



HAL
open science

L.V.D., Logiciel de Validation de Données. Application à l'équilibrage de bilan-matière d'une unité chimique

Didier Maquin, Jean Fayolle, José Ragot, Jean Mouchnino

► **To cite this version:**

Didier Maquin, Jean Fayolle, José Ragot, Jean Mouchnino. L.V.D., Logiciel de Validation de Données. Application à l'équilibrage de bilan-matière d'une unité chimique. 1er congrès national de génie des procédés, Sep 1987, Nancy, France. pp.46-51. hal-00963965

HAL Id: hal-00963965

<https://hal.science/hal-00963965>

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.

L.V.D. , Logiciel de Validation de Données
Application à l'équilibrage de bilans matière d'une unité chimique

Didier MAQUIN*, Jean FAYOLLE*, José RAGOT*, Jean MOUCHNINO**

(*)

Laboratoire d'Automatique et de Recherche Appliquée
Centre de Recherche sur la Valorisation des Minerais
Centre de Recherche en Automatique de Nancy
Rue du Doyen Marcel Roubault
54500 VANDOEUVRE LES NANCY
Tél. : 83.51.43.71.

(**)

C.d.F. ChimieS.A.
Direction technique
Département procédés
Tour Aurore - Place des reflets
92080 PARIS LA DEFENSE 2

Résumé : La conduite et la surveillance des procédés industriels complexes nécessitent de disposer d'informations dont la cohérence doit être éprouvée. Parmi les méthodes permettant de s'assurer de la qualité de celles-ci, les techniques reposant sur l'équilibrage de bilans matière ou bilans énergie tiennent une place importante. Ces méthodes, désormais classiques, permettent de corriger les mesures afin qu'elles vérifient parfaitement les équations de conservation de la matière ou de l'énergie. Les auteurs présentent, dans cette communication, les méthodes permettant d'effectuer la validation de données de systèmes décrits par des équations linéaires ainsi qu'un logiciel réalisant ces différentes opérations.

I. INTRODUCTION

L'un des aspects importants du contrôle industriel est l'obtention et la visualisation d'informations pertinentes qui donnent une image des conditions opératoires d'un procédé. Cependant, si des progrès importants sont intervenus lors de ces dernières décennies, dans le développement des méthodes et algorithmes de contrôle commande, les outils d'analyse de l'information "brute" sont encore insuffisants. L'élaboration de commandes complexes est en effet inefficace, si les informations prises en compte par les algorithmes qui les génèrent, sont erronées et incohérentes. Afin de s'assurer de la crédibilité d'une mesure, il est nécessaire de créer une redondance d'informations; celle-ci peut être obtenue en utilisant par exemple, les relations structurellement exactes de bilan matière ou de bilan énergie. Ce type de redondance est qualifié d'*analytique* ou *fonctionnelle*, contrairement à la redondance *matérielle* obtenue en multipliant les capteurs mesurant une même grandeur. L'établissement de ces bilans permet d'atteindre deux objectifs essentiels :

- vérification de la cohérence des mesures.
(pouvant induire la détection et la localisation de pannes de capteurs ; la validation apporte alors une aide au diagnostic de fonctionnement et à la maintenance)
- définition précise de la distribution et de la composition des flux circulants.
(permettant l'amélioration de la conduite du procédé et une estimation plus fiable des rendements et des rejets de l'installation)

Soulignons que la démarche adoptée n'est pas spécifique du domaine chimique. De façon plus générale, elle s'applique aux procédés de transport de flux au sens large : produits chimiques, minéralurgiques, solide ou liquide, et, dans certains cas, flux énergétiques représentés par des débits calorifiques ou des puissances électriques.

De nombreuses difficultés apparaissent lors de l'établissement de ces bilans, parmi lesquelles on peut citer de manière privilégiée :

- la dimension de l'installation qui peut être constituée de plusieurs centaines de sous-systèmes élémentaires,
- le nombre de variables (jusqu'à plusieurs milliers) décrivant le fonctionnement de l'installation,
- les couplages entre les variables ou "modèles" qui sont, de manière générale, non-linéaires,
- le caractère fragmentaire de l'information ; on ne peut en effet disposer d'information en tous points d'un procédé,
- les erreurs de nature différente qui affectent les bilans : erreurs aléatoires, systématiques, temporaires,
- l'évolution structurelle du procédé ...

II. METHODOLOGIE

Le procédé est schématisé sous forme d'un graphe orienté où les noeuds représentent les sous-systèmes unitaires et où les arcs schématisent les flux circulants. La matrice d'incidence du graphe, M , comportant n lignes et v colonnes, donne alors une image de la topologie de l'installation. Cette représentation permet d'écrire simplement (dans le cas linéaire) les équations de conservation de la matière sous la forme exacte :

$$M Q^* = 0$$

où Q^* est le vecteur des grandeurs vraies.

II.1. Décomposition selon l'observabilité

D'une manière générale, un procédé industriel ne dispose pas de mesures de débit sur chacune de ses voies. Il est donc nécessaire, dans une première étape, d'extraire du réseau initial, un sous-réseau redondant dans lequel toutes les voies disposeront de mesure. De façon plus générale, certaines transformations matricielles de la matrice M , tenant compte de la position des points de mesure, permettent de mettre en évidence deux types de grandeurs : (1) (2)

- **les grandeurs observables**, parmi lesquelles on recense les grandeurs mesurées pouvant être corrigées par l'équilibrage de bilan (ce sont celles intervenant dans le sous-réseau redondant), les grandeurs mesurées qui ne pourront être corrigées par manque d'information et les grandeurs non mesurées déductibles.

- **les grandeurs inobservables**. Les équations où interviennent les grandeurs inobservables peuvent être judicieusement exploitées pour déterminer le nombre minimum et la localisation des capteurs à implanter pour rendre le réseau complètement observable (3).

II.2. Analyse des mesures brutes

Cette phase concerne la mise en oeuvre de tests statistiques des mesures brutes, afin de décider de leur cohérence. Pour chaque équation de redondance issue de la décomposition précédente, on peut évaluer un résidu de bilan. Chacun de ces résidus

étant lié à l'amplitude des mesures intervenant dans l'équation, il est préférable de les "normaliser" en les divisant par la racine carrée de leur variance. Les résidus normalisés sont alors considérés comme des réalisations d'une variable aléatoire gaussienne centrée réduite. On peut alors leur associer une probabilité de défaut traduisant la probabilité d'obtenir un résidu inférieur, en valeur absolue, au résidu calculé, sous l'hypothèse que les erreurs de mesure sont gaussiennes et à moyenne nulle. Un test statistique simple peut alors être mis en oeuvre : l'opérateur se fixe un seuil de détection (probabilité critique) et déclare que les équations dont la probabilité associée au résidu est supérieure à ce seuil, sont suspectées de contenir des mesures aberrantes. Afin d'affiner la localisation des défauts, le test peut être répété sur les agrégations des différentes équations de redondance (4).

II.3. Etablissement du bilan cohérent (équilibre)

La décomposition selon l'observabilité permet de décomposer le problème initial de validation en deux étapes. Tout d'abord l'estimation des grandeurs intervenant dans les équations de redondance. Ce calcul s'effectue en minimisant un critère quadratique sous contraintes à l'aide de la technique des multiplicateurs de Lagrange (2). Dans le cas de contraintes linéaires, la solution de ce problème est analytique. Les grandeurs déductibles peuvent ensuite être évaluées à l'aide des équations de déduction issues de l'observabilité.

II.4. Tests de la robustesse des résultats

Afin de juger si les corrections apportées par l'équilibrage sont plausibles, compte tenu de l'hypothèse de normalité de la distribution des erreurs de mesure, il est nécessaire d'effectuer des tests statistiques sur celles-ci. Un résidu normalisé (écart mesure-estimation divisé par son écart type) peut être calculé pour chaque variable intervenant dans une équation de redondance. De la même manière que pour les mesures brutes, une probabilité de défaut est associée à chacun de ces résidus, permettant à l'utilisateur, par le choix d'un seuil critique, de déclarer certaines mesures suspectes (5). Les taux de correction des mesures et la précision de celles-ci peuvent également être appréciées en calculant le critère résiduel (somme des carrés des écarts mesures-estimations) dont la distribution doit suivre une loi du khi 2 à autant de degré de liberté que le nombre d'équations de redondance. L'utilisation des tables correspondant à cette distribution permet alors d'obtenir la probabilité associée à cette valeur. Cette probabilité est très intéressante puisqu'un seul scalaire rend compte de la qualité de l'ensemble de l'équilibrage. L'utilisateur pourra donc se fixer un seuil au dessous duquel l'équilibrage sera considéré comme satisfaisant. Le franchissement de ce seuil indiquera à l'opérateur qu'il doit effectuer une analyse plus fine des résultats, afin de détecter et localiser les grandeurs suspectes.

II. 5. Analyse d'historiques

L'ensemble des traitements a été présenté dans le cadre de la validation "mono-campagne de mesures", les grandeurs validées provenant, par exemple, de moyennages durant un poste de travail. L'expérience montre que le réglage des différents seuils de probabilité est délicat, de plus l'estimation de la précision des mesures est toujours difficile puisqu'elle résulte généralement de considérations approximatives telles que l'âge du capteur, la date de son dernier étalonnage ou ses conditions d'utilisation. L'extension des traitements aux campagnes chronologiques de mesures est très riche d'informations, elle permet par exemple de déterminer, durant les régimes stables, la précision expérimentale des mesures. Le réglage des seuils de détection peut s'effectuer par apprentissage de manière à parvenir à un compromis entre la détection intempestive et la non-détection. L'examen de l'évolution du critère résiduel et celui de chacun des résidus normalisés permet de détecter et localiser de manière plus sûre, les dégradations des organes de mesure (panne franche, dérive, décalage de zéro).

III. LE LOGICIEL L. V. D.

Afin de concrétiser ses études théoriques, le Laboratoire d'Automatique et de Recherche Appliquée a développé un logiciel de validation de données (L.V.D.). La première version de ce produit ne traite que des bilans linéaires. Ce logiciel interactif s'articule autour d'un menu général proposant une liste de commandes qui se classent en deux groupes :

les commandes de gestion qui proposent :

- la description de l'installation
- la saisie des mesures et de leur précision
- la saisie de contraintes linéaires supplémentaires
- la définition des fichiers de travail, la lecture et la sauvegarde
- l'activation de macro-commandes
- l'accès à un module d'aide

et les commandes de calcul qui offrent la possibilité de :

- tester la cohérence physique de l'installation décrite
- décomposer le réseau selon le concept d'observabilité
- analyser les écarts de bouclage
- établir un bilan statistiquement cohérent
- interpréter et localiser les capteurs en défaut
- aider l'opérateur à positionner des capteurs supplémentaires

La figure 1 schématise un procédé pétrochimique simplifié.

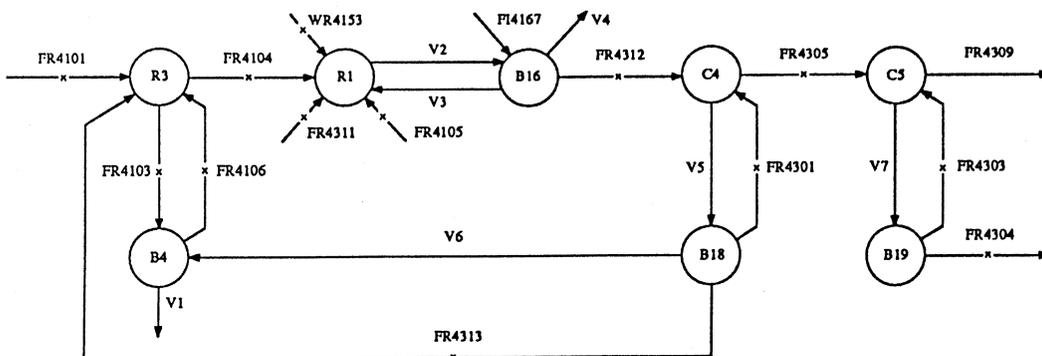


Figure 1 : Procédé pétrochimique

Celui-ci dispose de 13 points de mesure en débit massique représentés par des croix, et d'une seule analyse chimique de la voie FR4312 permettant de connaître la composition précise de ce flux. Le trop faible nombre de ces analyses ne permet pas d'effectuer, en plus d'un équilibrage de bilan total, des équilibrages de bilans partiels, constituant par constituant, mais ces informations seront introduites sous la forme de contraintes supplémentaires. Le fonctionnement du procédé permet en effet d'écrire les deux relations linéaires :

$$\begin{aligned} (V6 + FR4313) &= 0,35 FR4312 \\ FR4304 &= 0,54 FR4312 \end{aligned}$$

La décomposition selon l'observabilité de ce réseau permet de dénombrer 3 équations de redondance et 5 équations de déduction. Seules les variables V2, V3, V4 et F14167 sont inobservables.

Les mesures prélevées sur ce procédé sont rassemblées à la figure 2. Les résultats de l'équilibrage respectant les équations de conservation de la matière et les deux équations de contraintes supplémentaires sont explicités à la figure 3. Les précisions des mesures ont toutes été converties en écarts-type dans un souci d'homogénéisation. La dernière colonne de ce tableau fait apparaître le taux de correction des grandeurs mesurées.

NOM DE LA VOIE	VALEUR DE LA MESURE	TYPE DE PONDERATION	VALEUR DE LA PONDERATION
FR4101	29358.000	% Mesure	5.00 %
FR4103	20300.000	% Mesure	10.00 %
FR4106	22885.000	% Mesure	8.00 %
FR4313	15133.000	% Mesure	5.00 %
FR4104	42733.000	% Mesure	10.00 %
WR4153	89.500	% Mesure	5.00 %
FR4312	62100.000	% Mesure	4.00 %
FR4301	27500.000	% Mesure	8.00 %
FR4305	42350.000	% Mesure	10.00 %
FR4303	53600.000	% Mesure	10.00 %
FR4304	32150.000	% Mesure	5.00 %
FR4311	88.000	% Mesure	5.00 %
FR4105	2000.000	% Mesure	5.00 %

Figure 2 : Valeur des mesures

VOIE	MESURE	ESTIMATION	ECART TYPE	ECART TYPE ESTIME	TAUX DE CORRECTION
FR4101	29358.000	29029.200	733.950	705.620	1.12 %
FR4103	20300.000	20928.830	1015.000	938.647	3.10 %
FR4106	22885.000	22373.530	915.400	859.809	2.23 %
FR4313	15133.000	15045.640	378.325	374.500	.58 %
FR4104	42733.000	45519.540	2136.650	1279.109	6.52 %
V1		4989.079		1243.129	
V6		6434.578		492.805	
WR4153	89.500	89.500	2.237	2.237	.00 %
V2					
V3					
FI4167					
V4					
FR4312	62100.000	61372.030	1242.000	915.207	1.17 %
V5		48980.220		1145.690	
FR4301	27500.000	27500.000	1100.000	1100.000	.00 %
FR4305	42350.000	39891.810	2117.500	594.884	5.80 %
V7		86740.890		2725.187	
FR4303	53600.000	53600.000	2680.000	2680.000	.00 %
FR4309		4750.922		100.673	
FR4304	32150.000	33140.890	803.750	494.212	3.08 %
FR4311	88.000	88.000	2.200	2.200	.00 %
FR4105	2000.000	2000.000	50.000	50.000	.00 %

Figure 3 : Résultats de l'équilibrage

Si l'on fixe la probabilité critique à 95 % (correspondant à une dispersion des mesures de ± 2 écarts-type), l'analyse des termes correctifs permet de constater que les résultats présentés à la figure 3 sont valides (probabilité maximum : 89,65 %).

VOIE	RESIDU	RESIDU NORMALISE	PROBABILITE DE DEFAUT
FR4101	328.801	1.628	89.65 %
FR4103	-628.826	-1.628	89.65 %
FR4106	511.473	1.628	89.65 %
FR4313	87.364	1.628	89.65 %
FR4104	-2786.539	-1.628	89.65 %
FR4312	727.973	.067	61.41 %
FR4305	2458.188	1.210	77.36 %
FR4304	-990.891	-1.563	88.20 %

Valeur du critère résiduel : 5.862
 Probabilité du kh12 : 88.33 %

Figure 4 : Analyse des corrections

Le logiciel L.V.D. a été "interfacé" avec un Logiciel d'Exploitation de Données (L.E.D.), également développé par le L.A.R.A., afin d'analyser les résultats chronologiques issus de l'équilibrage. Cinquante campagnes chronologiques de mesures ont été analysées. Nous avons introduit volontairement un biais systématique d'une valeur de 3000 kg/h sur la voie FR4106, (correspondant à environ 30 % de la valeur moyenne de la mesure), à partir de la 28^{ème} campagne jusqu'à la dernière. La figure 5 montre l'évolution du résidu normalisé relatif à cette voie.

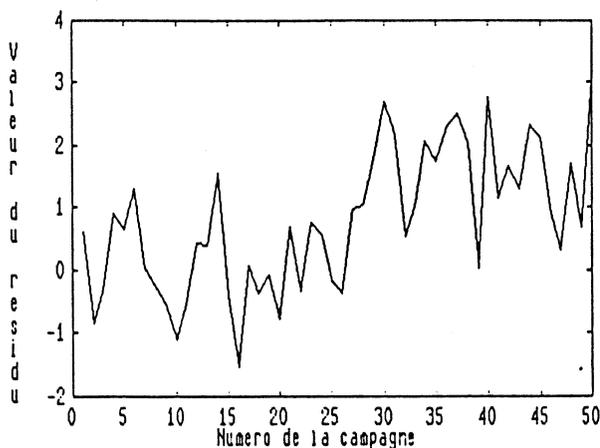


Figure 5 : Evolution temporelle d'un résidu

On y distingue nettement une rupture aux environs de la 28^{ème} campagne. La localisation précise de ces ruptures s'effectue dans le cas général à l'aide des nombreuses techniques utilisées classiquement en traitement du signal.

IV. CONCLUSION

L'importance des problèmes de la cohérence des informations prélevées sur les procédés industriels, notamment les procédés chimiques, n'est plus à démontrer. Au travers de cette très courte communication, les auteurs ont voulu présenter les méthodes élémentaires permettant d'établir des bilans matière statistiquement cohérents et mettre en évidence l'importance de l'analyse des résultats obtenus. Le logiciel L.V.D. développé dans le cadre de la collaboration avec la société C. d. F. Chimie est, pour l'instant, plus orienté "centre de recherche". Une version destinée à être implantée sur site industriel est en cours de définition. Celle-ci permettra l'édition de rapports journaliers et l'édition de "pseudo-alarmes" lors de la détection de mesures aberrantes.

Références bibliographiques

- (1) DAROUACH M., RAGOT J., FAYOLLE J., MAQUIN D., A.P.I.I., Vol. 20, 405-432, (1986)
- (2) DAROUACH M., RAGOT J., FAYOLLE J., MAQUIN D., Int. J. Min. Process., 17, 273-285, (1986)
- (3) MAQUIN D., DAROUACH M., FAYOLLE J., RAGOT J., Proceedings IMACS'86 Lille, 295-299, (1986)
- (4) MAH R.S.H., STANLEY G.M., DOWNING D.M., Ind. Eng. Chem. Process. Dev., Vol 15, N° 1, 175-183, (1976)
- (5) ROMAGNOLI J.A., Chem. Eng. Sci., Vol. 38, N° 7, 1107-1117, (1976)