

## APPLICATION D'ALGORITHMES GÉNÉTIQUES À LA SYNTHÈSE DE SYSTÈMES DE MESURES REDONDANTS

G. HEYEN<sup>(1)</sup>, C. GERKENS<sup>(2)</sup>

- ♦ (1) LASSC, Université de Liège, Sart Tilman B6, B4000 Liège (Belgique)  
e-mail : G.Heyen@ulg.ac.be; Belgique
- ♦ (2) LASSC, Université de Liège, Sart Tilman B6, B4000 Liège (Belgique)  
e-mail : Carine.Gerkens@student.ulg.ac.be; Belgique

**Abstract :** A systematic approach is proposed, allowing to design a sensor network able to identify all key variables of a process with a prescribed accuracy, at the lowest cost, and to preserve the redundancy of the measurement system, even in case of failure of a single sensor. The proposed method is based on a linearised process model, derived automatically from a general, non-linear validation model. A genetic algorithm is used to select the sensor types and locations.

**Keywords :** optimal design, sensor, measurement validation, genetic algorithm

**Résumé.** Une approche systématique est proposée, permettant de concevoir le réseau de capteurs capable, au moindre coût, d'identifier les variables clés d'un procédé sans dépasser une certaine imprécision sur les mesures, et de générer un système de mesures valable même si un des capteurs tombe en panne. Cette méthode se base sur un modèle linéarisé dérivant directement d'un modèle de validation de données non linéaire. Un algorithme génétique est utilisé pour choisir les types de capteurs et leur position dans le procédé

**Mots Clés.** conception optimale, capteur, validation de mesures, algorithme génétique

### I. POSITION DU PROBLÈME

Un réseau de capteurs est indispensable à la connaissance des conditions opératoires de tout procédé afin d'être capable de le contrôler et de vérifier le respect des contraintes de sécurité. Cependant, les capteurs industriels sont toujours affectés d'erreurs de mesure plus ou moins grandes et, leurs coûts d'achat, d'installation et de maintenance ne sont pas négligeables. Il apparaît en outre que certaines variables dont la connaissance est importante, comme par exemple l'efficacité d'un échangeur ou d'un compresseur, les coefficients de transfert de chaleur, l'avancement des réactions, ne sont pas toujours directement mesurables au moyen d'un capteur.

La méthode de validation de données permet, à condition d'avoir un système de mesure redondant, de calculer sans grande incertitude la valeur de ces variables non mesurables, d'augmenter la précision sur les variables mesurées et de détecter le dysfonctionnement d'un appareil de mesure ou d'une unité du procédé. La validation de données est à l'heure actuelle généralement utilisée pour le contrôle des procédés.

A ce jour, peu d'études ont été réalisées sur la façon de concevoir un réseau de capteurs permettant au moindre coût le calcul de certaines variables clés du procédé avec une précision déterminée et possédant la redondance nécessaire à la détection de pannes éventuelles d'appareils de mesure ou d'unités du procédé. Les études de Madron [1], qui a résolu le problème pour les bilans de matière ne comprenant que des équations linéaires grâce à une méthode de graphes orientés, et de Bagajewicz [2], qui s'est penché sur les bilans de matière dont les équations de contraintes sont toutes linéaires, peuvent néanmoins être citées.

L'étude développée ci-après a pour objectif d'étendre les études réalisées précédemment à des problèmes plus généraux dont les équations de contraintes ne sont pas nécessairement toutes linéaires et incluant les bilans d'énergie.

Le programme proposera le réseau optimum de capteurs à partir d'une table de données reprenant les différents capteurs les plus fréquemment utilisés, leur coût annuel, l'écart type des mesures, le type de variables qu'ils peuvent mesurer ainsi que le domaine de validité des mesures.

Le réseau de capteurs le plus approprié au procédé étudié est déterminé par une méthode d'optimisation utilisant un algorithme génétique. La fonction objectif à minimiser a pour principale contribution la somme des coûts annualisés des capteurs choisis. En cas de non respect des précisions demandées pour les variables clés du procédé ou d'une trop grande incertitude sur les variables non mesurées, des pénalités supplémentaires viennent s'ajouter à la fonction objectif.

Les équations de contraintes sont obtenues par linéarisation du modèle du procédé dans les conditions nominales de fonctionnement. Les variables d'état associées à ces équations sont la température, la pression et les débits molaires partiels des différents flux constituant le procédé. Des équations de liaisons s'ajoutent aux équations de contraintes afin d'établir le lien entre les variables d'état et les mesures, ou entre les variables clés non mesurables et les mesures. Par exemple : le débit molaire total d'un flux n'est pas mesurable, mais peut être

estimé sachant que le débit massique total du flux est la somme des débits molaires partiels du flux pondérés par la masse molaire des composants ; les fractions molaires ou massiques doivent également être reliées aux débits molaires partiels via des équations de lien pour chaque position possible d'un analyseur.

Afin de simplifier les calculs de variance, toutes les variables du problème sont considérées comme mesurées, les variables non mesurées étant affectées d'une imprécision très grande sur la mesure ( $10^{15}$ ).

Le problème de validation de donnée est un problème de minimisation avec contraintes. Il revient à minimiser :

$$\text{Min}_{X,Y} (Y - y)^T P (Y - y) \quad (1)$$

$$\text{sous la contrainte } F(X, Y) = A Y + B = 0$$

avec

- $y$ , le vecteur des valeurs mesurées ;
- $Y$ , le vecteur des valeurs validées ;
- $X$ , le vecteur des valeurs non mesurées ;
- $P$ , la matrice de pondération. Il s'agit une matrice diagonale dont chaque élément  $P_{ii}$  est l'inverse de la variance de la mesure  $i$ .

Ce problème contraint peut se ramener à un problème non contraint grâce aux multiplicateurs de Lagrange :

$$\text{Min}_{X,Y,\lambda} L \quad \text{avec } L = (Y - y)^T P (Y - y) + 2 \lambda (A Y + B) \quad (2)$$

Soit, en le résolvant pour les conditions stationnaires :

$$\begin{bmatrix} Y \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & A^T \\ A & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P y \\ -B \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} P y \\ -B \end{bmatrix} \quad (3)$$

où  $A$  est la matrice Jacobienne du modèle.

La variance des valeurs validées est une fonction des variances des mesures [3] :

$$\text{var}(Y_i) = \sum_{j=1}^m \frac{(M^{-1})_{ij}^2}{\text{var}(y_j)} \quad (4)$$

L'inverse  $M^{-1}$  de la matrice de sensibilité est obtenue par une factorisation LU de la matrice de sensibilité  $M$ . La ligne  $i$  de la matrice inverse est obtenue par substitution en arrière en utilisant la matrice des facteurs de la décomposition LU et un vecteur situé à droite de cette matrice et dont les éléments sont données par le facteur de Kronecker  $\delta_{ij}$  ( $\delta_{ij} = 1$ , si  $i = j$  et  $\delta_{ij} = 0$ , si  $i \neq j$ ).

## II. DESCRIPTION DE L'ALGORITHME

Le programme permettant de trouver le réseau de capteurs optimum se décompose en huit étapes :

1. Modélisation du procédé
2. Solution du modèle pour les conditions opératoires nominales
3. Création d'une banque de données pour les capteurs
4. Création d'une liste de variables qui doivent être connues avec une précision déterminée
5. Détermination de l'ensemble des capteurs possibles
6. Test d'existence d'une solution
7. Optimisation du réseau de capteurs
8. Génération d'un rapport

### II.1. Modélisation du procédé

Le procédé est modélisé grâce au logiciel de validation de données Vali III développé par la société BELSIM [3].

Les substances chimiques utilisées dans le procédés sont tout d'abord sélectionnées et, pour chaque type de flux matériel, le modèle de calcul des différentes propriétés physiques et thermodynamiques est choisi parmi la série de modèles proposés par Vali III.

Le procédé est construit en représentant les opérations unitaires au moyen d'icônes (figure 1). Ces unités sont reliées entre elles par des flux de matière, de puissance thermique et d'énergie mécanique.

**Supprimé :** belge

**Supprimé :** S.A. (rue Georges Berotte 29A, B-4470 Saint-Georges-sur-Meuse)

**Supprimé :** sous forme

**Supprimé :** dans un «process flow diagram »

**Supprimé :** réalisées par le procédé.

Les valeurs des variables connues dans les conditions nominales de fonctionnement sont spécifiées dans le logiciel. Le nombre de spécifications doit être au moins égal au nombre de degrés de liberté du système afin de permettre la résolution du système d'équations. Les redondances ne sont pas interdites : elles apportent de l'information supplémentaire et l'algorithme de validation de données donne une solution au sens des moindres carrés.

Cependant, toutes les variables mesurables ne sont pas des variables d'état. C'est le cas notamment des débits massiques et molaires totaux, des débits massiques et volumiques partiels, des fractions molaires et massiques, des densités, les points d'ébullition... Ces variables sont des variables supplémentaires et n'apparaissent pas dans les équations du modèle, c'est pourquoi des équations de liaison les reliant aux variables d'état doivent être rajoutées à l'ensemble des équations du modèle. Vali III crée automatiquement les équations de lien pour des types de mesures standard comme ceux précédemment cités.

Les unités du procédé peuvent également comprendre des paramètres qui doivent être connus avec une certaine précision, il s'agit, par exemple, de l'efficacité d'un compresseur ou d'une turbine, de la puissance calorifique ou du coefficient d'échange d'un échangeur de chaleur, des pertes de charges,... Ces différents paramètres entraînent eux aussi la création d'équations de liaison supplémentaires. Le choix de variables supplémentaires est important car la plupart des variables d'état ne sont pas mesurables : il n'existe pas d'instrument pour mesurer les flux molaires partiels, les enthalpies,...

## II.2. Solution du modèle pour les conditions opératoires nominales

Lorsque le modèle du procédé est disponible, le problème de validation peut être résolu soit par la méthode des multiplicateurs de Lagrange, soit par la programmation quadratique séquentielle (SQP). Lorsque la solution est trouvée, toutes les valeurs des variables d'état et des variables supplémentaires sont connues avec leur incertitude et l'analyse de sensibilité est réalisée.

Le rapport de sensibilité permet de connaître, pour chaque variable  $i$  du procédé, sa valeur réconciliée, son écart type après validation, les variables dont la variance contribuent à l'estimation de sa variance validée, les coefficients de sensibilité reliant la valeur validée de la variable à sa valeur mesurée et à son écart type [4]. Un fichier comprenant les valeurs de toutes les variables du procédé, les éléments non nuls de la matrice Jacobienne et les équations du modèle. Chaque variable est identifiée par un nom unique, par exemple, 5\_MFNH3 est la fraction molaire d'ammoniaque dans le flux 5.

## II.3. Création d'une liste de capteurs

Les types capteurs pouvant potentiellement être installés dans le procédé sont inscrits dans un fichier texte, avec pour chacun d'eux, les paramètres suivants :

- Le nom du capteur ;
- Le coût annualisé de ce capteur (rapport de la somme des coûts d'achat, d'installation, de maintenance et de fin de vie du capteur au nombre d'années d'utilisation de ce même capteur) ;
- Les paramètres  $a_i$  et  $b_i$  de l'équation permettant l'estimation de la précision  $\sigma_j$  du capteur sur la valeur de la variable mesurée  $y_j$  :

$$\sigma_j = a_i + b_i y_j \quad (5);$$

- Le type de mesure (variable de flux ou d'unité) ;
- Les valeur minimale et maximale du domaine de mesure ;
- Un sigle représentant le type de variable qui peut être mesuré par le capteur. Par exemple, un thermocouple sera caractérisé par le sigle « T », une sonde à oxygène par le sigle « MFO2 », un chromatographe mesurant n'importe quelle fraction molaire portera le sigle « MF\* »,...

## IV.4. Création de la liste des variables qui doivent être connues avec une précision déterminée

Certaines variables clés du procédé doivent être connues avec une certaine incertitude maximale. Ces variables clés sont regroupées dans un fichier texte donnant pour chaque variable :

- Le nom de la variable (nom du flux ou de l'unité suivi du sigle représentant, dans Vali III, le type de variable mesurée) ;
- La précision maximale demandée. Cette précision peut être donnée sous forme de valeur absolue ou sous forme d'un pourcentage de la valeur mesurée ou estimée.

## IV.5. Détermination de l'ensemble des capteurs possibles

Pour chaque variable du procédé, chaque capteur de la liste de capteurs est examiné. Si le sigle du capteur correspond au sigle de la variable, le capteur est un capteur potentiel pour cette variable et un nouveau gène binaire est créé. Le nombre de gènes par chromosome sera égal au nombre de capteurs possibles pour le procédé étudié. Dans la suite du programme, si un capteur potentiel est choisi par l'algorithme génétique pour faire partie du réseau de capteurs du procédé, le gène correspondant aura la valeur 1. Si le capteur n'est pas choisi par l'algorithme, il aura la valeur 0.

#### IV.6. Le problème peut-il être résolu ?

Avant d'optimiser le réseau de capteur, l'algorithme doit vérifier qu'une solution existe. Pour ce faire, il considère le cas où tout les capteurs possibles font partie du réseau de capteurs choisis. Le programme résout ensuite le problème de validation de données pour ce cas particulier. Si plusieurs capteurs sont possibles pour une même variable, c'est l'écart type du plus précis d'entre eux qui est pris en considération. Ce réseau de capteurs particulier permet également de déterminer le coût annuel maximum permettant d'obtenir un système de mesure valable pour le procédé étudié.

- Le problème a une solution si les conditions suivantes sont respectées :
- La matrice de sensibilité  $M$  n'est pas singulière ;
- La précision sur chacune des variables clés figurant dans le fichier « target.txt » est inférieure à l'incertitude maximale tolérée sur chacune de ces variables.

Plusieurs méthodes peuvent être exploitées afin de satisfaire à la seconde condition :

- Ajouter dans la liste de capteurs « sensor.txt » des capteurs plus précis s'il en existe sur le marché ;
- Ajouter dans la liste de capteurs « sensor.txt » des capteurs permettant de mesurer d'autres types de variables ;
- Ajouter, dans le modèle du procédé, d'autres variables supplémentaires ainsi que les équations de liaison correspondantes, permettant ainsi de mesurer des variables supplémentaires. Ajouter, dans la liste de capteurs, d'autres capteurs capables de mesurer, s'il n'y en avait pas encore, les variables supplémentaires précédemment ajoutées.

Si la deuxième condition n'est toujours pas respectée, l'algorithme génétique cherchera tout de même le réseau de capteurs donnant la meilleure valeur de la fonction objectif, en précisant bien que cette condition n'est pas respectée. Le non respect de cette condition se marquera également dans la valeur de la fonction objectif : en effet, une pénalité proportionnelle au rapport de l'incertitude obtenue après validation à l'incertitude maximale tolérée sera alors ajoutée à la fonction objectif si ce rapport est supérieur à l'unité.

#### IV.7. Optimisation du réseau de capteurs

Sachant que le premier critère d'existence d'une solution est satisfait, la recherche de la meilleure solution peut commencer. La solution optimale sera celle pour laquelle la fonction objectif sera maximum. La fonction objectif (Fitness) est calculée comme suit :

- Si la matrice de sensibilité est singulière (sauf dans le cas du test d'existence d'une solution) :

$$Fitness = -CostMax * PenalSing$$

avec CostMax, le coût annualisé pour l'ensemble des capteurs possible et PenalSing, le facteur de pénalité pour une matrice de sensibilité singulière.

- Si la matrice de sensibilité n'est pas singulière :

$$Fitness = -Cost - \sum_{i=1}^{Nt \text{ arg et}} PenalVar_i - \sum_{i=1}^{N \text{ var}} PenalVariable_i - ValFitPrim \quad (7)$$

- avec Ntarget, le nombre de variables clés dont l'incertitude ne doit pas dépasser l'incertitude maximale tolérée et Nvar, le nombre de variables du procédé ; Cost, le coût pour le réseau de capteurs choisi ; PenalVar, la fonction de pénalité pour le non respect de la précision demandée sur les variables clés du procédé, PenalVariable, la fonction de pénalité pour les variables ayant un écart type validé trop important et ValFitPrim, la fonction de pénalité maximale lorsque les capteurs du réseau sont enlevés tour à tour.

Le problème à optimiser comprend un nombre de variables binaires de l'ordre de grandeur de « nombre de flux\*nombre de capteurs dans la base de données » et la fonction objectif est multimodale dans de nombreux cas. Comme le problème est fortement combinatoire et non différentiable, un algorithme génétique a été utilisé afin de le résoudre [5]. Le code utilisé est basé sur le code développé par Carroll [6]. La sélection des parents s'effectue via la méthode du choix entre deux parents potentiels. L'algorithme évolutif comprend les méthodes de croisement en un point, croisement uniforme et deux types de mutations.

Le chromosome initial est celui qui a servi au test d'existence d'une solution. Les autres chromosomes de la population initiale sont générés au hasard de telle manière que, pour tout chromosome, chaque capteur ait une grande probabilité d'être sélectionné (typiquement de l'ordre de 80 %). Ce paramètre ainsi que la population initiale n'est cependant pas critique. Des problèmes comportant plusieurs centaines de variables ont pu être résolus en suivant l'évolution de populations de 10 à 40 gènes (20 gènes dans la majorité des cas).

Chaque fois qu'une population a été générée, la fonction objectif de chacun de ses chromosomes doit être évaluée. Pour commencer, le coût total annualisé du réseau de capteurs choisi et représenté par le chromosome est calculé en faisant la somme des coûts annualisés de chacun des capteurs faisant partie du réseau. Ensuite, la matrice de sensibilité  $M$  pour le réseau de capteurs doit être construite et factorisée. Dans un premier temps, le sous-programme « MA29AD » de la bibliothèque Harwell [7] permettant la factorisation de

toute matrice symétrique a été utilisée. Cependant, il s'est avéré que, pour des problèmes comprenant un grand nombre de variables, le temps de calcul gagné en tenant compte du fait que la matrice de sensibilité comprend un grand nombre de zéro était loin d'être négligeable. L'utilisation du sous-programme utilisé par Belsim pour factoriser ce type de matrice et inspiré de l'article de Chen et Stadtherr [8] a permis de réduire le temps de calcul d'un facteur vingt-cinq pour un système comprenant 312 variables et sera donc utilisé pour inverser les matrices de sensibilité dans la suite de cette étude.

L'écart type est alors calculé pour toutes les variables du procédé par la formule (4). La fonction de pénalité, PenalVar permet d'augmenter très faiblement la fonction objectif pour les variables clés du procédé qui sont connues avec une incertitude inférieure à l'incertitude maximale tolérée mais introduit des fortes pénalités dans le cas contraire.

Lors de chaque génération, le meilleur chromosome généré jusqu'alors est conservé et est dupliqué au cas où il subirait une mutation. Un graphe reprenant, pour chaque génération, la valeur de la fonction objectif du meilleur chromosome généré jusqu'alors ainsi que la fonction objectif moyenne de la génération est construit progressivement au cours de l'optimisation et est affiché à l'écran.

Après un nombre spécifié de générations, la valeur de la fonction objectif du meilleur chromosome et le coût du réseau choisi sont affichés à l'écran. Si aucun meilleur chromosome n'a pu être généré pendant un certain nombre de générations, le meilleur actuel chromosome est considéré comme étant la solution du problème. Il se peut que ce ne soit pas la solution optimale du problème mais elle est réalisable et meilleure que la solution initiale.

#### IV.8. Génération d'un rapport

Un fichier de rapport est généré par l'algorithme. Il contient, pour le meilleur réseau de capteurs, les informations suivantes : la liste des capteurs à installer dans le procédé, les écarts types validés pour toutes les variables du procédé et la comparaison entre les écarts types validés et les imprécisions maximales tolérées sur les variables clés du procédé.

### 3. EXEMPLE DE LA BOUCLE DE SYNTHÈSE D'AMMONIAC

La boucle de synthèse d'ammoniac implique 19 flux de matière, 10 flux utilitaires, 15 unités et 4 flux de puissance mécanique. Les unités du procédé sont deux étages de compression avec deux refroidisseurs, un mélangeur de flux pour le recyclage, un compresseur pour le recyclage, un préchauffeur, un réacteur, un vaporisateur d'eau, un refroidisseur à eau, un refroidisseur à ammoniac, deux séparateurs liquide-vapeur, un diviseur de flux pour la purge, un mélangeur de flux de puissance mécanique. Les flux de matière utilisés dans ce procédé sont composés de 5 substances : azote, hydrogène, ammoniac, méthane et argon) et les flux utilitaires d'eau ou de vapeur d'eau. La boucle de synthèse d'ammoniac implique 19 flux de matière, 10 flux utilitaires, 15 unités et 4 flux de puissance mécanique. Les unités du procédé sont deux étages de compression avec deux

Supprimé : d'ammoniac

Supprimé : d'ammoniac

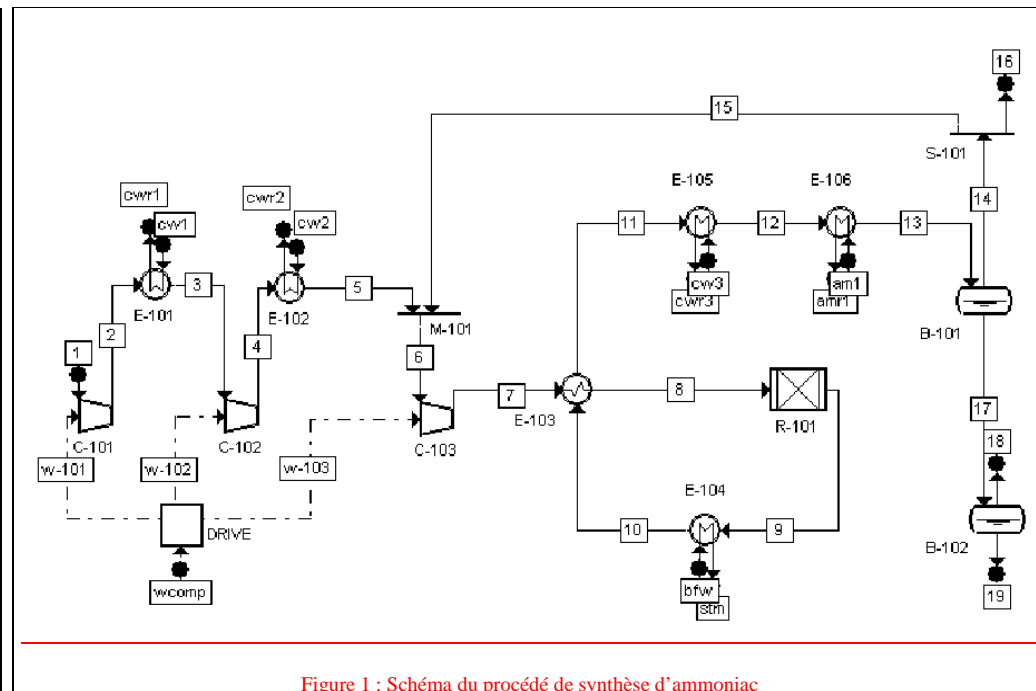


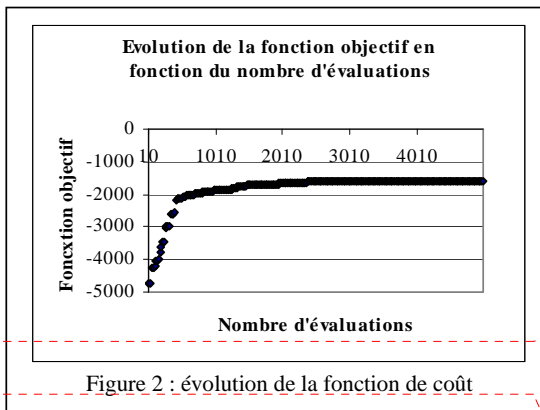
Figure 1 : Schéma du procédé de synthèse d'ammoniac

refroidisseurs, un mélangeur de flux pour le recyclage, un compresseur pour le recyclage, un préchauffeur, un réacteur, un vaporisateur d'eau, un refroidisseur à eau, un refroidisseur à ammoniac, deux séparateurs liquide-vapeur, un diviseur de flux pour la purge, un mélangeur de flux de puissance mécanique. Les flux de matière utilisés dans ce procédé sont composés de 5 substances (azote, hydrogène, ammoniac, méthane et argon) et les flux utilitaires d'eau ou de vapeur d'eau. Le modèle implique 148 équations de contrainte et 198 variables. Pour la résolution du système 54 variables clés ont été fixées.

Le système de mesure correspondant à l'ensemble des capteurs pouvant être choisis en vue d'une installation dans le procédé est constitué de 99 capteurs. La fonction objectif de ce réseau est de -6408.7.

Le réseau optimal de capteurs ainsi obtenu par l'algorithme génétique génère un système de mesures valable, comprenant 50 capteurs, à savoir 21 thermocouples, 1 chromatographe, 3 débitmètres, 12 capteurs de pressions et 13 capteurs virtuels de pertes de charge. Ces derniers sont nécessaires pour que le logiciel VALI soit en mesure de résoudre les équations permettant de reconstituer le profil de pression, même si leur utilité dans l'identification du procédé n'est pas déterminante. Nous avons tenu compte de cette particularité en associant un coût nul à ces capteurs.

La fonction objectif à une valeur de -1603.8 à l'optimum identifié après quelques centaines de générations, comme le montre la figure 2. Le temps de calcul est d'environ 2 secondes par itération pour une population de 20 individus.



**Supprimé :** La base de données pour les capteurs permet de choisir parmi des capteurs de précisions et de coûts différents. Les différents capteurs proposés sont : 3 thermocouples, 2 capteurs de pressions, 2 chromatographes, 3 débitmètres et un capteur virtuel de perte de charge.¶

**Supprimé :** 98 capteurs, ce qui implique un nombre total de réseaux de capteurs possibles de  $2^{98} = 3.2 \cdot 10^{29}$ .

**Supprimé :** 49

**Supprimé :** 11

**Supprimé :** Sa

**Supprimé :** -1573.4¶

**Supprimé :** CPU

#### 4. CONCLUSIONS

La méthode qui est proposée dans cet article permet bien de déterminer un réseau de capteurs qui soit valable et qui maximise la fonction objectif. Le système de mesure correspondant à ce réseau est nettement meilleur que le système de départ pour l'ensemble des capteurs pouvant être installés sur le procédé. Cependant, la fonction objectif pouvant être multimodale, la solution finale obtenue par l'algorithme génétique peut ne pas être la solution optimale. L'obtention d'un réseau de capteurs restant valable même en cas de panne d'un quelconque d'entre eux est une condition nécessaire au contrôle du procédé lors d'une panne, d'un dysfonctionnement ou de l'entretien d'un des appareils de mesure. C'est pourquoi une adaptation de la méthode permettant de satisfaire cette condition devrait voir le jour d'ici peu.

#### REFERENCES

- [1] Madron F., *Process Plant Performance Measurement and Data Processing for Optimisation and retrofits*, paragraphe 6.3, Ellis Horwood (1992)
- [2] Bagajewicz M.J., *Process Plant Instrumentation : Design and Upgrade*, chapitre 6, Technomic Publishing Company (1997)
- [3] Belsim, *Vali III User's Guide*, Belsim s.a., B-4470 Saint-Georges-sur-Meuse, Belgique (2001)
- [4] Heyen G., Maréchal E., Kalitventzeff B., *Sensitivity Calculations and Variance Analysis in Plant measurement Reconciliation*, Computers and Chemical Engineering, volume 20S, 539-544 (1996)
- [5] Goldberg D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley (1989)
- [6] Carroll D.L., *FORTRAN Genetic Algorithm Driver version 1.7*, téléchargé de <http://www.staff.uiuc.edu/~carroll/ga.html> (1998)
- [7] Harwell, *Harwell Subroutine Library*, Oxfordshire (1990)
- [8] Chen H.S., Stadtherr M.A., *On solving large sparse nonlinear equation systems*, Computers and Chemical Engineering, volume 8(1), 1-7 (1984)
- [9] Bagajewicz M.J., *Design and Retrofit of Sensor Network in Process Plant*, AIChE J., volume 43(9), 2300-2306 (2001)