



**HAL**  
open science

## Présentation d'un outil d'aide à l'établissement de bilans cohérents

Jean Fayolle, Didier Maquin, José Ragot, Mohamed Darouach

### ► To cite this version:

Jean Fayolle, Didier Maquin, José Ragot, Mohamed Darouach. Présentation d'un outil d'aide à l'établissement de bilans cohérents. Congrès des industries minérales, Mines et Carrières Marocaines et Françaises, Oct 1987, Marrakech, Maroc. pp.2-7. hal-00963972

**HAL Id: hal-00963972**

**<https://hal.science/hal-00963972>**

Submitted on 23 Mar 2014

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

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

---

# Présentation d'un outil d'aide à l'établissement de bilans cohérents

---

---

## INTRODUCTION

---

La conduite et la surveillance d'un procédé industriel complexe nécessite de disposer d'informations dont la cohérence a pu être éprouvée. Une démarche, bien connue et commune à de nombreux secteurs d'activité, consiste à exploiter les équations de conservation de la matière ou de l'énergie pour établir un bilan de l'installation. Les objectifs qui conduisent à l'établissement d'un bilan sont nombreux et contradictoires :

- chiffrer les rendements et les pertes de l'installation ;
- estimer les grandeurs inaccessibles à la mesure ;
- détecter les mesures aberrantes ;
- localiser les capteurs en défaut ;
- estimer les erreurs de mesures.

Mais de nombreuses difficultés s'y opposent :

- la dimension des installations ;
- l'hétérogénéité des grandeurs à valider ;
- la non-linéarité des relations liant les différentes grandeurs ;
- le manque d'information en certains points de l'installation.

L'établissement de bilans cohérents nécessite de disposer d'un outil simple prenant en compte l'ensemble des difficultés exposées et qui s'adaptent facilement aux évolutions de l'installation et de son plan d'instrumentation. De plus, il paraît évident avec le développement des calculateurs de procédés que ce type d'outil doit pouvoir s'intégrer dans le cadre d'une application temps réel sans la perturber : les algorithmes doivent être rapides et peu exigeants en place mémoire. En outre, les résultats obtenus à l'aide d'un tel outil doivent être aisément interprétables par un «non spécialiste».

Pour concrétiser ces études théoriques, le Laboratoire d'Automatique et de Recherche Appliquée a développé un logiciel de validation de données (LVD) provenant de procédés en régime statique, décrits par des équations de conservation de la matière ou de l'énergie de type linéaire (qui lient par exemple des débits massiques totaux), ou de type bilinéaire (qui traduisent par exemple la conservation d'espèces chimiques). Dans le cadre de cet exposé, nous restreindrons notre présentation à la version de ce logiciel traitant le cas des systèmes décrits par des équations de type linéaire.

Ce logiciel interactif s'articule autour d'un menu général proposant une liste de commandes en quatre lettres qui se classent en deux groupes :

- les commandes de gestion proposant :
  - la description de l'installation,
  - la saisie des mesures et de leur précision,
  - la définition des fichiers de travail, la lecture et la sauvegarde,
  - la définition du périphérique d'impression des résultats,
  - l'activation de macro-commandes ;
- et les commandes de calcul offrant la possibilité de :
  - tester la cohérence physique de l'installation,
  - décomposer le réseau selon le concept d'observabilité,
  - analyser les écarts de bouclage,
  - établir un bilan statistiquement cohérent,
  - interpréter les résultats et localiser les capteurs en défaut,
  - aider l'opérateur à positionner des capteurs supplémentaires.

Chaque commande donne accès à un menu proposant différentes options.

---

## DESCRIPTION DU PROCÉDÉ

---

Le procédé, schématisé sous forme d'un graphe orienté, est décrit à l'aide d'équations dont la structure rappelle celle des équations de conservation de la matière. Les nœuds et les voies du réseau sont référencés par un label de huit caractères au maximum, définis par l'opérateur. Chaque nœud représente un procédé unitaire autour duquel les équations de bilans doivent être vérifiées et chaque voie un flux circulant. Cette description permet de construire la matrice d'incidence du réseau. Cette matrice, notée  $M$  est formée d'éléments  $m_{ij}$  ( $i = 1, \dots, n$ ;  $j = 1, \dots, v$  où  $n$  représente le nombre de nœuds du réseau et  $v$  le nombre de voies) tels que :

- $m_{ij} = 1$ , la voie  $j$  entre dans le nœud  $i$  ;
- $m_{ij} = -1$ , la voie  $j$  sort du nœud  $i$  ;
- $m_{ij} = 0$ , la voie  $j$  n'est pas liée au nœud  $i$ .

A l'aide de la matrice d'incidence, les équations de conservation de la matière s'écrivent simplement :

---

\* Laboratoire d'Automatique et de Recherche Appliquée - CNRS - CRAN UA 821 - CRVM LA 235, INP de Lorraine - Université de Nancy 1, BP 40, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex.

$$\sum_{j=1}^v m_{ij} Q_j^* = 0$$

pour  $i$  variant de 1 au nombre de nœuds, où  $Q_j^*$  représente le débit vrai de la voie ( $j = 1, \dots, v$ ).

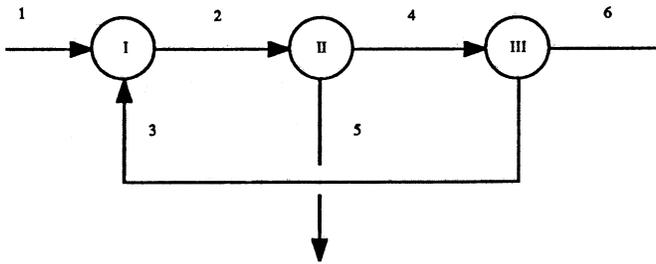


Fig. 1.

Cette matrice traduit les liens existant à l'intérieur du réseau; mais étant composée d'une majorité d'éléments nuls, il est particulièrement intéressant d'utiliser une notation contractée. Par exemple, le réseau de la figure 1 dispose de trois nœuds et six voies:

Sa matrice d'incidence s'écrira:

		voies							
		1	2	3	4	5	6		
M =	1	1	-1	1	0	0	0	I	nœuds
	0	0	1	0	-1	-1	0	II	
	0	0	0	-1	1	0	-1	III	

Sous forme contractée, elle pourra être représentée à l'aide d'un vecteur d'équations et d'un vecteur de pointeurs de fin d'équation par:

- vecteur des équations: 1, - 2, 3 / 2, - 4, - 5 / 4, - 3, - 6;
- vecteur des pointeurs: 3, 6, 9.

Le vecteur des pointeurs permet de délimiter chaque équation dans le vecteur des équations. Sur le plan de la programmation, ce mode de représentation se révèle très pratique et particulièrement économique en place mémoire; il est donc adapté à la représentation de réseaux de grande dimension.

A chaque voie du réseau est associé un indicateur marquant la présence ou l'absence d'un organe de mesure. L'ensemble de ces indicateurs définit les occurrences des mesures.

Pour chaque voie définie comme «mesurée», c'est-à-dire comportant un capteur, la valeur de la mesure et sa précision peuvent être saisies. La précision ainsi définie joue dans l'ensemble des calculs le rôle d'un poids servant à relativiser l'importance des mesures les unes par rapport aux autres. De plus, ces informations serviront ultérieurement à tester la qualité des mesures et des résultats de l'équilibrage.

D'un point de vue pratique, la saisie de ces pondérations prend différentes formes:

- variance ou écart type;
- pour cent de la mesure;
- classe exprimée en pour cent de la mesure.

Ce dernier mode de représentation est particulièrement pratique. Il permet à l'opérateur de définir quatre classes en fonction de la qualité des informations (très bonne, bonne, moyenne, médiocre) et d'associer à chaque classe une erreur exprimée en pour cent qui peut aisément et globalement être réactualisée. Dans le cas, où il n'est pas possible de définir le poids de chaque mesure, l'utilisateur peut exploiter une

pondération automatique proportionnelle à l'amplitude de la mesure.

La base de données ainsi constituée peut être sauvegardée sur fichier pour une utilisation ou une modification ultérieure.

Examinons le procédé schématisé par la figure 2 qui représente un atelier pilote de broyage-flottation. A ce schéma de procédé, nous associons le réseau de la figure 3 formé de six nœuds et douze voies. On remarquera que le broyeur et les deux cyclones ont été agrégés pour former le nœud unique noté I. Il dispose de neuf capteurs de débit massique.

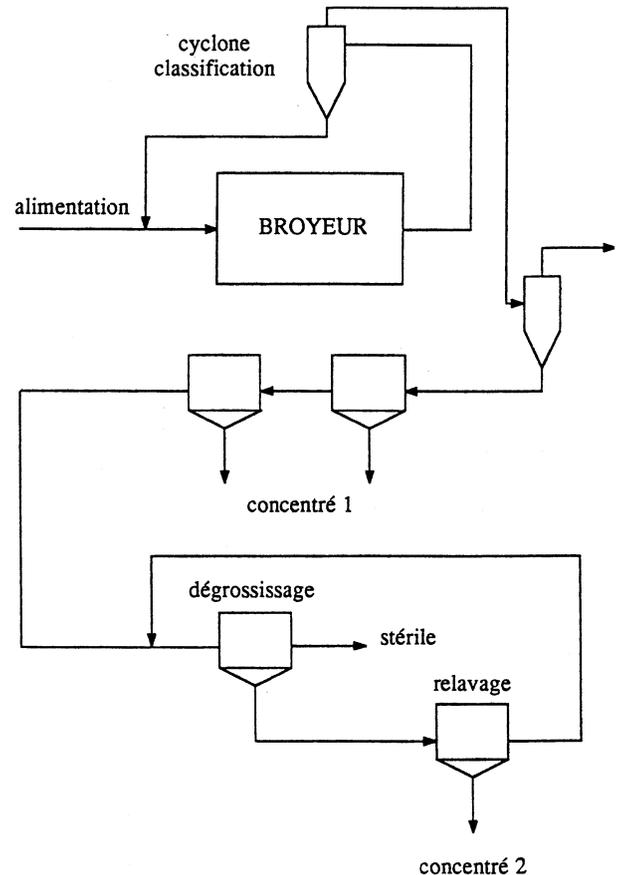


Fig. 2. — Atelier de broyage-flottation.

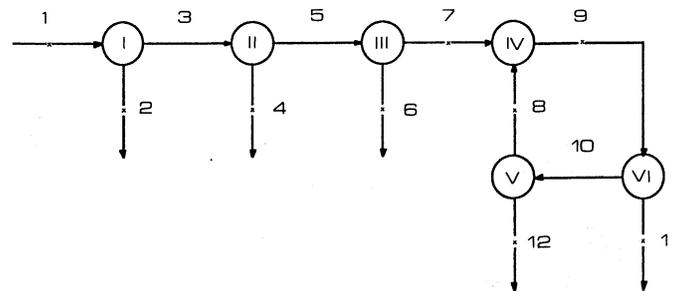


Fig. 3. — Représentation sous forme d'un réseau.

Les mesures de débit massique, exprimées en grammes par minute, sont rassemblées dans le tableau I. La précision est exprimée en pour cent. Par la suite, elle sera traduite sous forme d'un écart type à l'aide de la formule empirique suivante:

$$\text{Ecart type de la mesure} = \frac{\text{Mesure} \cdot \text{Erreur exprimée en \%}}{200}$$

TABLEAU I

Nom de la voie	Valeur de la mesure	Type de pondération	Valeur de la pondération (%)
V 1.....	1 982,95	% Mesure	30,0
V 2.....	397,50	% Mesure	10,0
V 4.....	476,57	% Mesure	10,0
V 6.....	182,60	% Mesure	5,0
V 7.....	1 470,60	% Mesure	10,0
V 8.....	202,24	% Mesure	5,0
V 9.....	1 788,20	% Mesure	15,0
V 11.....	767,49	% Mesure	10,0
V 12.....	540,80	% Mesure	10,0

La mesure du débit d'alimentation (voie 1) du procédé est réalisée à l'aide d'un tapis peseur. Le minerai ayant tendance à prendre en masse, de fortes variations de cette mesure ont été constatées, une précision de 30% lui a donc été attribuée après un étalonnage manuel de la balance. Les autres mesures de débit ont été effectuées manuellement et leurs précisions déterminées en fonction de l'état du procédé à l'instant de la prise d'échantillon, des conditions extérieures et des erreurs liées à l'échantillonnage.

**Décomposition selon l'observabilité**

Le réseau présenté ne dispose pas de mesure de débits sur chacune de ces voies. Il est donc nécessaire dans une première étape de le décomposer selon le concept d'observabilité. Cette décomposition consiste à mettre en évidence deux catégories de grandeurs:

- les grandeurs observables qui sont déterminables d'une façon unique;
- les grandeurs inobservables qui ne sont pas déterminables par manque d'information.

**Exemple:**

La figure 4 présente un réseau formé de neuf voies et quatre nœuds. Il dispose de cinq points de mesure représentés par des x, sur les voies 1, 2, 4, 5 et 7.

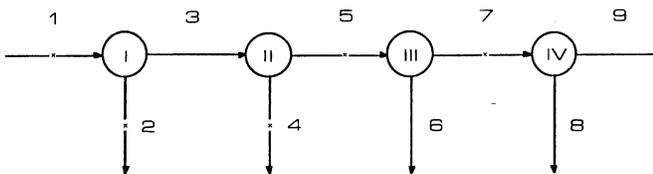


Fig. 4.

Les voies 1, 2, 4 et 5 sont liées par une équation de redondance, c'est-à-dire une équation ne comportant que des variables mesurées:

$$Q_1^* - Q_2^* - Q_4^* - Q_5^* = 0.$$

Les mesures de ces voies pourront être corrigées.

La voie 7 n'intervient dans aucune équation de redondance. Aucune correction ne peut lui être apportée.

Les débits des voies 3 et 6 se calculent par simple déduction:

$$Q_3^* = Q_1^* - Q_2^* \text{ ou } Q_3^* = Q_4^* + Q_5^*$$

$$\text{et } Q_6^* = Q_5^* - Q_7^*.$$

Par contre, le manque d'informations interdit toute estimation des flux circulants dans les voies 8 et 9. En effet, nous ne disposons que d'une seule équation pour déterminer deux inconnues.

Sur cet exemple pédagogique, nous voyons apparaître deux catégories essentielles de variables:

- les variables observables: ce groupe se compose des variables mesurées et des grandeurs déductibles;
- les variables inobservables: le manque d'informations interdit leur calcul.

Cette classification ne dépend que de la position des différents points de mesure.

Nous pouvons alors recenser quatre classes distinctes de variables:

- mesurées, estimables: 1, 2, 4, 5;
- mesurées, non estimables: 7;
- non mesurées, estimables: 3, 6;
- non mesurées, non estimables: 8, 9.

Cette décomposition se formalise à l'aide du calcul matriciel et nous conduit à une forme équivalente de la matrice d'incidence appelée forme canonique. Pour un réseau formé de n nœuds, v voies et disposant de m points de mesure, la figure 5 présente la structure générale de cette matrice:

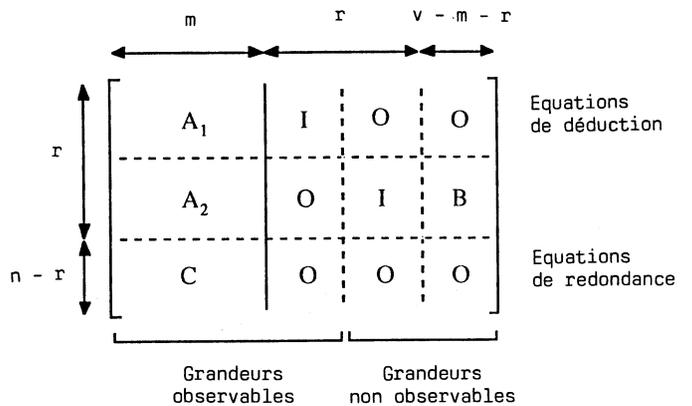


Fig. 5. — Forme canonique de la matrice d'incidence.

En analysant les différents blocs de cette matrice, il est aisé d'obtenir la classification des variables, les équations de redondance et les équations de déduction. Cette matrice particulière est obtenue en effectuant exclusivement des combinaisons linéaires de lignes de la matrice d'incidence [9]. Le tableau II présente la forme canonique de la matrice d'incidence du réseau de la figure 4. On remarquera que cette matrice, comme la matrice d'incidence n'est formée que de 0, de 1 et de -1.

TABLEAU II

Forme canonique de la matrice d'incidence du réseau de la figure 4.

Voies	Mesurées					Non mesurées			
	1	2	4	5	7	3	6	8	9
Equations:									
1.....	-1	1	.	.	.	1	.	.	.
3.....	.	.	.	-1	1	.	1	.	.
4.....	.	.	.	.	-1	.	.	1	1
2.....	1	-1	-1	-1	.	.	.	.	.

Le tableau III montre pour le réseau de la figure 3 la classification obtenue. On remarque, sur ce cas particulier, que toutes les voies du réseau sont observables.

TABLEAU III  
Classification des voies.

Voie	Mesurée		Non mesurée	
	Estimable	Non estimable	Estimable	Non estimable
V 1 .....	x	—	—	—
V 2 .....	x	—	—	—
V 3 .....	—	—	x	—
V 4 .....	x	—	—	—
V 5 .....	—	—	x	—
V 6 .....	x	—	—	—
V 7 .....	x	—	—	—
V 8 .....	x	—	—	—
V 9 .....	x	—	—	—
V 10 .....	—	—	x	—
V 11 .....	x	—	—	—
V 12 .....	x	—	—	—

Les tableaux IV et V présentent les équations de redondance et les équations de déduction. On remarque que les équations de redondance forment un réseau cohérent appelé réseau redondant. Ce dernier peut être obtenu simplement et directement à partir du réseau initial en éliminant les nœuds comportant des voies externes non mesurées et en agrégeant les nœuds comportant des voies de liaison non mesurées.

**Remarque:** Les équations liant les variables inobservables peuvent être judicieusement exploitées pour déterminer le nombre minimal de capteurs supplémentaires à installer pour rendre le réseau globalement observable [10].

TABLEAU IV  
Liste des équations de redondance.

Equation	Voies			
1	+	V 8	V 11	V 12
	-	V 9		
2	+	V 7	V 8	
	-	V 9		
3	+	V 2	V 4	V 6
	-	V 1		V 7

TABLEAU V  
Liste des équations de déduction.

Voie déduite	En fonction des voies	
V 3	+	V 1
	-	V 2
V 5	+	V 1
	-	V 2      V 4
V 10	+	V 9
	-	V 11

### ANALYSE DES ÉCARTS DE BOUCLAGE

A partir des équations de redondance et des mesures, il est possible de vérifier la qualité des mesures en examinant les écarts de bouclage ou résidus de bilans. Cette démarche permet de localiser de façon grossière les mesures aberrantes.

Connaissant la précision associée à chaque mesure, on peut alors calculer la variance de chacun des écarts de fermeture. D'après l'hypothèse de normalité des erreurs de mesures, ces écarts sont la réalisation de variables aléatoires normalement distribuées, centrées et de variances connues. Afin de comparer les écarts entre eux, nous définissons les écarts normalisés qui sont simplement les écarts de bouclage divisés par leur écart type: chaque écart normalisé peut alors être considéré comme la réalisation d'une variable aléatoire gaussienne, centrée et réduite. Cette opération de réduction des résidus permet ensuite une comparaison entre les écarts de bouclage des différentes équations. De plus, on peut calculer, pour chaque équation de redondance, une probabilité de défaut qui est simplement la probabilité d'obtenir un écart de fermeture inférieur en valeur absolue à l'écart courant.

Après avoir fixé un seuil de détection, l'opérateur examinera chacun de ces écarts normalisés. Les équations dont l'écart normalisé est supérieur au seuil sont suspectées de contenir des mesures aberrantes. Par agrégation successive des équations de redondance, il est alors possible d'affiner la localisation des défauts. En outre, cette démarche permet de localiser dans certains cas des fuites sur l'installation.

Exemple: considérons le réseau de la figure 6 formé de deux nœuds et cinq voies et sur lequel les débits massiques suivants ont été prélevés:

Voie	Mesure	Ecart type
1 .....	10,50	0,50
2 .....	2,90	0,15
3 .....	9,10	0,35
4 .....	3,10	0,15
5 .....	3,60	0,20

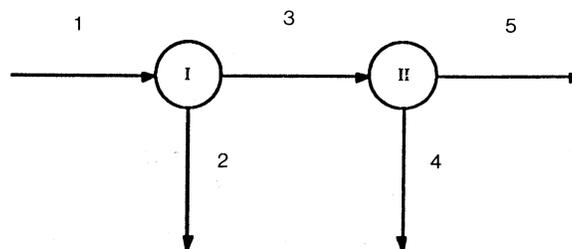


Fig. 6.

Examinons les résidus des équations de bilan:

$$\begin{aligned} - R_1 &= Q_1 - Q_2 - Q_3 = -1,5; \\ - R_2 &= Q_3 - Q_4 - Q_5 = 2,4. \end{aligned}$$

Les probabilités de défaut associées à chacun de ces écarts sont respectivement:

$$P_1 = 98\% \text{ et } P_2 = 100\%.$$

Fixons la probabilité admissible à 95%. Dans ce cas, les deux équations semblent en défaut. Par agrégation de ces deux équations, il est possible d'obtenir une nouvelle équation de bilan dont l'écart de fermeture R sera:

$$R = Q_1 - Q_2 - Q_4 - Q_5 = 0,9.$$

La probabilité associée à ce nouvel écart est de 88%; celle-ci étant inférieure au seuil de 95%, les voies contenues dans cette dernière équation ne sont donc pas susceptibles d'être en défaut. On supposera donc logiquement que la voie 3 est en défaut.

Le tableau VI présente les écarts de bouclage constatés sur le réseau de broyage-flottation présenté au début de cet exposé (figure 3). Les équations sont référencées par un numéro relatif à la liste des équations de redondance (cf. tableau VI).

TABLEAU VI  
Analyse des écarts de fermeture.

Equation de redondance	Ecart de fermeture	Ecart normalisé	Probabilité (%)
1 .....	- 277,67	- 1,95	94,92
2 .....	- 115,36	- 0,75	54,90
3 .....	544,32	1,76	92,28

En se fixant un seuil de détection à 95%, on remarque que les équations 1 et 3 ont une probabilité de défaut proche mais inférieure à ce seuil. Nous ne suspecterons donc pas à partir de ces résultats la qualité des mesures.

## L'ESTIMATION

L'étude de l'observabilité a permis de mettre en évidence des équations de redondance ne contenant que des variables mesurées.

Une estimation des grandeurs vraies est calculée par minimisation d'un critère quadratique sous contraintes à l'aide de la technique des multiplicateurs de Lagrange. Cette estimation, faite au sens du maximum de vraisemblance, suppose que les erreurs de mesures sont distribuées selon une loi normale centrée de variance connue. Dans le cas de contraintes de type linéaire, la résolution de ce problème est analytique. Différents algorithmes de calcul sont applicables. Nous avons choisi une méthode récurrente ne nécessitant pas d'inversion de matrice. Cet algorithme, peu exigeant en place mémoire, se montre rapide et très peu sensible aux erreurs d'arrondi. De plus, cette technique permet d'évaluer simultanément les grandeurs corrigées et leur matrice de variance-covariance [5]. Après estimation des grandeurs intervenant dans les équations de redondance, les grandeurs déductibles sont calculées à l'aide des équations de déduction provenant de la forme canonique de la matrice d'incidence.

Le tableau VII présente les résultats de l'équilibrage des mesures de notre exemple (cf. figure 3). La troisième colonne présente les estimations obtenues. Les colonnes 4 et 5 permettent de comparer la précision des mesures et celle des estimations. Dans un but d'homogénéisation, les précisions ont été traduites sous forme d'écart type. On remarquera que l'écart type d'une grandeur estimée est toujours inférieur à celui de la mesure. La dernière colonne présente pour chaque voie mesurée son taux de correction. L'examen de ce seul tableau ne permet pas de juger d'une façon objective la qualité des résultats et de vérifier la validité des hypothèses faites sur les erreurs de mesure lors de l'équilibrage.

## TESTS SUR LES RÉSULTATS DE L'ÉQUILIBRAGE

Afin de s'assurer de la validité des corrections apportées, des tests statistiques simples permettent de vérifier le caracté-

TABLEAU VII  
Résultats de l'équilibrage.

Voie	Mesure	Estimation	Ecart type	Ecart type estimé	Taux de correction (%)
V 1 .....	1 982,95	2 418,47	297,44	48,57	21,96
V 2 .....	397,50	395,56	19,88	19,83	0,49
V 3 .....		2 022,92		44,54	
V 4 .....	476,57	473,78	23,83	23,75	0,59
V 5 .....		1 549,14		37,92	
V 6 .....	182,60	182,50	4,57	4,56	0,06
V 7 .....	1 470,60	1 366,65	73,53	37,65	7,07
V 8 .....	202,24	202,55	5,06	5,05	0,15
V 9 .....	1 788,20	1 569,20	134,12	37,94	12,25
V 10 .....		762,71		25,86	
V 11 .....	767,49	806,49	38,37	33,49	5,08
V 12 .....	540,80	560,16	27,04	25,39	3,58

rière normal des erreurs de mesure. Pour chaque variable intervenant dans une équation de redondance, son terme correctif (écart mesure-estimation) est évalué. Les termes correctifs normalisés, calculés en divisant les termes correctifs par leur écart type, sont comparables entre eux et permettent de déterminer les grandeurs les plus fortement corrigées. Enfin pour chaque variable, une probabilité de défaut est calculée. Celle-ci représente la probabilité d'avoir un terme correctif inférieur au terme correctif courant si les hypothèses sur les erreurs de mesures sont respectées. Pour faciliter l'interprétation de ces résultats, ces derniers peuvent être présentés sous forme d'un histogramme.

TABLEAU VIII  
Analyse des corrections.

Voie	Terme correctif	Terme correctif normalisé	Probabilité (%)
V 1 .....	- 435,52	- 1,48	86,22
V 2 .....	1,95	1,48	86,22
V 4 .....	2,80	1,48	86,22
V 6 .....	1,10	1,48	86,23
V 7 .....	103,95	1,65	90,02
V 8 .....	- 0,31	- 1,70	91,13
V 9 .....	219,00	1,70	91,13
V 11 .....	- 38,30	- 2,08	96,26
V 12 .....	- 19,36	- 2,08	96,26
Valeur du critère résiduel.....			8,38
Probabilité (loi du khi 2).....			96,19

Le tableau VIII présente pour le réseau de la figure 3 l'analyse des termes correctifs. Le critère résiduel représente la somme des carrés des termes correctifs divisés par la variance des mesures. Cette grandeur est la réalisation d'une variable aléatoire distribuée selon une loi du khi 2 dont le degré de liberté est égal au nombre d'équations de redondance. Ce critère rend compte de l'ensemble des résultats de la validation et permet de juger globalement la qualité des mesures. La probabilité d'obtenir un critère inférieur au critère résiduel est éditée et doit être interprétée par rapport à un seuil fixé: cette probabilité permet à l'opérateur d'accepter ou de rejeter les résultats de l'équilibrage.

Lorsque la probabilité est supérieure à un seuil défini, un algorithme itératif propose une liste classée des mesures qui perturbent l'équilibrage et qui semblent à ce titre suspectables. Sur l'exemple précédent, fixons à 95% la probabilité de défaut maximum associée au critère. Ce seuil étant franchi, l'algorithme propose d'éliminer les mesures des voies 11

et 12 (tableau IX). Ces deux voies jouant le même rôle dans l'installation, il n'a pas été possible de distinguer plus précisément la voie en défaut mais on peut affirmer que parmi celles-ci, au moins l'une d'entre elles est en défaut.

Il faut noter qu'il n'est plus possible à cette étape de détecter une erreur de structure dans l'installation (par exemple une fuite.

TABLEAU IX  
Localisation des mesures suspectes.

Etape 1:		
Critère: 8,38	Degré de liberté: 3	Probabilité: 96,19%
Voies supprimées:		
V 11	V 12	
Etape 2:		
Critère: 4,05	Degré de liberté: 2	Probabilité: 87,05%

## CONCLUSION

Au travers de cette présentation, les auteurs ont voulu présenter un outil simple et puissant apte à aider un opérateur dans la conduite d'une installation. L'établissement de bilans cohérents ne doit pas se limiter à une simple édition de nombres vérifiant certaines équations. Il est nécessaire de confronter les résultats obtenus aux hypothèses qui ont permis de conduire les calculs.

A ce titre, la validation de données incite l'opérateur à une réflexion sur la structure du procédé et des informations.

Les perspectives de développement sont nombreuses, citons en particulier:

- analyse historique des corrections;
- validation des systèmes dynamiques;
- extension des méthodes d'interprétation aux systèmes non linéaires;
- adaptation des algorithmes aux systèmes de très grande dimension.

## RÉFÉRENCES

1. BLOISE R., RHEINHART C., BATINA J. — *Etablissement de bilans matière statistiquement cohérents sur des unités complexes*. Revue de l'Industrie minière, p. 257-263, mars 1983.
2. COHEN I., HANUS R. — *Influence de la fiabilité des capteurs sur la précision des bilans matière, ou de l'influence des bilans matière sur la précision et la fiabilité des capteurs*. Congrès SIM, Besançon, 1982.
3. DAROUACH M., RAGOT J., MAQUIN D., FAYOLLE J. — *Validation des mesures par équilibrage hiérarchisé de bilans matière. Concept et méthodologie*. International Journal of Mineral Processing, vol. 17, p. 273-285, 1986.
4. DAROUACH M., RAGOT J., FAYOLLE J., MAQUIN D. — *Calcul hiérarchisé et décomposition des systèmes linéaires et bilinéaires appliqués à la validation des données*. Revue AFCET APII, vol. 20, p. 405-432, 1986.
5. FAYOLLE J., DAROUACH M., RAGOT J. — *Influence qualitative et quantitative des mesures sur le diagnostic de l'état des systèmes*. IASTED Nice, juin 1984 - Journal of Modelling and Simulation, vol. 6, n° 2, 1986.
6. HODOUIN D., EVERELL M.D. — *A hierarchical procedure for adjustment and material balancing of mineral processes data*. International Journal of Mineral Processing, vol. 7, p. 91-116, 1986.

7. LAGUITON D. — *Material balance of mineral processing flowsheets*. Canmet Sciences Laboratories, Division Report MRP/MSL 80-33 (IR), 1980.
8. MAH R.S., STANLEY G.M., DOWNING D.M. — *Reconciliation and rectification of process flow and inventory data*. Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., vol. 15, n° 1, 1976.
9. MAQUIN D., FAYOLLE J., DAROUACH M., RAGOT J. — *Observabilité des systèmes linéaires à mesures manquantes. Application à l'établissement de bilans cohérents*. Revue de l'Industrie minière - Les Techniques, février 1986, p. 53-56.
10. MAQUIN D., DAROUACH M., FAYOLLE J., RAGOT J. — *Le positionnement des capteurs dans les systèmes industriels de grandes dimensions*. Congrès IMACS, Lille, juin 1986.
11. RAGOT J., DAROUACH M., CARDINI J.-L., SCHEIDT C. — *Mise en œuvre d'un programme d'aide au diagnostic de la cohérence des mesures sur des pilotes industriels*. International 83 AMSE Summer Conference, Nice, septembre 1983.
12. ROMAGNOLI J.A. — *On data reconciliation: constraints processing and treatment of bias*. Chemical Engineering Science, vol. 38, n° 7, p. 1107-1117, 1983.

## DISCUSSION

### Question de M. René BLOISE (BRGM):

Pouvez-vous donner quelques indications sur la façon dont le logiciel LVD dont vous avez décrit le principe peut-être utilisé: saisie des données, ...?

### Réponse de M. Jean FAYOLLE:

LVD est un logiciel interactif écrit en Fortran. Il s'articule autour d'un menu proposant une liste de commandes en quatre lettres. Chaque commande donne accès à un menu offrant différentes options. La définition du réseau s'effectue à l'aide d'équations dont la structure rappelle les équations de conservation de la matière. La saisie des mesures et de leur précision est réalisée au travers d'un conversationnel.

L'interactivité permet à l'opérateur de modifier à tout moment ses informations et l'ordre logique d'étude.

### Question de M. Rachid LAHBABI (OCP - Directeur):

Est-ce que le modèle présenté s'applique de manière statique ou dynamique?

### Réponse de M. Jean FAYOLLE:

Le logiciel présenté permet d'établir des bilans statistiquement cohérents pour des installations en régime statique décrit par un modèle linéaire.

La méthodologie employée s'étend au cas des systèmes linéaires en régime dynamique. Ceux-ci étant décrits par des équations différentielles, ces dernières doivent être discrétisées.

### Question de M. Alain BROUSSAUD (BRGM):

Le logiciel présenté s'applique seulement aux problèmes linéaires, c'est-à-dire ceux pour lesquels on s'intéresse uniquement aux débits globaux et pour lesquels on peut mesurer des débits. Malheureusement en minéralurgie, en particulier dans l'industrie, les mesures de débits sont souvent impossibles, toujours difficiles alors que l'échantillonnage peut permettre d'obtenir une information sur la composition des flux de matière.

Les algorithmes que vous étudiez seront-ils tous transposables aux problèmes non linéaires, essentiels pour les minéralurgistes?

### Réponse de M. Jean FAYOLLE:

En effet, LVD ne s'applique qu'aux problèmes linéaires. Une version de LVD traitant le cas des systèmes bilinéaires partiellement observés est en cours d'élaboration et sera achevée dans le courant de l'année 1988.

Dans le cas des systèmes bilinéaires, l'estimation des grandeurs sujettes à validation nécessite la mise en œuvre de procédures itératives. Ces techniques sont bien maîtrisées. La difficulté essentielle réside dans la décomposition selon l'observabilité, c'est-à-dire la prise en compte des grandeurs non mesurées. Cette décomposition est résolue sur le plan théorique et des éléments logiciels existent. L'algorithme repose sur une décomposition séquentielle et structurale du système initial en sous-systèmes linéaires de faible dimension.

Le problème principal restant à résoudre actuellement est l'interprétation des résultats donnés par la validation.