc à rechercher NF (NC + 1) inconnues  $Q_i$  et  $Q_{ik}$  qui :

- satisfont les NN équations (1)
  - satisfont les NN\*NC équations (2)
  - minimisent la fonction H.
- { NN(NC+1) contraintes

Ce problème peut être résolu par la méthode des multiplicateurs de Lagrange, pour rechercher sous contrainte l'extrémum d'une fonction. Cette méthode introduit de nouvelles inconnues appelées **multiplicateurs de Lagrange**, au nombre de NN(NC+1), notés  $\lambda_l$ . Le problème se ramène alors à la résolution d'un système de (NF+NN)(NC+1) équations à (NF+NN)(NC+1) inconnues :

- NN équations de bilan de type 1
- NN\*NC équations de bilan de type 2
- NF(NC+1) équations du type :

$$\frac{\partial H}{\partial x_i} + \sum_l \lambda_l \frac{\partial g_l}{\partial x_i} = 0$$

ou  $x_i$  désigne successivement les NF(NC+1) inconnues initiales  
 $g_l$  désigne les NN(NC+1) équations de contrainte.

Pour NF = 16, NN = 12, NC = 3, cela fait un système de 112 équations à 112 inconnues.

La présence dans ce système d'équations non linéaires (type 2), implique la nécessité de recourir à une méthode de résolution numérique itérative.

L'algorithme de BILCO comporte la mise en oeuvre successive de deux méthodes :

- une approche de la solution basée sur la linéarisation des équations par découplage des variables,
- l'amélioration de cette solution par la méthode de Newton Raphson.

### Linéarisation par découplage des variables

La non linéarité des équations provient de produits entre des débits globaux  $Q_i$ , que nous appelons variables de classe 1, et des compositions  $\theta_{ij}$  ou des multiplicateurs de Lagrange  $\lambda_l$  que nous appelons variables de classe 2.

A chaque étape de calcul on suppose que toutes les variables qui n'appartiennent pas à la classe sur laquelle porte les calculs sont connues : on résout de façon itérative des systèmes linéaires d'ordre  $(NN+NF)$ , la convergence de l'algorithme est supposée acquise si entre deux itérations successives la variation relative pour chaque variable du problème est inférieure à un  $\epsilon$  arbitrairement choisi. Les systèmes linéaires d'ordre  $(NN+NF)$  sont résolus par l'algorithme de Gauss avec pivot total.

Cette approche de découplage des variables permet dans un certain nombre de cas d'aboutir très rapidement à une solution satisfaisante. Il arrive cependant qu'elle converge pour des valeurs numériques qui peuvent être améliorées. Dans BILCO, ces valeurs numériques servent alors d'initialisation pour la méthode Newton-Raphson.

### Méthode de Newton-Raphson

La méthode Newton-Raphson est une méthode de résolution d'un système de  $n$  équations à  $n$  inconnues, dont le principe est analogue à celui de la méthode de Newton pour résoudre  $f(x) = 0$ , dont le principe est illustré figure 5.

Le système :

$$\begin{aligned} f_1(x_1, \dots, x_n) &= 0 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned}$$

peut s'écrire sous forme matricielle :

$$F(X) = (0) \text{ avec } X, F(X) \text{ et } (0) \in \mathbb{R}^n$$

On peut écrire :

$$(1) \quad \forall j \quad f_j(X) = f_j(X_i) + \sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_k) \left( \frac{\partial f_j}{\partial x_k} \right)_{x_{ik}} + E_{ji}$$

où  $E_{ji}$  désigne les termes d'ordre supérieur ou égal à 2

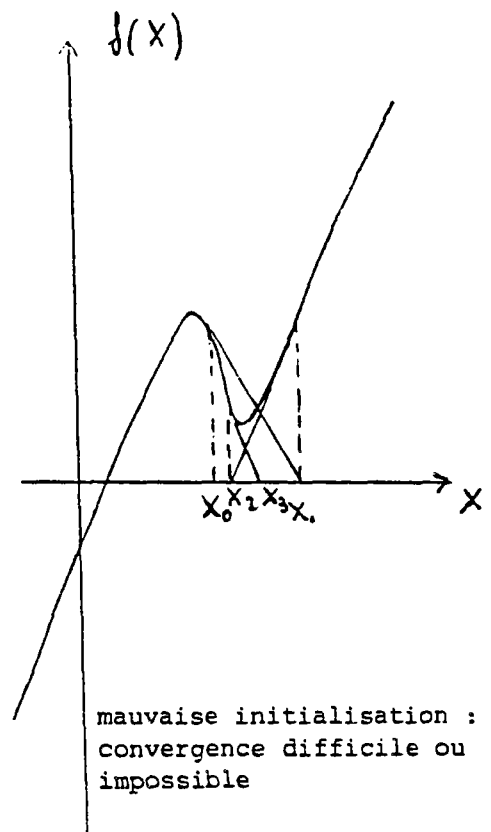
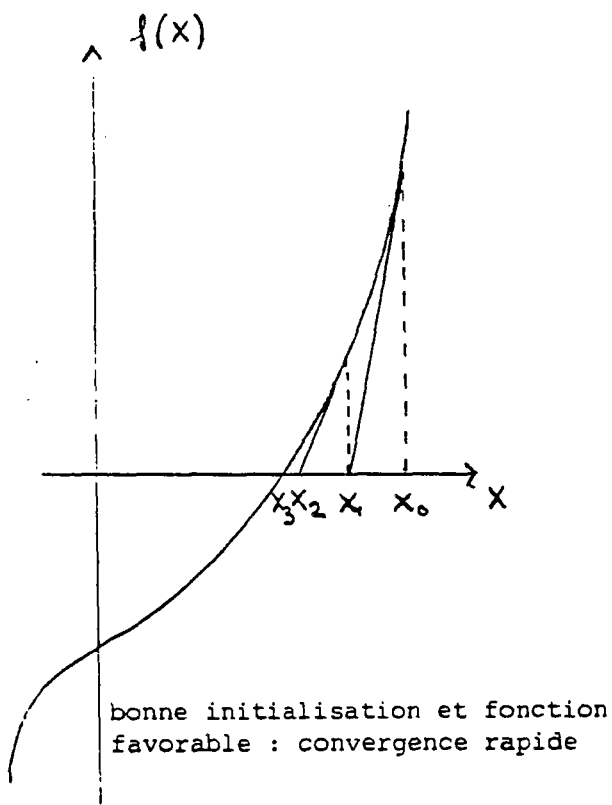


FIGURE n° 5. La méthode de Newton de résolution de  $f(x) = 0$ .

Appelons  $J_F (X_i)$  la matrice :

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

(1) permet d'écrire :

$$F(X) = F(X_i) + JF(X_i) (X_i - X) + E_i$$

La méthode de Newton est itérative. Partant d'un vecteur de  $\mathbb{R}_n$  initial ( $X_0$ ) :

$$F(X) = F(X_0) + JF(X_0) (X_0 - X) + E_i = 0$$

En multipliant par l'inverse de  $JF(X_0)$  :

$$JF^{-1}(X_0) F(X) = JF^{-1}(X_0) F(X_0) + (X_0 - X) + E_i = 0$$

On calcule :

$$X_1 = X_0 + JF^{-1}(X_0) F(X_0)$$

On calcule ainsi successivement  $X_0, X_1, \dots, X_i, \dots$

Dans le cas le plus favorable de convergence uniforme,

$$\| X_{i+1} - X \| < \| X_i - X \|$$

A chaque itération, il faut successivement :

- calculer  $JF(X_i)$
- calculer l'inverse  $JF^{-1}(X_i)$
- calculer  $X_{i+1}$

Ce résumé théorique fait apparaître les contraintes principales liées à l'algorithme de Newton-Raphson :

- nécessité d'une bonne initialisation. A ce titre la mise en oeuvre préalable de l'algorithme de linéarisation par découplage des variables favorise fortement la convergence,

- temps de calcul augmentant rapidement avec la taille du système concerné. Un système "moyen" demande à chaque itération le calcul et l'inversion de matrices de plus de 10 000 termes.

## METHODOLOGIE GENERALE D'UTILISATION DE BILCO

### Analyse préalable du problème

Pour une application nouvelle, la première étape est de choisir la **représentation du système** : graphe associé au flowsheet, numérotation des flux et des noeuds, choix et numérotation des constituants.

Ensuite, il faut faire une analyse des données expérimentales : il faut prendre en compte non seulement les **mesures**, mais aussi les **ordres de grandeurs connus ou présumés**, même si l'erreur les concernant est évaluée à 100 %, voire 500 %. Pour chaque mesure de débit ou analyse chimique, il faut évaluer en % la **précision de l'information**.

Pour les mesures de débit, cette évaluation pourra être basée soit sur la précision des appareils ou méthodes, soit sur une connaissance statistique, soit sur une connaissance intuitive.

Pour les mesures de composition, il ne faut pas oublier que l'**erreur d'échantillonnage** est le plus souvent très supérieure à l'erreur d'analyse chimique.

Il faut noter que pour une installation donnée, dans laquelle on voudrait établir des bilans quotidiens ou horaires, cette analyse n'est à faire qu'une seule fois.

### Examen des résultats

Dans le cas le plus favorable et le plus fréquent, les résultats sont dès le premier passage satisfaisants. Alors, les informations disponibles sur l'installation ne sont pas excessivement fantaisistes et l'analyse des données a sans doute été pertinente.

Il peut arriver que la convergence mathématique se fasse vers une solution dépourvue de sens physique. Le plus souvent ceci provient d'une analyse insuffisante des données et il faut préciser l'ordre de grandeur de certains flux non mesurables.

Il peut arriver que l'algorithme ne converge pas. Alors, il est possible d'alléger les contraintes au sens mathématique, par exemple en supprimant l'obligation de boucler à 100 % la somme des constituants. Le critère de convergence peut aussi être allégé. Il doit en général varier de 1 % (cas très difficile) à 0,0001 % ou moins (cas faciles).

Si le problème reste insoluble, il y a vraisemblablement une faiblesse dans votre problème : erreur de flowsheet, erreur dans une donnée, mesures trop incohérentes, système excessivement compliqué. Il peut alors être judicieux de se ramener à un problème simplifié.

#### Remarques diverses

- L'utilisateur a le choix des unités et il n'a pas à les indiquer. Il lui appartient de choisir ces unités pour que :
  - . tous les débits soient compris entre :  
0,001 et 999 999,999
  - . toutes les "teneurs" soient comprises entre :  
0,001 et 99 999,999

**ANNEXE 3 : PRESENTATION GENERALE DU SIMULATEUR STATIQUE : USIM**

Pour concevoir une installation de traitement d'un minerai, en vue de sa réalisation ou de son étude économique, l'ingénieur minéralurgiste dispose en général de résultats de tests portant sur des échantillons présumés représentatifs de ce minerai :

- tests des performances de procédés unitaires appliqués au minerai dans un certain état : flottation, séparation magnétique, traitement gravimétrique,
- tests destinés à faciliter le dimensionnement des appareils industriels : détermination de work index, essais de filtration...
- tests pilotes quelquefois, dont le rhéogramme n'est généralement pas entièrement transposable à l'unité industrielle.

A partir de ces informations, une démarche logique consiste à :

- concevoir un rhéogramme, combinant plusieurs opérations unitaires, permettant globalement de bonnes performances métallurgiques : bonne qualité des "concentrés", bonne récupération,
- calculer en tous points du rhéogramme les débits de matière (donner une description quantitative de tous les flux), de façon à rendre possible le dimensionnement des équipements : appareils mais aussi pompes, tuyaux, bandes transporteuses, capteurs, échantillonneurs,
- si possible rechercher un optimum économique, en recherchant par exemple un rhéogramme qui minimise le débit traité par un appareil très coûteux, ou une consommation d'énergie...

Les deux derniers points de cette démarche sont difficiles à traiter "à la main". Cela nécessite des approximations grossières dans l'évaluation des flux et conduit cependant à des calculs longs et fastidieux. Une consé-

quence est que le nombre de rhéogrammes envisagés est en général très petit par rapport au nombre de possibilités ouvertes.

Un programme d'informatique permettant de simuler la marche de l'unité et de prévoir quantitativement les flux en chaque point de l'unité apporte alors au concepteur de l'installation une aide considérable.

Lorsqu'il s'agit non plus de concevoir une nouvelle installation, mais de modifier une usine existante, le problème se pose de façon notablement différente :

- des données assez détaillées sur la marche actuelle de l'unité sont accessibles, encore que l'absence de capteurs et d'échantillonneurs limite généralement cette disponibilité,
- Les modifications envisagées peuvent concerner soit :
  - . l'alimentation - modification de débit global ou modification qualitative,
  - . le rhéogramme - décision de recycler de façon différente un flux ...
  - . les opérations unitaires - modification du nombre d'appareils en série ou en parallèle, introduction d'appareils de même type mais de dimension différente ou d'appareils totalement différents.

La simulation préalable des modifications peut permettre de les réaliser avec moins de risques, d'envisager des hypothèses plus nombreuses, et de trouver une configuration plus proche de l'optimum.

La figure 1 illustre de façon générale ce que peut éventuellement apporter un programme de simulation d'une usine (ou d'un atelier) de traitement de minerai.

Toute simulation nécessite un modèle de l'installation et la validité des résultats est fonction de l'algorithme de calcul et de la pertinence du choix du modèle. Plusieurs points sont donc importants pour décrire un "simulateur" :

- type d'unité complexe qui peut être simulée,
- nature du modèle de l'installation :
  - . simulation dynamique ou limitée à un état stable,
  - . représentation du rhéogramme et des flux,
  - . modèles des opérations unitaires,
- structure du programme, algorithme de résolution,
- utilisation pratique : entrée des données, présentation des résultats, facilités de transfert du programme.

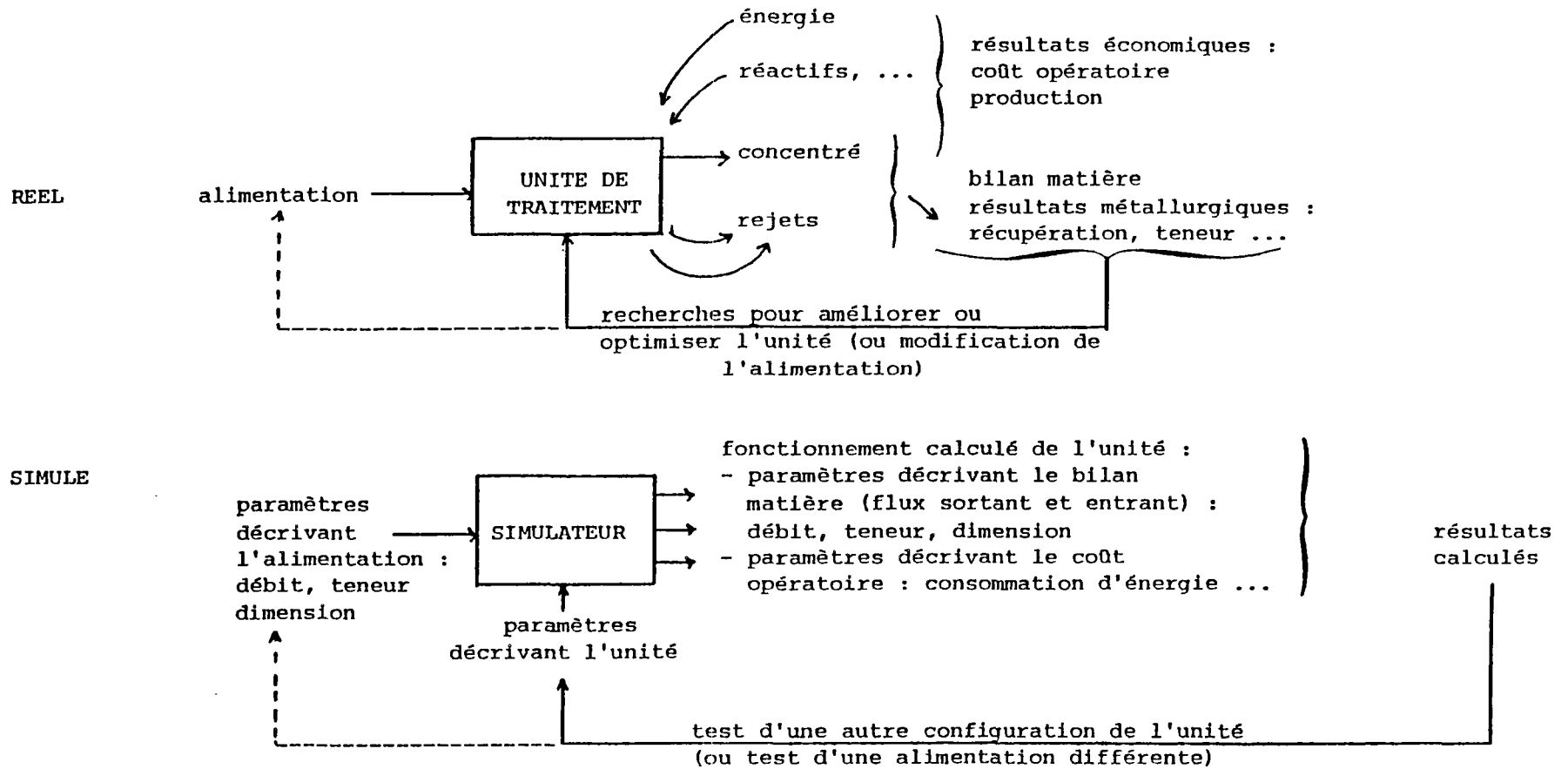


Figure n° 1 - Les fonctions d'un simulateur.

## INSTALLATIONS DONT LA SIMULATION EST POSSIBLE.

Le simulateur du B.R.G.M. peut être utilisé pour n'importe quelle installation complexe de traitement de minerai. Le procédé peut incorporer des opérations unitaires de traitement physique ou chimique :

- partage et addition de flux,
- classification granulométrique,
- séparation liquide-solide : filtration, centrifugation...
- concassage, broyage,
- flottation,
- dans certains cas, autres opérations unitaires de traitement physique,
- réacteurs chimiques : grillage, séchage, lixiviation...

## NATURE DU MODELE DE L'INSTALLATION.

1. Le simulateur ne considère que des unités travaillant à l'équilibre, en régime permanent. Il semble qu'aucun programme de simulation dynamique applicable en minéralurgie ne soit développé dans le monde jusqu'ici.
2. Représentation du rhéogramme.

Un rhéogramme est considéré comme un graphe (au sens mathématique du terme) comportant des noeuds reliés par des arcs.

Le plus souvent :

- Les arcs représentent des flux de matière,
- Les noeuds représentent :
  - . des points de jonction où plusieurs flux se rencontrent (par exemple l'entrée d'un appareil),
  - . des points où un flux se partage en plusieurs flux de composition identique,
  - . des appareils dans lesquels un flux est partagé en plusieurs flux de sortie (classificateurs, appareils de concentration par voie physique...),
  - . des appareils dans lesquels un ou des composants sont transformés en d'autres composants (réacteurs chimiques, concasseurs, broyeurs).

Dans beaucoup de cas cependant, un appareil ne peut pas être représenté convenablement par un module unique. Il est alors représenté par deux modules ou plus, et le graphe comporte des arcs auxquels ne correspondent pas de flux réels.

3. Modélisation des flux de matière.

Chaque flux apparaît comme un ensemble de débits partiels de composants. Dans certaines applications le nombre de composants pris en compte a atteint 60. Les composants peuvent théoriquement être de nature quelconque : eau (liquide, vapeur), espèces minérales, éléments ou espèces chimiques, solvants, réactifs, particules de dimension spécifiée ou possédant une certaine propriété physique...

Pour la simulation de la plupart des procédés chimiques, les composants qui peuvent être considérés sont l'eau, les solvants, les espèces chimiques engagées dans des réactions (réactifs compris), la gangue (désignant les espèces n'intervenant pas directement dans la réaction). Les masses molaires des composants doivent être indiquées comme données. Les résultats peuvent être exprimés sous forme de débits partiels, molaires ou massiques.

Pour la simulation des procédés physiques, il est très souvent utile de considérer comme composant individualisé l'ensemble des particules d'une espèce minérale donnée et d'une tranche granulométrique donnée. En effet, dans la plupart des opérations unitaires physiques d'enrichissement, la probabilité pour qu'une particule soit sélectionnée dépend surtout de sa nature minérale et de sa dimension.

Puisque la programme ne simule que des états d'équilibre stable, la loi de conservation de la matière est respectée pour chaque noeud :

- débits totaux :

$$\sum_{i \in I} \sum_{j=1}^{N_c} F_{ij} = \sum_{i \in O} \sum_{j=1}^{N_c} F_{ij}$$

$F_{ij}$  = débit partiel du composant  $j$  dans le flux  $i$

$N_c$  = nombre de composants du système

$I$  = ensemble des flux entrants pour un noeud

$O$  = ensemble des flux sortants pour un noeud

- débits partiels : certains modules convertissent des composants (modules représentant des broyeurs, réacteurs...).

A l'exception de ceux-ci, les débits partiels sont conservés :

$$\forall j \sum_{i \in I} F_{ij} = \sum_{i \in O} F_{ij}$$

#### MODELISATION DES OPERATIONS UNITAIRES.

La définition de chaque appareil doit permettre le calcul des flux de sortie en fonction des flux d'entrée. Par conséquent, le programme doit incorporer un modèle de l'opération unitaire assurée par l'appareil.

Un tel modèle peut soit être une simple représentation mathématique des valeurs de sortie en fonction des valeurs d'entrée, sans contenu physique, ou au contraire se rapprocher d'un modèle phénoménologique.

Une même opération pourra être représentée par un modèle de l'un ou l'autre type, selon l'objectif de la simulation. Dans sa définition actuelle le simulateur du B.R.G.M. est équipé de modules correspondant aux deux types de modèles.

### 1. Modules correspondant à des modèles du premier groupe.

- . Module d'addition : plusieurs flux sont mélangés, les débits partiels de même nature sont additionnés.
- . Module de partage : un flux est partagé en deux flux de composition identique. Le partage peut être défini soit par le rapport des deux flux soit par le débit d'un des flux.
- . Module de conversion : ce module simule un appareil dans lequel certains constituants sont convertis en d'autres composants ; en pratique réacteur chimique, concasseur ou broyeur. Le même module peut simuler jusqu'à 10 conversions simultanées. Chaque conversion doit être définie par :

- l'avancement de la réaction définie par rapport à un constituant donné,
- les coefficients stoechiométriques.

Cependant l'avancement peut être modifié en cours de calcul par le programme lui-même pour satisfaire une contrainte (au moyen d'un module de contrainte).

- . Module de distribution : il peut être utilisé pour simuler une opération de séparation lorsqu'on ne peut pas ou lorsqu'on ne veut pas utiliser un modèle phénoménologique. Ce module peut alors représenter des opérations aussi diverses qu'une classification granulométrique, une séparation gravimétrique, magnétique ou électrostatique, voire une flottation.

Une loi de distribution doit être spécifiée pour chaque constituant. Quelques lois de distribution applicables sont :

$$\left. \begin{array}{l}
 . F_{2i}/F_{1i} = \text{constante} \\
 . F_{2i} = \text{constante} \\
 . F_{2i}/F_{2k} = \text{constante} \\
 . F_{2i}/F_{1k} = \text{constante}
 \end{array} \right\} \begin{array}{l}
 F_{ij} : \text{débit partiel du constituant} \\
 \quad \quad \quad j \text{ dans le flux } i \\
 \text{le flux } 1 \text{ est entrant} \\
 \text{les flux } 2 \text{ et } 3 \text{ sont sortants}
 \end{array}$$

- . Module de filtration. L'humidité du gâteau et la concentration en solide dans le filtrat doivent être spécifiées. Ce module peut aussi simuler une centrifugation ou un séchage.
- . Module de lavage de gâteau de filtration. Chaque lavage est considéré comme équivalent à une dilution homogène du liquide interstitiel avec le liquide de contre-courant. En prenant en compte la pulpe d'arrivée (solide et liquide), le liquide interstitiel dans le solide épaissi ou filtré, le débit et la teneur du liquide de lavage, la concentration de l'interstitiel final est calculée.

Quatre modules ne représentent pas des éléments physiques de l'installation :

- . Module de boucle de contrôle : c'est un test de convergence qui compare les débits partiels calculés lors de deux itérations successives.

- . Module de contrainte : le procédé peut exiger le maintien constant de certains paramètres (par exemple un rapport de deux constituants à l'entrée d'un réacteur). Un module de contrainte peut modifier le degré d'avancement d'une réaction, ou un paramètre de distribution... dans un autre module pour permettre la satisfaction de la contrainte.
- . Module de contrôle : c'est un module de contrainte qui a la caractéristique d'agir sur une entrée de l'installation.
- . Module d'optimisation : il permet de minimiser une fonction des débits partiels, par modification de paramètres dans d'autres modules.

L'ensemble de modules décrits ci-dessus permet déjà de simuler la plupart des procédés physiques ou chimiques en minéralurgie. Mais toute opération unitaire est représentée par un modèle dans lequel le comportement d'un constituant est indépendant notamment du débit total à l'entrée de l'installation (et des différents appareils). Cette contrainte rend dans le cas général ces modules inadaptés pour la simulation d'une usine existante. En réalité le comportement d'un constituant dans un appareil donné est fortement influencé par le débit à l'entrée de cet appareil. Le degré d'avancement d'une réaction dans un réacteur donné, la récupération et la teneur dans un séparateur gravimétrique ou une cellule de flottation donnée sont très dépendants du débit.

Cependant ces modules sont parfaitement adaptés pour le choix d'un rhéogramme et la conception d'une installation : le programme simule toujours des appareils supposés convenablement dimensionnés. Il calcule les débits d'alimentation de chaque appareil. Bien entendu, ces débits d'alimentation étant connus, il est nécessaire d'utiliser d'autres méthodes pour dimensionner les appareils.

Le B.R.G.M. a employé le programme avec de tels modules pour la prévision de bilans matière pour des sociétés d'Ingénierie et pour des ingénieurs développant de nouveaux procédés. Chaque fois, la simulation a engendré une meilleure compréhension du procédé et/ou des améliorations du rhéogramme et de la rentabilité potentielle.

## 2. Modules correspondant à des modèles du deuxième groupe.

Pour permettre la simulation d'une unité de traitement donnée - avec des appareils donnés - il a été nécessaire d'incorporer dans le simulateur des modules/modèles représentant le comportement de composants dans un appareil et éventuellement des paramètres opératoires.

Une difficulté considérable est l'absence de modèles précis pour les opérations d'enrichissement par voie physique. La plupart des modèles décrits dans la littérature ne sont valides que dans un domaine étroit et (/ou) demandent l'ajustement de nombreux paramètres difficiles, voire impossibles à estimer.

Des modèles de ce groupe ont été incorporés au simulateur pour décrire trois types d'opérations unitaires :

- . modèle de la cellule de flottation,
- . modèles d'hydrocyclone,
- . modèles de broyeur.

Modèle de la cellule de flottation.

Dans sa forme la plus simple, le module de cellule de flottation représente un modèle cinétique de premier ordre, mais une constante cinétique différente est utilisée pour chaque minéral et chaque tranche granulométrique. C'est donc un modèle analogue à ceux utilisés notamment par King (2).

Une amélioration peut être introduite en doublant le nombre des constituants pris en compte, en distinguant pour chaque espèce minérale des particules flottables et des particules non flottables.

Notation :

flux 1 : alimentation (de la cellule)  
flux 2 : mousse  
flux 3 : décharge.

Dans tous les modèles utilisés, on fait l'hypothèse que la cellule est parfaitement agitée et que le flux 3 a la même composition que la pulpe contenue dans la cellule.

$q_i$  : débit d'eau flux  $i$   
 $Q_{ijk}$  : débit partiel du composant  $jk$  (minéral  $k$  dans la tranche granulométrique  $j$ ), associé au flux  $i$   
 $Q$  : débit volumique total :  
$$Q = q_1 + \sum_{jk} \frac{Q_{1jk}}{\rho_{jk}}$$
  
 $K_{jk}$  : constante cinétique pour le composant ( $jk$ ) : par unité de temps la masse du composant ( $jk$ ) flottée dans le flux 2 est la masse de composant ( $jk$ ) dans la cellule multipliée par  $K_{jk}$   
 $N_c$  : nombre de composants solides.

Les équations de conservation de la masse s'écrivent :

$$\left( \begin{array}{l} N_c + 1 \\ \text{équation} \end{array} \right) \begin{array}{l} q_1 = q_2 + q_3 \\ Q_{1jk} = Q_{2jk} + Q_{3jk} \end{array}$$

La loi de cinétique du premier ordre donne :

$$(N_c \text{ équation}) \quad Q_{2jk} = K_{jk} V \frac{Q_{3jk}}{Q}$$

Une relation supplémentaire est nécessaire pour permettre le calcul de  $Q_{2jk}$ . Elle peut prendre l'une des formes suivantes :

$$\left( \begin{array}{l} N_c \\ \sum \\ jK \end{array} \right) \begin{array}{l} Q_{2jk} \end{array} / q_2 = \text{constante, c'est-à-dire pourcentage d'eau dans les mousses constant,}$$

$$q_2 = \text{constante, c'est-à-dire débit d'eau en débordement constant.}$$

Les constantes sont les mêmes pour toutes les cellules du circuit simulé et sont obtenues par régression à partir d'un nombre suffisant d'observations. Dans le cas d'une unité existante, ces observations seraient des échantillonnages et des mesures dans l'atelier de flottation. Si seulement des résultats d'expérience en laboratoire ou à une échelle pilote étaient disponibles, il faudrait mettre en oeuvre une méthodologie d'extrapolation.

Dans le cas où le modèle dans son état actuel se révélerait trop simple pour une application donnée, il serait possible de faire intervenir des paramètres supplémentaires, comme dans les modèles de King (2). Mais l'introduction de paramètres supplémentaires implique la nécessité de disposer d'un plus grand nombre de données pour leur détermination. Il semble cependant que beaucoup d'unités de flottation puissent être décrites raisonnablement par un modèle simple.

#### Modèle de l'hydrocyclone.

De nombreux auteurs ont publié des formules pour prédire les performances des hydrocyclones en fonction de leur géométrie et des conditions de leur alimentation. Le plupart de ces formules ont été obtenues par régression à partir d'un certain nombre de points de fonctionnement (3)(4).

Plusieurs de ces formules ont été testées au B.R.G.M. sur des dizaines de cas de cyclones de diamètres variés, opérant en milieu industriel.

Aucune formule ne permet une prévision convenable des performances effectives d'un cyclone dans le cas où aucune donnée expérimentale relative à ce cyclone n'est disponible. Lorsque des points de fonctionnement réels sont connus, la méthode retenue consiste à utiliser la formulation du modèle de Plitt (5) mais en ajustant des constantes numériques (5). Il semble que ce modèle conduise à des évaluations exploitables à condition de ne pas s'éloigner fondamentalement du point de fonctionnement utilisé pour l'établissement.

Le modèle de Plitt (5) fait une hypothèse sur l'expression analytique de la courbe de partage (probabilité pour une particule d'aller à la sousverse de l'hydrocyclone en fonction du diamètre de la particule) et permet le calcul du  $d_{50}$ , du soutirage  $S$  et d'un paramètre caractérisant la précision de la coupure.

Les paramètres de cette expression sont ajustés automatiquement pour s'accorder avec les résultats des calculs selon la formule de Plitt. Le programme calcule alors à partir de la courbe de partage définie par le modèle pour chaque tranche granulométrique une loi de répartition entre surverse et sousverse.

Ce modèle paraît peu performant pour le calcul du soutirage.

### Modèles de broyeurs à barres et à boulets.

Deux modules ont été construits et incorporés dans le programme de simulation du département Minéralurgie du B.R.G.M. pour représenter un broyeur à barres ou à boulets.

- Un premier module a pour base la distinction classique entre fonctions de broyage et de sélection. La distribution granulométrique à la sortie du broyeur est alors calculée en fonction de la granulométrie d'entrée, du débit global et de la dimension du broyeur par l'intermédiaire du temps de séjour moyen et des matrices de sélection et de broyage. Ces deux matrices sont supposées rendre compte du type de broyeur et des conditions opératoires.

$$(A) = (I - ts (I - B)) (S) (X)$$

- A : distribution granulométrique à l'entrée du broyeur (matrice colonne)  
 X : distribution granulométrique à la sortie du broyeur (matrice colonne)  
 S : matrice de sélection (diagonale)  
 B : matrice de broyage (triangulaire inférieure)  
 ts : temps de séjour moyen dans le broyeur considéré comme un milieu parfaitement agité  $ts = \frac{\text{volume utile}}{\text{débit volumique}}$   
 I : matrice identité

Sans hypothèse restrictive, la détermination des matrices B et S exigerait la connaissance d'un grand nombre de points de fonctionnement. Pour n tranches granulométriques, il faudrait disposer de  $\frac{n(n+1)}{2}$  points de fonctionnement pour déterminer tous les termes non nuls<sup>2</sup> de ces matrices par régression.

Deux hypothèses ont donc été faites, permettant de réduire le nombre de paramètres à trois (m, n, k) :

- le terme  $B_{ij}$  de la matrice de broyage de la forme :

$$B_{ij} = \frac{D_j^m - D_{j-1}^m}{D_i - 1^m}$$

où  $D_l$  est la dimension supérieure des particules de la tranche granulométrique l. Le coefficient m suffit à définir pour une application donnée la matrice B.

Cette hypothèse revient à considérer que les particules issues de la désintégration des particules de la tranche granulométrique i, ont une distribution granulométrique de Gaudin-Schuman : distribution cumulée

$$\left( \frac{x}{D_i - 1} \right)^m$$

- le terme  $S_i$  de la matrice de sélection est de la forme  $S_i = k x^n$ .

- Un autre module pour représenter les broyeurs à barres ou à boulets exploite la méthode de dimensionnement des broyeurs issue des travaux de Bond et publiée (6).

Le "d<sub>g0</sub>" à la sortie du broyeur est calculé en fonction du "D<sub>g0</sub>" à l'entrée, du type du broyeur, des conditions de son utilisation, de son diamètre et de sa largeur internes.

Le module fait une régression sur la distribution granulométrique à l'entrée du broyeur de façon à déterminer la "pente" m de la distribution cumulée de Rosin-Rammler la plus proche

$$W = 1 - \exp - \left( \frac{x}{X_0} \right)^m$$

La distribution granulométrique calculée à la sortie du broyeur est une distribution de Rosin-Rammler, de même "pente" m, et dont le d<sub>g0</sub> est égal à la valeur déterminée.

#### UTILISATION PRATIQUE ET PRINCIPE DE CALCUL.

L'utilisateur du programme de simulation doit traduire le rhéogramme en graphe et numéroter les modules (noeuds) et les flux (arcs). Il doit procéder au choix des modules et de leurs paramètres. Cette analyse initiale faite, il faut communiquer à l'ordinateur les données : numéro des flux d'entrée et de sortie pour chaque module, nature et paramètres de chaque module, débits d'alimentation. La procédure d'acquisition est interactive, les données sont stockées dans des fichiers qui peuvent facilement être réutilisés et/ou modifiés.

La procédure de calcul est itérative. L'exécution du programme suit la structure du graphe définie par la numérotation des modules. Module après module, les flux de sortie sont calculés en fonction des flux d'entrée. Chaque boucle donne lieu à un calcul itératif jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit satisfait : à chaque itération les débits à travers les modules de convergence sont comparés aux débits calculés au cours de l'itération précédente et le critère de convergence est satisfait si la différence relative est inférieure à une grandeur définie par l'utilisateur du programme. La convergence est naturelle et aucune procédure d'accélération n'est mise en oeuvre. Cependant un programme séparé a été développé d'autre part pour renuméroter automatiquement les modules pour minimiser le temps d'unité centrale (CPU), en appliquant la théorie des graphes (7).

Lorsque les critères de convergence sont satisfaits pour tous les modules de contraintes, de contrôle et d'optimisation, les résultats sont imprimés sous forme de tables indiquant par exemple des débits massiques, molaires, partiels et totaux. Une description complète des données est aussi fournie avec les résultats. La sortie peut se faire en français ou en anglais.

## APPLICATIONS.

Deux domaines d'application des programmes de simulation en minéralurgie ont été évoqués en introduction.

Le programme de simulation du B.R.G.M. a été fréquemment utilisé depuis plusieurs années, dans le premier de ces domaines c'est-à-dire dans le cadre du développement de nouveaux procédés, de conception de rhéogrammes, et pour prédire des bilans matières complets, récupération et teneur, à partir d'essais en discontinu ou en usine pilote.

La récupération et la teneur des concentrés sont souvent très dépendantes de quelques boucles de recyclage dont l'influence est pratiquement impossible à prédire sans recours à l'ordinateur.

Quand tous les débits ont été calculés, il est possible de dimensionner les appareils : appareils de séparation mais aussi pompes, tuyaux, convoyeurs ... et de faire des hypothèses sur les consommations d'énergie, les investissements et les coûts opératoires.

La figure 2 donne un exemple de rhéogramme particulièrement simple pour l'étude duquel l'utilisation d'un programme de simulation a été cependant précieuse. Il s'agit d'un procédé d'élimination du chlore par lavages à l'eau douce pour un minerai dont le traitement antérieur s'est fait en eau de mer. Le procédé retenu comporte deux centrifugeuses I et II et n étages de lavage à contre-courant dans des tromels.

Le problème est de déterminer le nombre minimal d'étages de lavage en tromel pour obtenir un concentré final de qualité requise.

Le graphe (schéma de calcul) associé à ce schéma est exposé figure 3. Il fait apparaître les modules de convergence (boucles) liés à chaque étage à contre-courant et des modules d'addition qui ne représentent pas des appareils réels. Les résultats des calculs dont un exemple de présentation est donné figure 4 permettent de déterminer facilement l'influence du nombre d'étages de lavage et de l'humidité après centrifugation sur les consommations d'eau douce et la qualité du concentré final (voir figure 5).

Bien qu'il n'y ait pas eu jusqu'ici d'occasion de procéder à travers la construction et le démarrage d'une usine à une évaluation globale de la méthode, l'aide que peut apporter le programme dans la conception d'un schéma de traitement a été à maintes reprises appréciée, et la simulation doit être considérée comme un outil pour concevoir des schémas de traitement meilleurs, en économisant temps et argent pendant la phase de conception.

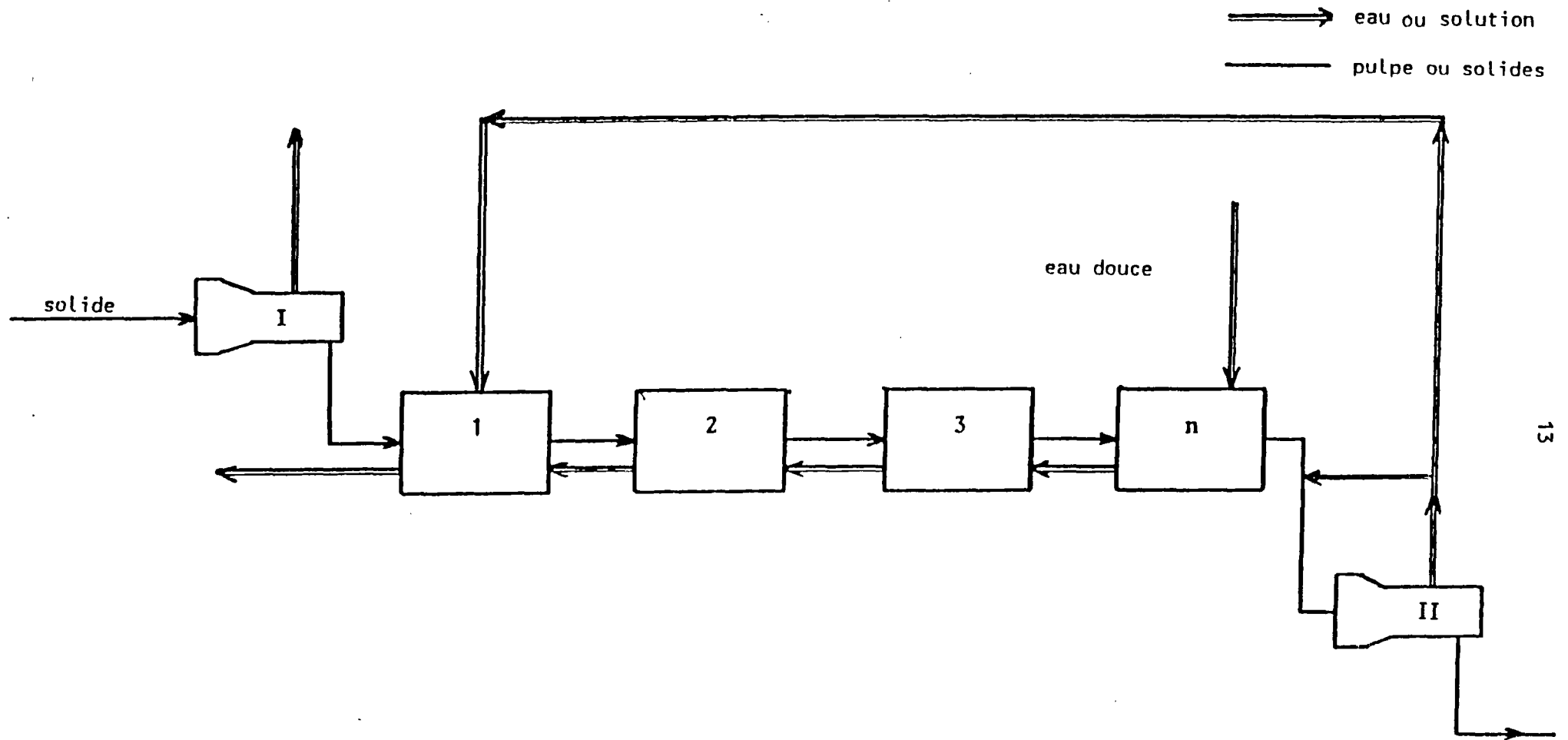


Figure n° 2 - Schéma d'épuration d'un solide, composé de centrifugeuses (I et II) et d'étages de lavage à contre-courant (1, 2, ..n)

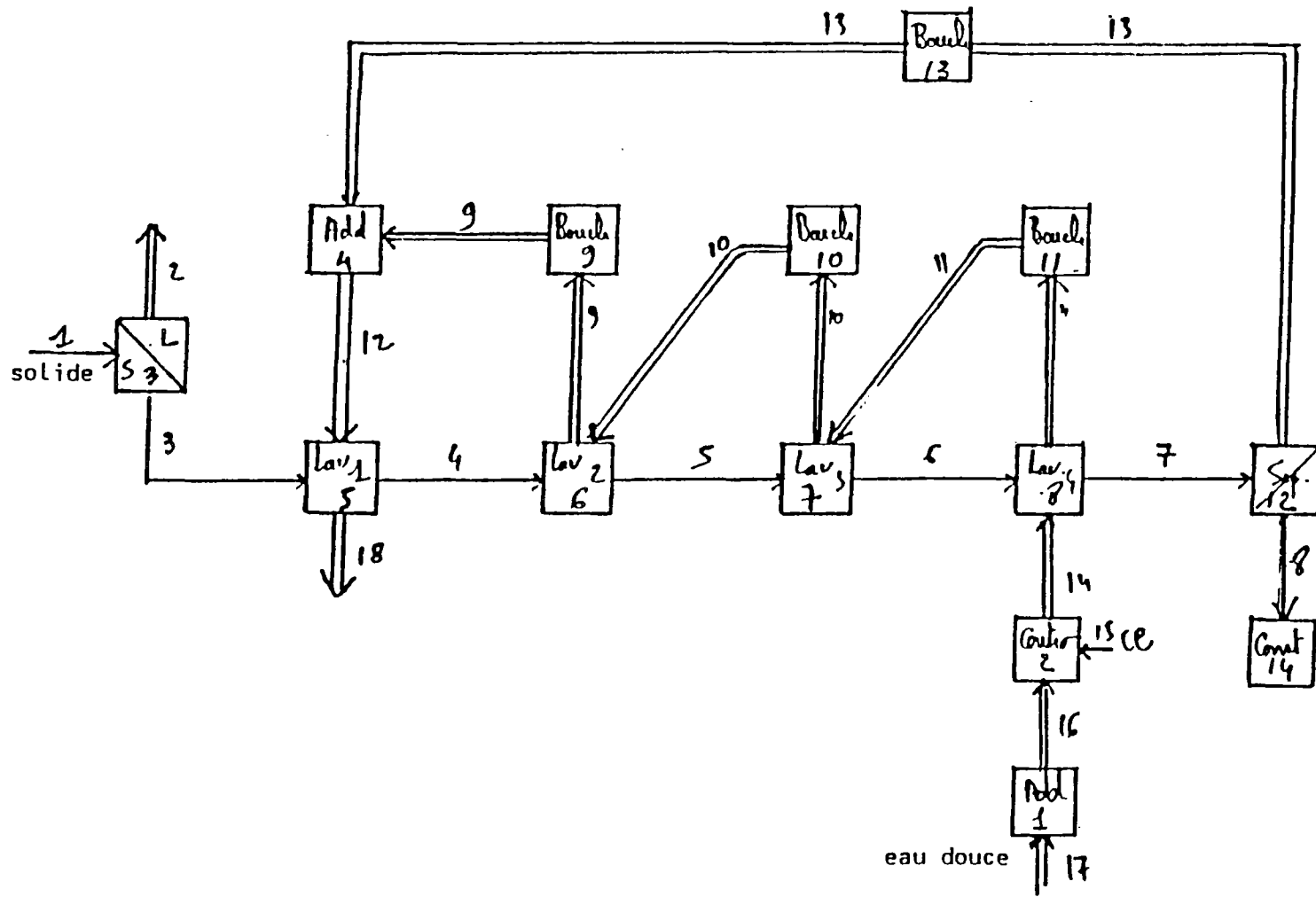


Figure n° 3 - Schéma de calcul correspondant à 4 étages de lavage.

DEBITS MASSIQUES PARTIELS CALCULES APRES CONVERGENCE

C O N S T I T U A N T S		F L U X		N O .							
NO	NOM	KG	KG	KG	KG	KG	KG	KG	KG	KG	KG
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	H2O	99870.00	83899.56	15970.44	21705.96	21777.58	21836.10	21883.91	13594.55	31397.44	31469.06
2	SOLIDE	99981.40	0.00	99981.40	99981.40	99981.40	99981.40	99981.40	99981.40	0.00	0.00
3	CL-LIQ	1930.00	1621.37	308.63	245.26	173.64	115.12	67.31	41.41	181.11	109.49
4	CL-SOL	18.60	0.00	18.60	18.60	18.60	18.60	18.60	18.60	0.00	0.00
DEBIT TOTAL		201800.0	85520.9	116279.1	121951.2	121951.2	121951.2	121951.2	113636.4	31578.5	31578.5
NO	NOM	KG	KG	KG	KG	KG	KG	KG	KG	KG	KG
		11	12	13	14	15	16	17	18		
1	H2O	31527.58	39686.80	8289.36	31575.39	0.00	31575.39	31575.39	33951.28		
2	SOLIDE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
3	CL-LIQ	50.97	206.61	25.50	3.16	3.16	0.00	0.00	269.90		
4	CL-SOL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
DEBIT TOTAL		31578.5	39893.4	8314.9	31578.5	3.2	31575.4	31575.4	34221.3		

15

Figure n° 4 - Sortie du programme. Exemple de présentation.

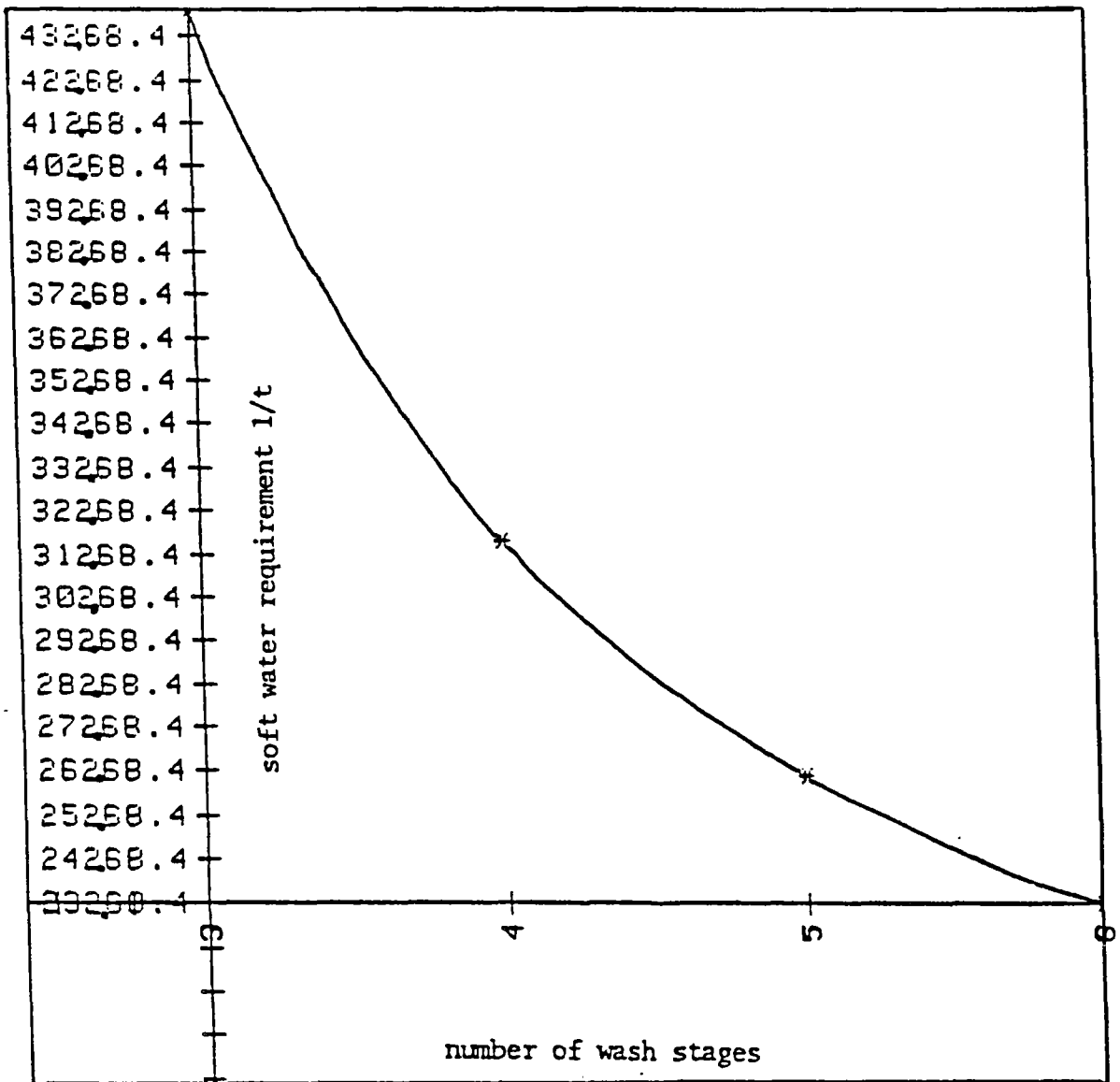


Figure n° 5 - Besoin en eau douce en fonction du nombre d'étages de lavage à contre-courant pour 600 ppm  $\text{Cl}^-$  dans le concentré final.

Un autre groupe d'applications moins développé jusqu'ici, mais pour lequel des travaux en cours d'achèvement devraient déboucher sur une publication ultérieure, consiste à étudier des modifications d'usines de traitement existantes. Dans ce cas il importe de tenir compte des variations des performances des appareils en fonction des caractéristiques de leur alimentation, notamment du débit volumique global qui conditionne le temps de séjour moyen. Pour cela des modèles du second groupe doivent être utilisés.

Une campagne d'échantillonnage et de mesures dans l'usine peut fournir les éléments pour une sélection précise des paramètres des modules.

Le programme est alors très performant pour étudier l'influence de modifications mineures du rhéogramme, comme la création de nouvelles boucles de recyclage, une nouvelle structuration du circuit de flottation, l'introduction de cellules supplémentaires de grande capacité, la modification du débit ou de la teneur du minerai d'entrée.

La simulation apparaît alors un outil puissant pour l'optimisation de l'usine.

#### CONCLUSION.

Dans ce programme les opérations unitaires sont représentées par des modèles de deux groupes. Les modèles du premier groupe sont de simples représentations mathématiques sans signification physique. Ils ne prennent pas en compte la dimension des appareils. Les modèles de ce groupe sont nécessaires pour la conception informatisée de nouvelles usines/nouveaux procédés : la simulation aide à sélectionner un schéma de traitement et à prédire les débits en tous points. Après cette étape de simulation, une autre approche doit être mise en oeuvre pour dimensionner convenablement les appareils et pour calculer investissements et coûts opératoires.

Les modèles du deuxième groupe tiennent compte des contraintes imposées par les caractéristiques, en particulier les dimensions rigides des appareils existants (ou prédéfinis). Ces contraintes rendent en effet pour un appareil donné les performances dépendantes du débit à l'entrée de l'appareil. Ces modèles doivent être utilisés pour la simulation des usines existantes ou déjà définies en détail au niveau du choix des dimensions des appareils.

Comme beaucoup de logiciels, le programme de simulation décrit ici est l'objet d'améliorations fréquentes. Pour l'introduction de nouveaux modules (permettant l'utilisation de nouveaux modèles), la difficulté principale est de sélectionner des modèles et de s'assurer de leur validité au moins dans le domaine où leur utilisation est envisagée.

Le manque en minéralurgie de modèles précis et à domaine d'application suffisamment étendu fait pour l'instant obstacle à la généralisation de l'emploi de "simulateurs".

Des recherches sont envisagées à court terme pour l'amélioration de l'outil existant :

- développement (et amélioration) de modèles d'opérations unitaires,
- vérification de la précision des modèles du second groupe pour des applications dans des usines de traitement existantes,
- renumérotation automatique des noeuds pour diminuer le temps de calcul en unité centrale (CPU). Ce point est important quand des modèles relativement élaborés sont utilisés à l'intérieur de boucles .

## B I B L I O G R A P H I E

- (1) R. BLOISE, C. REINHART, A. MABILLE  
*"Simulation d'unités complexes"*  
Revue de l'Industrie Minérale - Janvier 1983.
- (2) R.P. KING  
*"A pilot plant Investigation of a kinetic model  
for flotation"*  
National Institute for Metallurgie, Johannesburg South Africa  
Report n° 1847, 1976.
- (3) D. BRADLEY  
*"The hydrocyclone"*  
Editeur : Pergamon Press - 1965.
- (4) A.C. APLING, D. MONTALDO, P.A. YOUNG  
*"Hydrocyclone models in an ore grinding collect"*  
Departement of Mining and Mineral Engineering (University  
of Leeds U.K.). International Conference on Hydrocyclone  
Octobre 1980.
- (5) L.R. PLITT  
*"A mathematical model of the hydrocyclone classifier"*  
C.I.M. Bulletin n° 69, décembre 1976.
- (6) C.A. ROWLAND, D.M. KJOS  
*"Rod and Ball mills'"*  
Page 239-278, Mineral Processing Plant Design 1978.
- (7) J. MESTRE  
Thèse en cours - B.R.G.M.
- (8) G.W. CUTTING  
*"Estimation of interlocking mass-balance  
on complex mineral beneficiation plant"*  
Int. J. Mineral processing, vol. 3, 1976, pp. 207-218

(9) G.W. CUTTING

*"Material balances in metallurgical studies :  
current use at Warren Spring Laboratory"*

Paper 79-3, Aime annual meeting, New Orleans, 1979.

(10) G.W. CUTTING, D. WATSON

*"Material flow balances around mineral  
processing plant"*

XIIth international mineral processing congress,  
Sao Paulo, Brazil, 1977, meeting 10, paper 3.

(11) J. RAGOT

*"Contribution à l'extension de la méthode des  
moindres carrés. Application à l'équilibrage  
de bilans industriels."*

Thèse de docteur ès sciences, Université de Nancy, 1980.

(12) J.W. WHITE, R.L. WINSLOW

*"Flowsheet analysis for mass balance calculation  
in over-defined metallurgical systems"*

Paper 79-80, Aime annual meeting, New Orleans, 1979, 11 p.

(13) R.L. WIEGEL

*"Advances in mineral processing material balances"*

Can. Metall. Q., vol. 11, n° 2, 1972, pp. 413-424.

(14) D. LAGUITTON

*"Material balance of mineral processing flowsheets"*

Canmet Sciences Laboratoires, Division Report MRP/MSL  
80-33 (IR), 1980.

(15) R. BLOISE, C. REINHART, J. BATINA

*"Etablissement de bilans-matière statistiquement  
cohérents sur des unités complexes - Présentation  
d'un algorithme de calcul général"*

(16) J.N. PETERSON, C.C. CHEN, L.B. EVANS

*"Computer programs for chemical engineers : 1978"*

Part 3. Chemical Engineering, July 31, 1978.

(17) C.C. CHEN, L.B. EVANS

*"More computer programs for chemical engineers"*

Chemical Engineering, May 21, 1979.

(18) J.M. RICHARDSON, D.R. COLES, J.M. WHITE

*"Flexmet - A computer-aided and flexible  
metallurgical technique for steady-state  
flowsheet analysis"*

EMJ, October 1981.

...

---

ANNEXE 4 : VERS UN SYSTEME DE CONDUITE AUTOMATIQUE INTELLIGENTE  
DES PETITES USINES EN MINERALURGIE

A. BROUSSAUD, J. RAGOT, E. HANTON

Communication présentées au Congrès de la Société de  
l'Industrie Minérale - Douai (juin 1986)

VERS UN SYSTEME DE CONDUITE AUTOMATIQUE INTELLIGENTE

DES PETITES USINES EN MINERALURGIE

\*\*\*

A. BROUSSAUD,\* J. RAGOT,\*\* E. HANTON\*\*\*

\* B.R.G.M. (Bureau de Recherches Géologiques Minières) Département Minéralurgie

\*\* LARA (Laboratoire d'Automatique et de Recherche Appliquée)

\*\*\* L.C.L. (Lafarge Coppee Lavalin)

### Pourquoi automatiser

Les motivations pour automatiser un atelier ou une usine de traitement de minerais sont d'ordre économique. L'automatisation ne doit être envisagée que si des gains de productivité notables sont escomptés. Ces gains de productivité peuvent concerner :

- une réduction des tâches de surveillance des opérateurs et un accroissement des niveaux de sécurité et de fiabilité. Cet aspect peut conduire à une efficacité accrue des opérateurs et à une réduction des risques et des pertes de productivité liés à un entrainement insuffisant du personnel et aux erreurs humaines.
- une stabilisation de la marche de l'installation autour d'un point de fonctionnement raisonnable, pouvant conduire par exemple à une diminution de consommation de réactifs, une amélioration de capacité ou de rendement à qualité de production constante....
- une optimisation du fonctionnement du procédé, les points de consigne étant en permanence déterminés en fonction d'un objectif.
- une optimisation permanente des objectifs techniques en fonction de l'évolution de l'environnement économique.

Pays	Société	Usine	Rentabilité constatée	Réf.
Suède	Boliden	Kristienberg	taux retour annuel 43 %	(14)
Canada	Falconbridge	Lac Dufault	taux retour annuel 100 à 350 %	(25)
Finlande	Outokumpu	Différentes usines	rendement métal : +1,5 à 2,5 % + économie réactifs	(18)(16)
Japon	Mitsui	Komioka	rendement métal : +0,5 % + économie réactifs 20 %	(11)(18)
Canada		Mattagami	taux retour annuel 400 %	(26)
Afr.Sud		Black Mountain	gain rendement de plusieurs %	(27)
France	Talcs de Luzenac	Luzenac	gain rendement de plusieurs %	(23)(24)

**Tableau 1.** Quelques opérations réussies d'automatisation et les rentabilités publiées correspondantes

Si la décision d'automatiser est souvent au départ un acte de foi, car le calcul a priori de l'augmentation de rendement est en général difficile, les rentabilités constatées a posteriori sont impressionnantes notamment dans le domaine des minerais sulfurés de métaux de base, un des plus automatisés (voir tableau 1). Les temps de retour des investissements sont souvent de l'ordre de un à trois ans.

Bien que les réalisations et les publications rencontrées concernent quelquefois des petites unités (1 000 t/jour pour Kristienberg mentionné tableau 1), il est certain qu'actuellement la décision d'automatiser de petites exploitations se heurte à des difficultés diverses :

- L'investissement pour automatiser ne décroît pas proportionnellement avec la capacité des installations. Par contre, le gain potentiel est pratiquement proportionnel à leur capacité.
- L'automatisation correspond à l'entrée dans l'entreprise de technologies qu'elle ne maîtrise pas, ce qui peut poser des problèmes d'exploitation et de maintenance :
  - l'exploitant craint une difficulté d'adaptation du personnel, alors que l'effectif en place est trop réduit pour permettre une longue absence pour formation,
  - la mise en place d'un système sophistiqué nécessite des possibilités de maintenance suffisantes, sur site ou à la rigueur en sous-traitance, en particulier pour les capteurs.

### Quel niveau d'automatisation

Du point de vue de l'exploitant d'une usine, il est possible de distinguer trois niveaux d'automatisation, correspondant à trois niveaux de problèmes pris en charge par le système d'automatisation.

#### **Premier niveau : contrôle séquentiel**

Les séquences de démarrage, d'arrêt et de réaction en cas de pannes locales, les défauts de consommation électrique, de rotation... sont détectés et dans une certaine mesure gérés automatiquement.

Ce niveau d'automatisme requiert la mise en place d'un grand nombre de capteurs et actionneurs logiques classiques et peu coûteux : commandes locales de moteurs, contrôleurs de rotation, détecteurs de position, arrêts d'urgence...etc. Ces capteurs et actionneurs sont reliés à un automate programmable. Le nombre d'entrées/sorties dépasse très vite la centaine pour une unité simple. Le coût d'un tel automatisme est de quelques centaines de milliers de francs par atelier, étude comprise. Ce type de matériel est en pratique d'une très grande fiabilité.

Ce niveau d'automatisation, assez peu coûteux suffit à apporter à l'exploitant un confort considérable et quelquefois un gain en personnel : il suffit de presser un bouton pour démarrer/arrêter un atelier, les risques de détérioration du matériel disparaissent, et ce même si l'atelier cesse d'être surveillé, les pertes de production lors des arrêts/redémarrages sont minimisées...

Cependant, il est rare que l'automatisation se limite strictement à ce niveau et ne soit pas complétée par quelques capteurs analogiques.

Ce premier niveau présente deux limites :

- Toute modification de l'installation demande la reprogrammation de l'automate, ce qui sort généralement de la compétence des exploitants,
- il n'assure aucun contrôle des performances de l'unité. Celle-ci "tourne", mais son bilan métallurgique peut être mauvais. Le procédé reste totalement vulnérable aux perturbations extérieures, en particulier aux variations de débit à l'entrée de l'usine, de dureté ou de composition minéralogique du minerai, de fonctionnement des appareils...

#### **Deuxième niveau : régulation analogique**

Le contrôle automatique permet de maintenir constantes certaines grandeurs importantes pour le fonctionnement de l'atelier qui en l'absence de contrôle évolueraient en permanence. Ceci nécessite des capteurs capables de mesurer automatiquement et en continu ces grandeurs. Ce deuxième niveau doit donc être conçu en fonction des capteurs existants sur le marché. Pour le minéralurgiste les capteurs opérationnels concernent notamment les mesures de débit (solide ou fluide), de densité, de granulométrie dans certains cas, de composition chimique pour les éléments lourds, de pH, de potentiel d'oxydo-réduction, d'humidité et de niveau. Le prix unitaire de ces capteurs est relativement élevé : quelques milliers de francs à quelques centaines de milliers de francs hors montage. Ceci restreint pour les petites usines le nombre de grandeurs effectivement mesurables.

Conceptuellement, le contrôle analogique peut être dissocié du contrôle séquentiel. C'est le cas actuellement de l'usine pilote du B.R.G.M., dans laquelle le B.R.G.M. a installé avec le concours du LARA un circuit de broyage instrumenté et automatisé, mais dont les phases de mise en marche et d'arrêt sont gérées manuellement (7, 17). Industriellement, cependant, cette dissociation serait regrettable.

Dans la mise en place d'une stratégie de contrôle analogique classique, une phase d'étude initiale doit conduire au choix des variables de contrôle et de commande, à partir d'une compréhension simple du procédé. Chaque variable de commande est ensuite liée à une variable de contrôle par une boucle de régulation à une entrée et une sortie, selon une loi incorporant des actions proportionnelles (P), et intégrales (I), quelquefois dérivées (D). Le matériel requis, outre les capteurs et les actionneurs, se compose de régulateurs analogiques PID ou de régulateurs numériques du commerce dont le coût est en pratique faible devant celui des capteurs et de leur installation. L'ajustement des paramètres de chaque boucle peut être atteint par différentes méthodes maîtrisées depuis longtemps par les automaticiens.

Ce deuxième niveau est en pratique le plus répandu dans l'industrie minéralurgique mondiale, en particulier pour le contrôle des circuits de broyage. Dès le milieu des années 70, certaines réalisations performantes ont donné lieu à publications, par exemple Buick Mine (19) aux Etats Unis.

Il faut aussi signaler la place de la stratégie de contrôle "**feed forward**" dans l'usine de flottation (18) : le débit des réactifs est commandé en fonction de la composition du minerai à l'entrée de l'usine, en utilisant un modèle prédictif. Cette approche est industriellement répandue, et elle présente quelques avantages par rapport à la stratégie "feed back" qui permet la commande du débit de réactif asservie à la qualité du concentré ou du stérile.

### Troisième niveau : contrôle numérique

La stratégie de régulation analogique classique ne répond que partiellement aux besoins industriels réels qui bien souvent ne se formulent pas en termes de marche constante, mais plutôt de production maximum en restant compatible avec une qualité de produit constante (par exemple une granulométrie constante à la sortie du circuit de broyage), voire en termes économiques : rechercher en permanence la plus grande rentabilité en s'adaptant aux variations du minerai... et du marché. Ceci conduit à concevoir des points de consigne non pas constants, mais régulièrement recalculés par un ordinateur qui supervise les boucles de régulation. Les boucles de régulation s'avèrent alors vite insuffisantes : des interactions indésirables entre les différentes boucles apparaissent.

Sur le plan de l'automatique pure, cette limitation est à l'origine des stratégies de contrôle multivariables, dans lesquelles les variables de sortie ne sont plus reliées individuellement aux variables de commande. L'ensemble des variables de sortie est relié à l'ensemble des variables d'entrée par une relation matricielle. La mise en oeuvre d'une telle stratégie nécessite une connaissance expérimentale très approfondie du circuit (pas nécessairement une compréhension) pour en déterminer au mieux la matrice de transfert.

Plusieurs stratégies de contrôle multivariable(10) sont appliquées industriellement :

- \* Le **découplage des variables** : on réalise des boucles indépendantes qui portent non plus sur les variables initiales mais sur des combinaisons linéaires de ces variables, choisies de façon à justifier l'indépendance des boucles.
- \* La **commande optimale** : les performances du circuit sont mesurées par une fonction objectif calculée en ligne. Le calculateur détermine alors continuellement la politique de contrôle qui permet de maximiser cette fonction.
- \* Le **filtrage** : cette technique complémentaire de l'une ou l'autre des stratégies précédentes permet d'utiliser des signaux provenant des capteurs même très bruités. Parmi les algorithmes de filtrage, celui de Kalman est très performant. Il produit des estimateurs des grandeurs réelles du procédé à partir d'un modèle de procédé et des mesures bruitées.

\* **L'identification en ligne** : pour des procédés évoluant dans le temps, il est nécessaire de réactualiser en ligne les paramètres de leurs modèles. L'identification peut porter sur les termes d'une matrice de transfert, sur les paramètres d'un modèle utilisé dans un algorithme de filtrage,...(28).

### La supervision par ordinateur

Le troisième niveau que nous avons appelé le contrôle numérique nécessite impérativement une **supervision par ordinateur**. L'ordinateur est en effet indispensable pour la mise en oeuvre d'algorithmes de régulation complexes.

Plus généralement, la supervision par ordinateur peut aussi s'envisager pour des automatismes des deux premiers niveaux. En effet l'ordinateur peut apporter à l'exploitant deux éléments de confort considérables et en partie indépendants de la stratégie de l'automaticien :

- une facilité de **dialogue entre l'homme et le procédé**, pour la conduite de l'usine en marche normale, mais aussi pour reconfigurer le système sans recours à un spécialiste extérieur.

Ce dialogue s'établit typiquement à travers un écran graphique couleur, un clavier et une imprimante. L'écran remplace avantageusement le synoptique traditionnel. Des schémas différents correspondant à des niveaux de détail différents sur la marche de l'atelier se succèdent au gré des opérateurs qui disposent ainsi potentiellement de beaucoup plus d'informations visualisables, sans être submergés par une forêt de cadrans et d'enregistreurs.

Le clavier permet à l'opérateur de gérer la visualisation des informations, et de passer des commandes au système de conduite : modification de points de consigne, réglages divers, entrée manuelle d'informations. Le même clavier peut être utilisé par l'ingénieur pour reconfigurer en partie ou en totalité le système.

L'imprimante écrit en clair les événements marquants : arrêts, défaillances, modifications... Elle peut aussi être utilisée pour restituer a posteriori de l'information stockée ou traitée.

- **Le traitement de l'information**. L'ordinateur dispose de toutes les informations transmises par les capteurs d'une part, et les actions des opérateurs d'autre part. Il est capable de stocker tout ou partie de cette information dans des mémoires de masse : disques durs pour le court terme, bandes magnétiques ou autre pour le long terme. Cette information peut aussi être complétée si besoin est par des données entrées au clavier.

D'ores et déjà, cette information est utilisée, mais trop souvent de façon limitée à :

- la restitution automatique des documents sur papier que les exploitants ont l'habitude de manipuler pour rendre compte d'une période de marche : rapports journaliers, mensuels...

- l'archivage de quantités considérables de chiffres qui ne sont bien souvent pas interprétés ni utilisés.

Dans certains cas, cependant, l'organe de supervision est déjà utilisé pour déterminer des régimes de marche en fonction de considérations économiques actualisées régulièrement (27).

### Un système adapté aux petites usines minéralurgiques

Les auteurs se sont regroupés pour définir et réaliser ensemble un système de conduite automatique spécifiquement adapté aux problèmes des petites usines minéralurgiques. Ils bénéficient pour le démarrage de cette opération d'une aide du Ministère de la Recherche et de la Technologie.

- Une première caractéristique d'un tel système est qu'il doit être **peu coûteux**, notamment par rapport aux produits actuellement commercialisés supportés par mini-ordinateurs et pour lesquels l'investissement minimum est de l'ordre de 3 millions de francs. Ceci implique :
  - au niveau **matériel**, le choix de supports simples : **automates programmables**, supervisés par un **micro-ordinateur** très courant compatible PC,
  - au niveau **logiciel**, une modularité et une configurabilité complète, de façon à ce que le logiciel soit réutilisable sans modification de structure d'une installation à une autre.

Ces choix conduisent à un système dont le coût, hors capteurs et montage, mais matériel de contrôle et logiciel compris, serait de l'ordre de 600 KF. Les figures 1 et 2 montrent l'architecture d'une telle configuration.

- Le système ne doit **pas être totalement dépendant des capteurs** et de leur fiabilité, qui constituent le maillon délicat de l'automatisme. D'une part, il doit accepter l'entrée au clavier d'informations qui n'ont pas pu être mesurées automatiquement, soit parce que le capteur correspondant n'a pas pu être installé, soit parce qu'il est défaillant.
 

D'autre part, il incorpore **différents logiciels de traitement de l'information**, en ligne, permettant une véritable interprétation du procédé. Ce sont ces logiciels qui constituent l'"intelligence" du système, lui permettent de vérifier la vraisemblance des informations qui lui sont communiquées, de diagnostiquer et dans une certaine mesure de compenser des anomalies de fonctionnement, de rechercher en permanence des réglages optimisés.

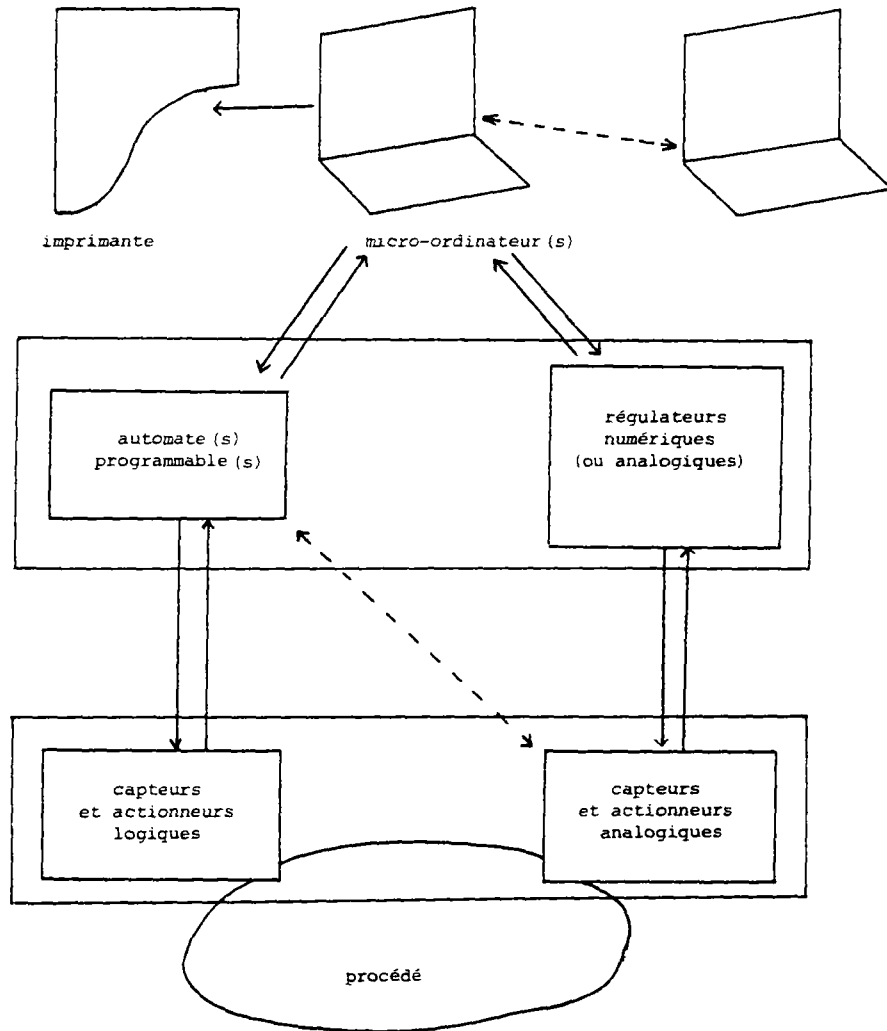


FIGURE 1. Architecture matérielle du système de conduite automatique de petites usines minéralurgiques.

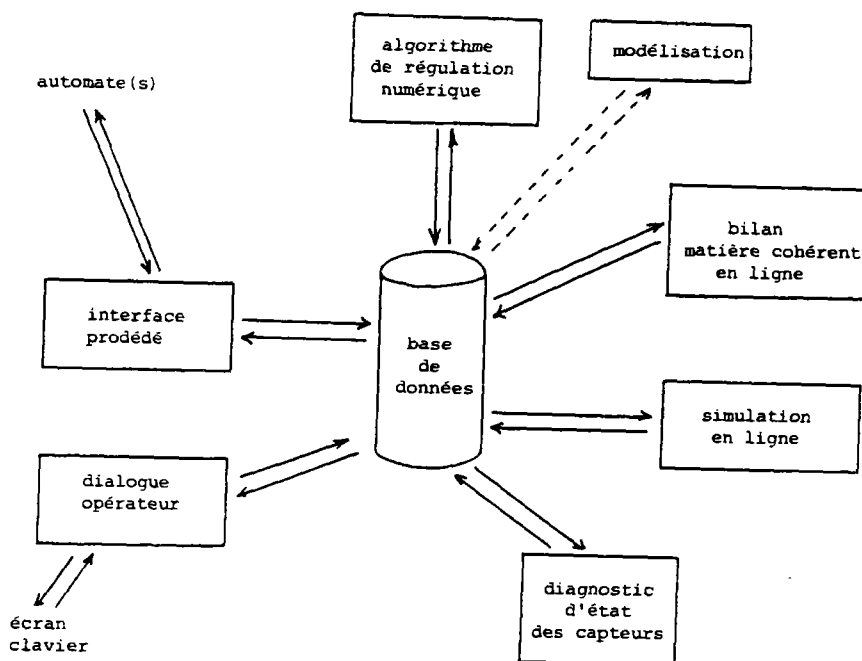


FIGURE 2. Architecture logicielle du système de conduite automatique de petites usines minéralurgiques : une base de données commune et une conception totalement modulaire.

## Un logiciel de conception modulaire assorti d'un dialogue homme procédé facile et efficace

Le logiciel mis en oeuvre est dérivé du logiciel LCAIII de contrôle et de conduite utilisé dans la quasi totalité des cimenteries LAFARGE en France.

La grande souplesse d'emploi de ce logiciel réside dans sa conception modulaire assortie à un dialogue opérateur confortable. L'utilisation d'un tel outil ne fait aucunement appel à des notions d'informatique. Le profil type de l'utilisateur d'un tel système est celui d'un technicien ayant de bonnes connaissances du procédé à mettre en oeuvre assortie de quelques connaissances dans le domaine des automatismes ; toutefois l'utilisation de l'écran-clavier en tant qu'outil de dialogue devra être admis. L'outil logiciel présenté réalise l'interface entre l'homme et les programmes purement informatiques. Sa grande adaptabilité du fait de sa facilité à être configuré le positionne favorablement pour toutes les installations de petite et moyenne envergure.

Le coeur du logiciel est une **base de données** (voir figure 2) qui contient en permanence les informations issues du procédé ou destinées au procédé. Cette base de données est partagée par des modules logiciels, indépendants et complémentaires. Cette architecture est ouverte à l'incorporation de nouveaux modules.

Les modules sont indépendants de l'application : le système est **configurable**, c'est-à-dire que toutes les caractéristiques spécifiques d'une application peuvent être introduites et prises en compte sans réécriture ni compilation de programmes.

Les modules logiciels se décomposent en trois groupes majeurs :

- le module de constitution et de gestion de la base de données,
- des modules de dialogue homme-procédé dans lesquels les informations sont manipulées mais ne donnent pas lieu à des calculs élaborés,
- des modules de calcul et analyse de l'information, qui constituent l'"intelligence" du système.

### Module de constitution et gestion de la base de données

Ce module complètement transparent pour l'opérateur constitue le coeur de l'application. C'est au sein de ce module que tous les paramètres du process (aussi bien logiques qu'analogiques ou paramètres intermédiaires internes) sont ordonnés et stockés dans une forme telle qu'ils soient vus et accessibles par tous les autres modules opérationnels du système.

Les fonctions essentielles de ce module sont :

- la lecture et l'écriture des variables logiques dans les tables des automates,
- la lecture et l'écriture des variables analogiques dans les interfaces des régulateurs,

- l'ordonnancement de l'ensemble des variables en fonction de leurs attributions et classes,
- la mise à disposition des variables pour les autres modules en fonction des besoins configurés lors de la mise en application.

S'agissant d'un outil de grande souplesse et complètement versatile, ce module est lui-même assorti d'un module dit "de configuration". Il s'agit d'un dialogue-opérateur caractérisant chaque variable devant être reconnue par le système. Le passage par ce dialogue constitue l'opération préalable à toute mise en application. Pour des raisons de souplesse évidente, il reste toujours accessible en cours d'exploitation de l'outil, permettant ainsi de :

- modifier des caractéristiques de variables,
- supprimer d'anciennes variables devenues inutiles,
- ajouter de nouvelles variables dans le cas d'extension du système par exemple.

Le dialogue de configuration bien que très explicite, n'est accessible qu'au personnel habilité ; ainsi l'opérateur normal du système peut ne pas être habilité à modifier la configuration du système.

Les limites physiques de la base de données dépendent essentiellement des tailles de mémoire vive et de mémoire de masse mises en jeu ainsi que des temps d'accès et temps de réponse requis pour l'application. Une valeur indicative typique du nombre de paramètres pris en compte sur un système à base d'ordinateur de type PC sera le millier d'informations.

### Modules de dialogue homme-procédé

#### **Interpréteur graphique**

Ce module très important concerne l'accès à la console graphique couleur et se décompose en deux fonctions : une partie statique (construction de synoptique) et une partie dynamique (rafraîchissement de valeurs logiques et continues).

- La construction de synoptiques s'effectue au moyen de l'organe de désignation retenu pour la configuration (souris, flèche du clavier,...) par dialogue conversationnel. Sur la visu couleur, l'opérateur dispose d'une barre de menu synthétique. A chaque désignation d'item est affectée une opération relative à la construction du synoptique :
  - choix de la couleur de fond,
  - choix de la couleur d'impression,
  - choix de mode de travail (mode caractère, mode vecteur ou mode pseudovecteur),
  - choix du trait (horizontal, vertical, oblique),
  - choix de l'épaisseur de trait,
  - effacement d'un caractère ou d'un vecteur,
  - déplacement du curseur dans les 4 directions en petite ou grande vitesse...

La dernière ligne de l'écran est réservée aux questions posées par le système dans certains cas, ou aux informations délivrées à l'opérateur pour poursuivre la construction de son schéma.

- L'opérateur peut à tout moment sauver sur disque l'image qu'il a sous les yeux dans l'état où elle se trouve, et il pourra ensuite à n'importe quel moment la reprendre pour la compléter ou la modifier.

Une cinquantaine de pages peuvent ainsi être constituées et, par des "effets de loupe", l'opérateur peut passer des pages générales de conduite, aux pages sur lesquelles sont représentés les détails spécifiques à chaque appareil.

- Un synoptique une fois tracé, l'opérateur dispose d'une image fixe. Il convient alors de lui adjoindre la partie visualisation des points de mesure, points de consigne, états logiques... Un dialogue spécial permet alors de positionner sur l'écran toutes les grandeurs logiques ou analogiques désirées. Il suffit de positionner le curseur à l'endroit voulu sur l'écran, de sélectionner la fonction choisie, et de rendre au clavier le nom de la variable logique ou analogique concernée. Le nom de ces variables est dans chaque cas le code utilisé par l'opérateur dans la configuration de la base de données. En d'autres termes, une variable donnée est repérée par un code unique, et ce, quelque soit l'endroit du système où elle est utilisée.

\* Les variables logiques visualisées correspondent :

- soit à des entrées physiques raccordées aux automates (réponses de fins de course, niveaux logiques, commutateurs ou boutons-presseurs...),
- soit à des variables logiques plus globales issues de la programmation des automates (réponses de bon fonctionnement d'un moteur, résultat d'une équation booléenne...),
- soit à des variables logiques de communication dont l'état est modifiable par l'opérateur.

A ces variables, il est possible d'associer :

- un symbole : l'opérateur doit alors préciser pour chaque variable logique, la nature du symbole, cette symbolisation est conservée pour l'ensemble des pages, et est propre à chaque application,
- un vecteur dynamique : l'opérateur doit alors préciser la couleur désirée de ce vecteur sur l'état "1" de la variable logique (l'état "0" étant toujours blanc),
- un texte dynamique : l'opérateur doit alors préciser, outre le texte lui-même, sa couleur d'impression et sa nature (simple ou double hauteur, écriture horizontale, verticale ou oblique...).

\* Les variables continues visualisées correspondent :

- soit à des entrées physiques raccordées sur les automates ou régulateurs : réponses de capteurs continus (débits, densités, niveaux, humidités...)
- soit à des variables analogiques intermédiaires issues de calculs de régulation ou de traitements intermédiaires,
- soit à des variables analogiques de communication, dont la valeur est modifiable par l'opérateur.

Ces variables peuvent être représentées sous deux formes :

- sous forme numérique : les valeurs sont alors accompagnées de leur unité, et un code couleur particulier est à définir pour chaque variable. En cas de dépassement de seuil haut ou bas, la valeur clignote sur l'écran,
- sous forme analogique : au moyen de bargraphs verticaux. L'opérateur doit alors préciser pour chaque cas, la plage qu'il désire visualiser et positionner ses extrémités.

Pour l'ensemble des variables rafraichies, tout changement d'état d'une variable logique, et toute variation significative d'une variable continue sont reportés sur l'écran couleur, le rafraichissement étant effectué au moment de la transition de la variable logique ou de la variation de la variable continue.

\* En plus de l'affichage de valeurs sur l'écran, il existe des zones de désignation interactives au moyen desquelles l'opérateur peut modifier en ligne des valeurs continues ou des états logiques. Cette procédure est utilisée :

- pour basculer en automatique une régulation,
- pour démarrer à distance un sous-ensemble,
- pour effectuer un choix logique,
- pour modifier un point de consigne.

Il faut alors préciser à la construction de la page, les variables qui doivent être modifiables par l'opérateur, et définir pour chacune des codes de couleurs spécifiques à l'application.

Toutes les modifications effectuées sur les valeurs logiques ou continues sont consignées au journal de bord, avec dans chaque cas :

- le code opérateur de la variable modifiée,
- l'ancienne valeur,
- la nouvelle valeur,
- l'heure de la modification.

### **Data loggings**

L'opérateur peut demander l'impression sur imprimante et/ou la visualisation sur console, de loggings périodiques. La fréquence de rafraichissement du logging, ainsi que la liste des valeurs à éditer, sont laissées à la discrétion de l'opérateur.

### Signalisation des défauts

Les défauts sont élaborés au niveau des automates, des régulateurs, ou encore détectés par le programme de supervision à partir des éléments de la base de données.

Tout défaut apparaissant est imprimé au journal de bord (le libellé du défaut est à la discrétion de l'opérateur) avec ses repères horaires d'apparition ou de disparition.

Tout défaut apparaissant sur l'imprimante a son équivalence sur les pages de visu couleur. Un symbole précis vient s'afficher en lieu et temps voulu, ou toute apparition de défaut provoquera l'affichage d'une page donnée liée à ce défaut.

### Tracé de courbes en temps réel

Il peut s'effectuer sur écran graphique (4 courbes par page) ou sur table traçante selon la configuration. Toutes les caractéristiques du tracé (échantillonnage, largeur de l'échelle, couleur...) sont laissées à la discrétion de l'opérateur.

### Historique

Deux fichiers d'historiques sont disponibles au niveau du système, permettant la restitution, en temps différé, d'évènements survenus sur le procédé.

- Un historique "court-terme" sur lequel sont conservées en "enregistrement glissant", toutes les variations significatives de l'ensemble des variables continues, physiques ou calculées.
- Un historique "long-terme" sur lequel sont conservés en "enregistrement glissant" 7 jours de mesures moyennées sur 1/2 heure de l'ensemble des mesures physiques.

Pour toutes ces restitutions d'historiques, les début et fin de restitution, la cadence d'échantillonnage dans les fichiers, les couleurs de restitution... sont laissées à la discrétion des opérateurs.

### Edition de documents

Un interpréteur de tableaux permet la construction et l'édition de documents (bilans...) propres à l'application spécifique. La construction de ces documents s'effectue en mode conversationnel et en ligne à la manière d'un "tableur". Elle comporte les phases suivantes :

- création d'une trame donnant une forme et les relations entre zones,
- création d'une banque de données définissant les variables de la base de données intervenant dans les tableaux,

- remplissage du tableau,
- édition du document par définition de sa périodicité ou de l'évènement déclanchant son édition.

### **Archivage automatique**

Il concerne le stockage et la restitution sur imprimante de toutes les données process de l'installation. Cet archivage permet d'avoir à tout moment une configuration à jour relative à l'installation et au process.

### **Modules de calcul et d'analyse de l'information : l'intelligence du système**

#### **Bilans matière cohérents en ligne**

Depuis plusieurs années le B.R.G.M. et le LARA se sont penchés séparément et ont développé des logiciels sur le problème de l'établissement de bilans matière cohérents utilisant simultanément des informations en général redondantes mais incohérentes, sur les débits et compositions de matière dans une usine minéralurgique (2, 21).

Le B.R.G.M. dispose maintenant d'un logiciel baptisé BILCO, disponible commercialement avec une version pour micro-ordinateurs compatibles PC et une version pour mini-ordinateur VAX. Ce logiciel permet d'établir des bilans matières cohérents détaillés pour des unités de flowsheet quelconque fonctionnant à l'équilibre : il calcule des estimateurs des débits et compositions de tous les flux du flowsheet, qui satisfont les équations de conservation de la matière en tous points du circuit et qui sont aussi proches que possible des débits et compositions mesurés, au sens des moindres carrés pondérés en fonction de la précision de chaque mesure.

BILCO est un outil puissant pour l'interprétation de données expérimentales incohérentes. Il permet de développer une image nette d'un atelier en marche équilibrée, et de détecter dans un ensemble d'informations redondantes celles qui sont le plus vraisemblablement erronées. Il est utilisé systématiquement au B.R.G.M. pour l'interprétation des essais en usine pilote.

Dans sa version batch, BILCO permet une entrée des données au clavier interactive et confortable, avec droit à l'erreur (figure 3). Il est donc utilisable facilement par des personnes n'ayant aucune connaissance en informatique ni en mathématique.

**BILCO peut aussi être utilisé en ligne.** Les données utilisables sont des débits, éventuellement des compositions (humidité, ou % solide, ou proportion de particules de dimension supérieure à une maille donnée, ou composition chimique...), mesurés par des capteurs et/ou manuellement. BILCO peut alors :

- vérifier la cohérence de ces mesures,
- afficher en permanence un bilan matière en ligne de l'installation en marche,
- détecter des indications erronées de capteurs et les signaler, leur substituer éventuellement des valeurs numériques plus vraisemblables.

BILAN MATIERE COHERENT			logiciel BRGM	
	ENTRÉE	PROD.	ENTRÉE	PROD.
	CaO	SiO <sub>2</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>
1 1	245.000	22.500	51.500	2.300
1 0	40.350	11.300	53.000	1.650
1 2	210.000	27.000	51.000	2.200
2 0	12.530	19.600	51.000	1.750
2 3	205.000	28.000	51.000	2.300
3 0	12.090	12.000	52.400	1.000
3 4	190.000	29.500	51.000	2.300
4 3	11.070	18.100	52.100	1.650

FIGURE 3. Photographie d'une page-écran interactive d'acquisition de données du logiciel BILCO.

### Simulation statique/optimisation en ligne

Le B.R.G.M. a développé depuis plusieurs années un savoir-faire en modélisation/simulation d'usines de traitement physique des minerais (3, 4, 5, 6). Les logiciels utilisés pour cette activités ont été développés au B.R.G.M. et à l'étranger (Australie, Afrique du Sud, Canada).

La méthodologie employée consiste à sélectionner pour chacune des opérations unitaires du procédé, un **modèle**, issu en général d'une compréhension au moins partielle des phénomènes physiques, capable de calculer les caractéristiques des flux de matière (débit, granulométrie, teneur...) à la sortie de l'opération unitaire en fonction des flux de matière à l'entrée et des réglages des appareils. La mise en oeuvre simultanée de ces modèles dans un logiciel de simulation (**simulateur**) permet de **prévoir les variations des flux de matière en tous points** d'un atelier ou d'une usine en fonction des variations de débit d'alimentation, de granulométrie ou de composition, mais aussi en fonction de modifications de certains réglages (masse de corps broyants, buses des cyclones...) et bien sûr en fonction de modifications de flowsheet ou de dimension des appareils. Cette approche ne doit pas être confondue avec la modélisation statistique qui sera évoquée plus loin.

Une expérience pratique des modèles des opérations unitaires, de leurs domaines de validité et de leurs limites, a été acquise à travers plusieurs applications industrielles. Le savoir-faire développé a jusqu'ici été surtout tourné vers la conception d'installations neuves et l'optimisation de flowsheets d'installations existantes.

Cependant il est possible de réaliser ce type de simulation en temps réel. L'information produite peut être utilisée à deux niveaux :

- le bilan prévisionnel issu de la simulation. Contrairement à celui évoqué plus haut il n'est pas issu d'informations redondantes, mais d'une information sur l'alimentation de l'usine et d'un modèle de l'usine. Il est donc issu d'une approche complètement différente. Il peut cependant lui aussi être utilisé pour :
  - afficher un bilan matière en ligne,
  - détecter/corriger des indications erronées de capteurs.
- la simulation en ligne peut être utilisée pour **proposer aux opérateurs** (voire à l'algorithme de conduite automatique) des **réglages différents** de l'installation.

### **Modélisation statistique du procédé**

Les informations collectables sur le procédé sont en général nombreuses et de natures différentes (grandeurs logiques, numériques, analogiques, informations qualitatives...). Leur exploitation passe par un effort de normalisation et de contraction ; pratiquement des transformations mathématiques (20) codifient toutes les informations dans un système cohérent de représentation, puis il est possible de chercher à les analyser pour élaborer des modèles statistiques de type "boîte noire" qui traduisent aussi fidèlement que possible le comportement global du procédé. Plusieurs phases sont nécessaires à l'élaboration de tels modèles :

- La phase de **modélisation** consiste à faire choix de structure mathématique (équations différentielles, intégrales de convolution, équations aux dérivées partielles..) adéquate à représenter le comportement physique du procédé.
- La phase d'**indentification** complète la phase de modélisation. En effet un modèle comporte toujours des paramètres dont il faut estimer les valeurs numériques ; les techniques d'identification permettent cette estimation (28). Selon la structure du modèle, selon le nombre de paramètres l'utilisateur devra choisir la méthode d'identification la plus appropriée. Citons les méthodes graphiques qui exploitent les particularités des réponses indicielles et impulsionnelles des procédés ; elles présentent l'avantage d'être rapides de mise en oeuvre. Les méthodes numériques sont plus générales mais nécessitent l'emploi de calculateurs ; elles relèvent la plupart du temps du domaine statistique : méthode du *maximum* de vraisemblance, corrélation multiple, analyse factorielle, régressions multilinéaires... (1, 24).
- La troisième et dernière phase est la **validation**. L'identification des paramètres d'un modèle est effectuée à partir de données particulières qui proviennent de campagnes de mesure effectuées sur le site (23). Lorsque le modèle est parfaitement défini il faut en tester l'adéquation par rapport au procédé physique. On procède en général par comparaison directe : le modèle et le procédé sont sollicités par les mêmes signaux d'entrée et on compare leurs sorties. Tout écart significatif de comportement doit être rigoureusement analysé et éventuellement doit engendrer des modifications de la structure du modèle et de ses paramètres.

## Diagnostic des procédés

Les trois types de logiciel mentionnés ci-avant, lorsqu'ils sont utilisés en ligne, peuvent d'intégrer dans une stratégie de diagnostic des procédés en temps réel, sujet d'étude du LARA depuis plusieurs années.

Un procédé est caractérisé par un ensemble de variables d'état, de variables de sortie et de variables de commande. Traditionnellement l'opérateur dispose dans une salle de contrôle d'une image de l'ensemble ou d'une partie de ces variables ; cette connaissance, correctement interprétée, doit permettre le contrôle et la conduite du procédé.

A un niveau élémentaire de conduite, l'opérateur a pour tâche essentielle de déterminer si le procédé est dans une situation normale ou non. Cette notion de normalité, très subjective, est liée à la définition du point nominal de fonctionnement prédéfini par le spécialiste du procédé. Si le procédé est jugé être dans son état normal aucune action ne sera entreprise ; par contre tout écart à cette référence normale devra être réduit en ajustant "au mieux" les différentes grandeurs de commande.

A un niveau supérieur de conduite on essaye de remettre en cause la définition du point normal de fonctionnement ; l'opérateur ou un système automatique recherche par ajustements successifs l'état normal optimal au sens d'un critère économique.

Quel que soit le niveau de conduite il est nécessaire d'avoir en permanence une image du fonctionnement du procédé : c'est l'**opération de diagnostic**. Notons que le diagnostic de l'état s'applique :

- au procédé physique lui-même (un atelier de broyage par exemple),
- à un actionneur (une pompe, un moteur par exemple),
- à une chaîne de mesure,
- à un dispositif de contrôle (un automate, un calculateur).

Pratiquement ce sont les variations de l'état que l'on observe ; lorsque les relations entre différentes grandeurs se modifient il y a détérioration du procédé ou encore panne (24).

Les pannes elles-mêmes sont très variées ; elles peuvent être :

- naissantes,
- passagères,
- permanentes,
- catastrophiques.

Leur caractérisation comporte plusieurs étapes :

la **détection** qui consiste à repérer la transition d'un état normal à un état anormal, le **diagnostic** qui cherche à déterminer le type de la panne et son appartenance à une classe prédéterminée, le **pronostic** qui tend à prévoir l'évolution de la panne et plus généralement l'évolution du procédé, et enfin la **décision** qui doit définir l'action à entreprendre pour éventuellement réduire ou corriger la panne et ses effets.

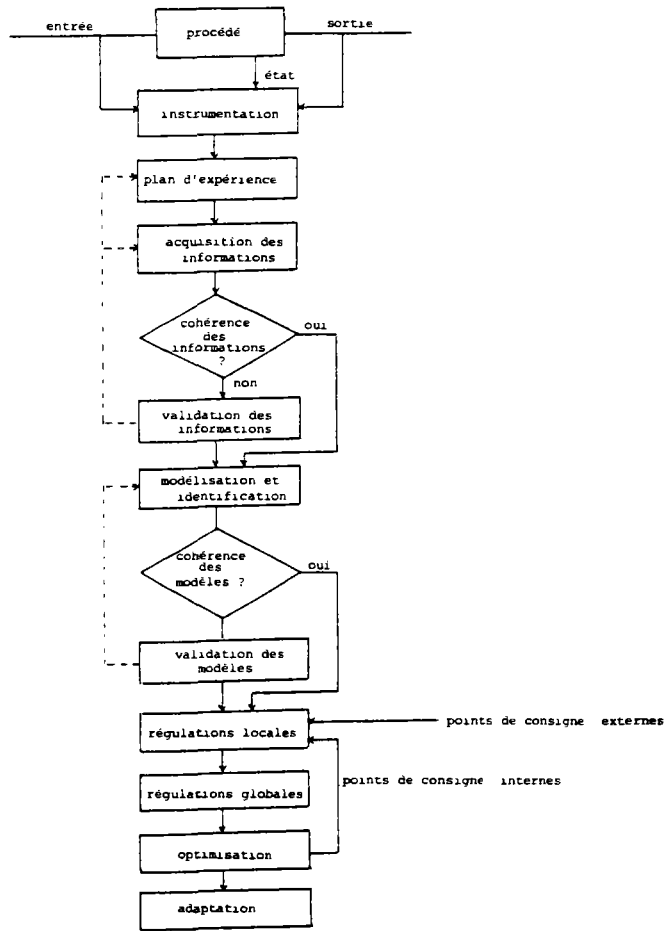


FIGURE 4. Exemple de méthodologie d'analyse et de conduite d'un procédé.

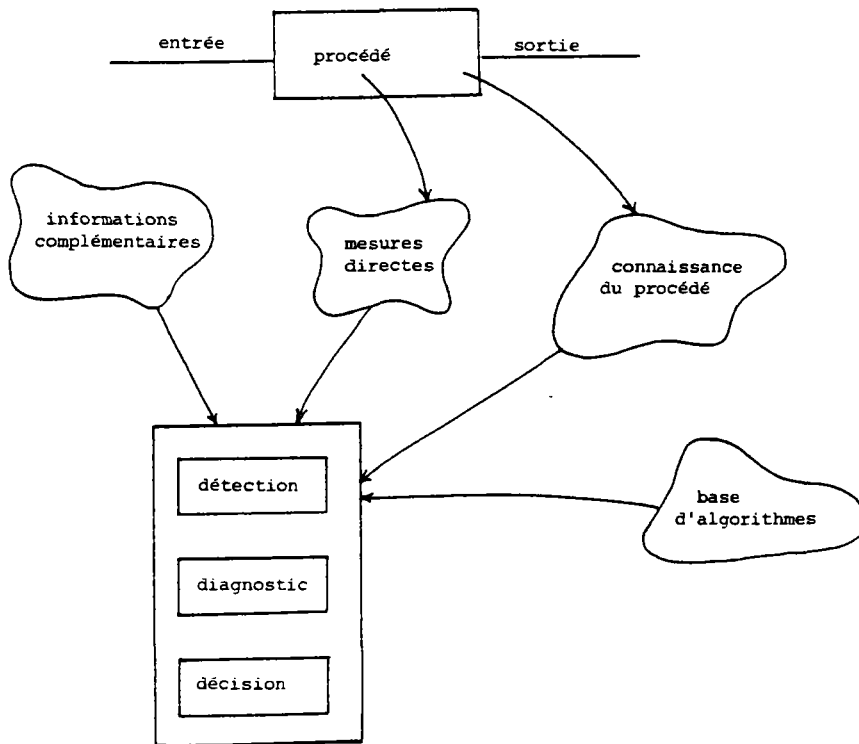


FIGURE 5. Les étapes du diagnostic d'un procédé.

Traditionnellement on recense quatre procédures de surveillance :

- La **procédure commune** est l'observation par l'opérateur du fonctionnement du procédé (éventuellement cette observation est rendue automatique). Chaque grandeur collectée est comparée à sa valeur normale ; cette comparaison est effectuée de façon statique au moyen de gradients d'évolution. Cette méthode est très simple de mise en oeuvre ; par contre son utilisation est délicate car le choix des seuils demande une connaissance approfondie du procédé et bien souvent ces seuils doivent être réajustés selon des procédures non toujours rationnelles.
- Le **multiplexage** (ou redondance matérielle) consiste à multiplier le nombre de chaînes de mesure pour accéder à une même grandeur. Ainsi, lorsqu'un système est à haut risque, on triple voire on quadruple la mesure ; la détection d'une anomalie est alors effectuée par vote majoritaire.

Cette technique apporte une fiabilité supplémentaire mais souffre d'un coût économique élevé ; de plus si elle s'applique bien à la détection d'une anomalie de mesure, elle est inapplicable à la détection de panne du procédé physique lui-même.

- Le **redondance logicielle** qui utilise les liaisons physiques ou mathématiques entre différentes grandeurs (13, 8, 21). Le respect ou non de ces relations de dépendance permet de détecter des aléas et éventuellement de les localiser.
- L'**identification** en temps réel consiste à déterminer, de façon continue et en fonction des informations collectées sur le procédé l'évolution des valeurs numériques de paramètres des modèles du procédé. Une variation "significative" de ces paramètres peut correspondre à l'apparition d'une panne ou d'un aléa.

La figure (5) illustre sous une forme un peu différente les étapes du diagnostic du fonctionnement d'un procédé. Trois fonctions essentielles apparaissent : la **détection** qui concerne la mise en évidence de l'état de fonctionnement et plus particulièrement des régions de fonctionnement anormaux, le **diagnostic** proprement dit qui cherche à préciser les composants de ces états anormaux et à les localiser, et enfin la **décision** à prendre au vu des résultats du diagnostic qui peut être active (compensation des défauts et des anomalies) ou passive (signalisation à l'opérateur).

Les trois phases ne peuvent être mise en place que si on dispose d'informations (mesures directes effectuées sur le procédé ou/et informations relevées manuellement), d'un modèle de connaissance constituant une référence de fonctionnement du procédé et enfin de règles ou d'algorithmes pour analyser les interactions et prendre des décisions.

**Le système de conduite automatique que construisent les auteurs met en oeuvre ces techniques de diagnostic en ligne, en particulier l'identification et la redondance logicielle.** La redondance peut être multiple, l'algorithme de diagnostic pouvant comparer les informations issues des :

- mesures en ligne,
- bilans matière cohérents,
- simulations statiques,
- modèles statistiques.

Le vote majoritaire est alors possible.

Les fonctions de détection et de diagnostic peuvent sans inconvénient pour l'exploitant être réalisées en ligne par le micro-ordinateur. Par contre, la fonction de décision doit impérativement rester aux mains de l'opérateur, tant que dans un atelier donné l'efficacité du diagnostic logiciel n'a pas été longuement vérifiée.

### Conclusion

Le coût modéré de la micro-informatique permet aujourd'hui de développer des systèmes informatisés de conduite de petites usines minéralurgiques. Ces systèmes présentent les mêmes avantages que les plus gros au niveau de l'interface homme/procédé et de la souplesse d'utilisation.

Le laboratoire d'Automatique et de Recherche Appliquée (LARA), la société Lafarge-Coppée-Lavalin, et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) ont acquis des compétences complémentaires dont la synthèse a permis l'analyse et la conception d'une méthode et d'un logiciel de conduite des petites usines minéralurgiques. Cette action bénéficie de l'aide du Comité Valorisation des Ressources du Sous-sol du Ministère de la Recherche et de la Technologie.

Il paraît vraisemblable que les progrès principaux à venir ne concerneront pas le matériel, mais le logiciel de traitement de l'information. Ces progrès permettront à matériel constant de doter les systèmes d'une intelligence de plus en plus performante :

- contrôle multivariable,
- filtrage, identification en ligne,
- diagnostic de l'état des capteurs,
- optimisation, proposition de nouveaux réglages,
- à terme, système expert ?

## BIBLIOGRAPHIE

- (1) **BLOCH G., RAGOT J., SAUTER D.**  
Logiciel intégré d'exploitation de données;  
Journées informatique et pédagogie des Sciences Physiques, 21-22 avril  
1986, Nancy.
- (2) **BLOISE R., REINHART C., BATINA J.**  
Etablissement de bilans matières statistiquement cohérents sur des unités  
complexes. Présentation d'un algorithme de calcul général.  
Industrie minière, les techniques, n° 3/81, pp.257-263, (1981).
- (3) **BLOISE R., REINHART C., MABILLE A.**  
Simulation d'unités complexes.  
Industrie minière, les techniques, n° 1/83, pp. 57-63, (1983).
- (4) **BROUSSAUD A., ALBERA F.**  
Selection of a model for the B.R.G.M. pilot plant rod mill.  
Vth IFAC, Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Proces-  
sing, Tokyo, Japon, 1986.
- (5) **BROUSSAUD A., BLOISE R., BRACHET C.**  
Contribution de l'outil informatique à l'amélioration et à la conception  
d'installations de traitement de minerais.  
Industrie Minière, les techniques, n° 9/84, pp. 697-706, (1984).
- (6) **BROUSSAUD A., BRACHET C., FOURNIGUET G., AUDOLI H., LAPLACE G.**  
Prediction par simulation de l'influence de modifications de flowsheet  
sur les performances de l'usine de flottation de barytine de Chaillac.  
VXth IMPC, Cannes, France, 2-9 juin 1985, tome III, pp. 49-61, (1985).
- (7) **CECCHIN T., MORIO M., BOULARD J.J.**  
Instrumentation d'une unité pilote de broyage-flottation adaptée aux  
minerais sulfurés complexes : conduite automatisée du circuit de broyage-  
classification.  
XVth IMPC, Cannes, France, 2-9 juin 1985, tome III, pp. 99-111, (1985).
- (8) **DAROUACH M., RAGOT J., MAQUIN D., FAYOLLE J.**  
Observabilité des procédés industriels et techniques de bilans cohérents,  
Revue API, 1986.
- (9) **HERBST J. A., BASCUR O. A.**  
Mineral processing control in the 1980's. Realities and dream  
Control

- (10) **HERBST J. A., BASCUR O. A.**  
An approach to adaptive optimal control of mineral processing operations  
XVth IMPC, Cannes, France, 2-9 juin 1985, tome III, pp. 75-87, (1985).
- (11) **ISHIZU A.**  
Automatic control at Kamioka concentrator  
Proceedings Joint Meeting MMIJ-AIME, Tokyo, May, reprint n° 7-III C 2  
(1972).
- (12) **KAGERAND I.**  
Experiences with optimal control in a chalcopyrite flotation circuit  
4th IFAC symposium on automation in mining, mineral and metal processing,  
Helsinki, Finlande, 22-25 août 1983, pp. 427-433, (1983).
- (13) **MAQUIN D., FAYOLLE J., DAROUACH M., RAGOT J.**  
Position de capteurs dans les systèmes de grande dimension.  
Congrès IMACS 86, Lille, France.
- (14) **MARIPUU R., LANDSTROM J.**  
Computer control of the Kristienberg ore dressing plant. Basic principles  
in the strategy and results from the operation.  
16th APCOM Symposium, AIME, New York, (1979).
- (15) **MEHDI D.**  
Contribution à l'analyse des systèmes stochastiques dont les paramètres  
sont aléatoires. Thèse de doctorat, février 1986, Nancy.
- (16) **MIETTUNEN J.**  
The Pykäsalmi concentrator - 13 years of computer control  
4th IFAC symposium on automation in mining, mineral and metal processing,  
Helsinki, Finlande, 22-25 août 1983, pp. 423-426, (1983).
- (17) **MORIZOT G., MORIO M., CECCHIN T.**  
Pilot scale flotation of complex sulfide ores.  
Workshop on flotation of sulphide minerals, Stockholm, Suède, June 12-  
16th 1984 ; developments in mineral processing, vol. 6, pp. 293-315,  
(1985).
- (18) **PAKKINEN U. E., COOPER H. R.**  
Flotation process control;  
in Computer methods for the 80's in the mineral industry, AIME, A. Weiss  
Ed. (1979).
- (19) **PERKINS T. E., MARNEWECKE L.**  
Automatic grind control at Amax Lead Co.  
Mining Engineering, vol. 30, pp. 166-170 (1978).
- (20) **RAGOT J., DISANO T., AUBRUN M.**  
Conception, réalisation et modélisation d'un capteur intelligent pour  
l'analyse des bruits acoustiques. Le Point en Automatique. Librairie  
Lavoisier, 1986.

- (21) **RAGOT J., MERCKLE J., DAROUACH M.**  
Application de l'analyse des réseaux à l'équilibrage des bilans-matière des systèmes complexes. 4th Congres IFIP on system modelling and optimization. Copenhagen, juillet 1983.
- (22) **RAULT A.**  
Méthodes de détection de pannes et de diagnostic des procédés industriels. Journées d'études S.E.E., juin 1982.
- (23) **RICHARD A., ARNOULD J-P., ROSSO M., AUBRUN M., CUNIN P.**  
Modélisation et identification d'un circuit de séchage de minerais en vue de sa commande optimale. Contrat DDSTI n° 83 e 0982, juin 1985.
- (24) **RICHARD A., RAGOT J., ROSSO M.**  
Automatisation d'un atelier de séchage de talc. 15ème congrés International de la Minéralurgie, juin 1985, Cannes.
- (25) **SMITH M. W.**  
Applications of mill process controls can slash operating costs and improve mineral recovery.  
Mining Engineering, vol. 26, n° 11, pp. 33-35 (1974).
- (26) **SMITH H. W.**  
Computer control in flotation plants  
Flotation, vol. 2, chapter 33, pp. 963-993, AIME, M.C. Fuerstenau Ed., (1976).
- (27) **TWIDLE T. R., ENGELBRECHT P. C., KOEL J. W. C.**  
Optimising control of lead flotation at Black Mountain  
XVème IMPC Cannes, France, 2-9 juin 1985, tome III, pp. 189-198 (1985).
- (28) **ZWINGELSTEIN G.**  
Panorama des méthodes d'identification de processus. Le nouvel automatisme. Octobre-novembre 1984

\*\*\*