

UTILISER LA MODELISATION POUR REpondre AUX DEFIS DE LA GESTION DES CENTRALES DE PRODUCTION D'ENERGIE

P. BAUDET (1), L. UMBER (2), P. CASTELAIN (1)

- ◆ (1) ProSim, Rue Ampère, Stratège, Bât A, BP2738,
F-31312 Labège Cedex
e-mail : philippe.baudet@prosim.net ; France
- ◆ (2) Usine d'Electricité de Metz, 2 place du Pontiffroy, BP 20129,
F-57014, METZ Cedex 01
e-mail : l-umber@uem-metz.fr ; France

Abstract. There are many industrial sectors involved in the cogeneration of heat and electricity (utilities, among others) from fossil fuels. Among them, petrochemicals (refining) and chemical conversion plants but also district heating networks. Paper mills, sugar refining and manufacturing plants also count among the major steam consumers.

In all cases, the problem remains the same: organizing production in the best possible way, day-to-day but also over time, within an economic context in full upheaval and subject to changing regulations and in a very constrained environment. I

The goal of this presentation is to propose concrete and reachable solutions that enable a rational and economically beneficial management of the energy production in large plants.

The presentation uses a case of the Usine d'Electricité de Metz (UEM) to illustrate the potential of a modelling, simulation and optimization software to answer to such issues. The Ariane software was actually used for the following applications:

- Technical and economical modelling of the plant
- Online optimization (real time and at a certain point of time)
- Automated, repetitive, predictive or retrospective calculation, integrating the notion of time-horizon (hour per hour, days after days, annual balance divided in weeks etc..)

Résumé. Les domaines industriels concernés par la production combinée de chaleur et d'électricité (entre autres utilités) à partir d'énergies fossiles sont nombreux, parmi lesquels la pétrochimie (raffinage), les grands centres de transformation chimique, mais aussi les réseaux de chauffage urbain, ou les grands consommateurs de vapeur que sont les papeteries et les centres de raffinage sucriers.

Quel que soit le type d'usine en question, la problématique reste la même : organiser au mieux la production, au jour le jour, en fonction des signaux tarifaires du moment et de la demande mais aussi établir un planning de production mensuel ou annuel, dans un contexte réglementaire et économique changeant et dans un environnement très contraint.

L'objectif de la présentation est de proposer des solutions concrètes et accessibles qui permettent de renforcer une gestion rationnelle et économiquement bénéfique de la production d'énergie dans les usines de grande taille.

La présentation s'appuie sur un cas concret, celui de L'Usine d'Electricité de Metz (UEM), pour illustrer le potentiel d'un logiciel de modélisation, de simulation et d'optimisation pour répondre à de telles problématiques.

Le logiciel Ariane a été utilisé pour les applications suivantes :

- Modélisation technico-économique de la centrale.
- Optimisation en ligne (« temps réel », à un instant donné).
- Calculs répétitifs automatisés, prédictifs ou rétrospectifs, intégrant la notion d'horizon de temps (heure par heure, jour après jour, bilan annuel par découpage en semaines, etc).

Mots Clés. énergie, utilités, gestion, réduction des coûts, optimisation, simulation

UTILISER LA MODELISATION POUR REpondre AUX DEFIS DE LA GESTION DES CENTRALES DE PRODUCTION D'ENERGIE

L'Usine d'Electricité de Metz (UEM)

L'usine d'électricité de Metz est un exemple de réseau de chauffage urbain. De façon très schématique, ce site produit deux utilités : l'eau chaude surchauffée pour alimenter le chauffage urbain de la ville et l'électricité. Pour ce faire, la centrale consomme deux combustibles: le charbon et le gaz naturel.

Une usine d'incinération produit également de la vapeur utilisée par la centrale de production.

Structure de l'usine de production

La centrale se compose de :

- 3 réseaux vapeur (60 bars (HP), 12 bars (MP) et 2,5 bars (BP)) ;
- 4 chaudières à charbon, deux générant de la vapeur sur HP, deux générant de la vapeur sur MP
- 1 dégazeur fournissant l'eau alimentaire aux chaudières à charbon et aux chaudières de récupération.
- 1 turbine à combustible au gaz naturel (« turbine à gaz ») avec une cascade d'échangeurs de récupération sur les fumées permettant de récupérer de la vapeur HP, de la vapeur MP et permettant au final un préchauffage du réseau d'eau surchauffée (économiseur).
- 2 turbines à condensation connectées au réseau MP, produisant de l'électricité et recyclant les condensats vers le dégazeur.
- 1 turbine à contre-pression et à soutirage connectée entre les réseaux HP, MP et BP.
- 1 turbine à contre-pression et à soutirage fonctionnant entre HP et MP (turbine à soutirage), l'échappement (pression de sortie fixée à 1,5 bars) alimentant un réchauffeur du réseau d'eau surchauffée.
- Plusieurs vannes de désurchauffe, disponibles entre les réseaux, en particulier les vannes de contournement des turbines à soutirage.
- Un réseau d'eau surchauffée permettant le réchauffage de la boucle d'eau. Ce réseau est constitué séquentiellement de l'économiseur précédemment mentionné, du réchauffeur utilisant la vapeur d'échappement de la turbine à soutirage, d'un second réchauffeur utilisant de la vapeur BP et enfin d'un préparateur d'eau permettant d'ajuster la température de sortie de l'eau par injection de vapeur MP (le trop plein du préparateur est recyclé vers le dégazeur).

Par ailleurs, la centrale peut importer de la vapeur d'une usine voisine. Cet apport extérieur est fatal (débit fixé), à un prix prédéterminé. La centrale alimente l'usine voisine en eau dégazée (nécessaire à la production de vapeur).

Contraintes de production

La contrainte de production majeure consiste à fournir la puissance thermique de consigne au réseau d'eau surchauffée. En fonction du jour (dans l'année) et de la température ambiante, la consigne est une puissance thermique qui se traduit sous la forme d'un débit et d'une température, pour la production d'eau surchauffée. Concrètement, le débit d'eau du réseau d'eau surchauffée varie entre 150 et 1300 t/h. La contrainte de production consiste donc à réchauffer le débit de circulation de sa température de retour (ordre de grandeur 80 °C) à sa température de consigne, (dite « température de départ centrale », entre 140 et 180 °C, en fonction de la température extérieure).

Parallèlement, la production électrique « co-générée », obtenue par la turbine à combustible et les quatre turbines à vapeur (2 turbines à soutirage, 2 turbines à condensation), est revendue.

Difficultés d'organisation de la production et objectifs du projet de rationalisation

La difficulté d'organisation consiste à décider de l'engagement des différents matériels, au regard de la charge de production. En fonction de la consigne sur le réseau de chauffage urbain, des tarifs d'achat de matière première et du tarif de revente de l'électricité, quel doit être l'engagement de la turbine à gaz, des chaudières et des différentes turbines ?

Le problème résultant est donc technico-économique, l'objectif étant de minimiser le coût de production (ou maximiser le gain de production) en respectant les consignes de puissance thermique sur le réseau d'eau surchauffée et en utilisant un modèle de représentation de l'usine qui soit fiable et réaliste, du point de vue des contraintes techniques de production, tout particulièrement.

Modélisation

L'approche retenue dans Ariane est une approche modulaire. Chaque « équipement » (au sens large du terme, une chaudière est un équipement, un réseau aussi) génère son propre système d'équations et le modèle global est construit à partir de la sommation de ces contraintes locales, à laquelle on ajoute les contraintes globales (contraintes d'émissions polluantes, contraintes d'approvisionnement...). Il n'est pas possible ici de détailler l'intégralité des équations manipulées. Nous focalisons la modélisation sur le cas de la chaudière à charbon et d'une turbine à vapeur.

Modèles d'équipement : chaudière à charbon

De façon très schématique, le combustible est représenté par un prix et un PCI (en fait, il peut être décrit de façon beaucoup plus détaillée, notamment en termes de composition pour la caractérisation des émissions polluantes...).

La chaudière utilise la notion de rendement. Le rendement est modélisé comme une fonction quadratique de la charge enthalpique de la chaudière :

$$\eta^{\circ} = a.Q^2 + b.Q + c$$

avec :

η°	rendement de référence,
Q	charge utile de la chaudière (variation de débit enthalpique entre entrée et sortie de la chaudière),
a, b, c	paramètres de la courbe de rendement renseignés par l'utilisateur.

Le rendement est défini pour des conditions de référence en termes d'air entrant (température, excès). Il est corrigé automatiquement si les conditions opératoires pour l'air entrant diffèrent de l'état de référence, soit en température, soit en excès.

$$Q_{comb} = \frac{Q}{\eta_1 \cdot PCI}$$

avec :

Q_{comb}	débit de combustible consommé,
Q	charge utile de la chaudière,
η_1	rendement corrigé de la chaudière,
PCI	pouvoir calorifique inférieur du combustible (= PCS / 1.1).

Modèles d'équipement : turbine

Une turbine (ou une association de turbines pour les turbines à soutirage et les turbines à condensation) est caractérisée par la notion de rendement isentropique. Ce rendement est modélisé comme une fonction quadratique de la puissance réelle produite :

Equation de conservation de l'entropie :

$$S_e(T_e, P_e) = S_s(T_s^*, P_s)$$

Equation de calcul du travail maximum dans les conditions isentropiques :

$$W_{\max} = H_e(T_e, P_e) - H_s(T_s^*, P_s)$$

avec :

S_e, S_s	entropies d'entrée et de sortie de la vapeur,
H_e, H_s	enthalpies d'entrée et de sortie de la vapeur,
W_{\max}	travail maximum fournie par la turbine (sous forme d'électricité),
T_e	température flux entrant,
P_e	pression flux entrant,
P_s	pression flux sortant,
T_s^*	température du flux sortant dans des conditions isentropiques.

Equation de rendement isentropique :

$$\eta = \frac{W_{\text{réel}}}{W_{\max}} = \frac{H_e(T_e, P_e) - H_s(T_s, P_s)}{H_e(T_e, P_e) - H_s(T_s^*, P_s)}$$

avec :

η	rendement isentropique de la turbine,
$W_{\text{réel}}$	travail réel fourni par la machine.

Expression du rendement sous forme quadratique :

$$\eta = a * W_{\text{réel}}^2 + b * W_{\text{réel}} + c$$

où a, b, c sont des coefficients définis par l'utilisateur pour caractériser la turbine. Ces coefficients intègrent implicitement le rendement énergétique de la chaîne mécanique et du turbo. A partir de là, la résolution permet d'accéder au travail réel fourni par la turbine (électricité générée sur le site). Il est à noter que le travail s'exprime en kW dans l'expression précédente du rendement.

Globalement, chaque équipement est représenté par un système d'équations qui diffère selon les choix de l'utilisateur. Au final, compte tenu des options de modélisation retenues, le système à résoudre est non linéaire (au moins pour le modèle de représentation des réseaux qui se formulent sous la forme d'un mélangeur idéal, générant une équation de bilan énergétique bi-linéaire ($\sum_{i=1}^{Ne} F_i \cdot H_i = F_{mel} \cdot H_{mel}$)). Il est résolu en simulation par une méthode de Newton multi-variables et en optimisation par une méthode de programmation quadratique successive (SQP), intégrée au sein du calculateur.

L'intérêt évident de la méthode est la génération automatique du problème mathématique, à partir de données renseignées par l'utilisateur au niveau de l'interface graphique (paramètres de la courbe de rendement, conditions opératoires, contraintes techniques, mode de fonctionnement...). Le modèle peut donc être modifié très aisément (ajout d'un équipement et des contraintes associées ou modification des paramètres des courbes de rendement par exemple, modification des consignes de production, des tarifs...). Le logiciel dispose également d'une méthode d'initialisation efficace, pour les calculs d'optimisation.

Concordance modèle / mesures

Compte tenu des données disponibles sur site, le modèle de représentation des équipements peut être influencé.

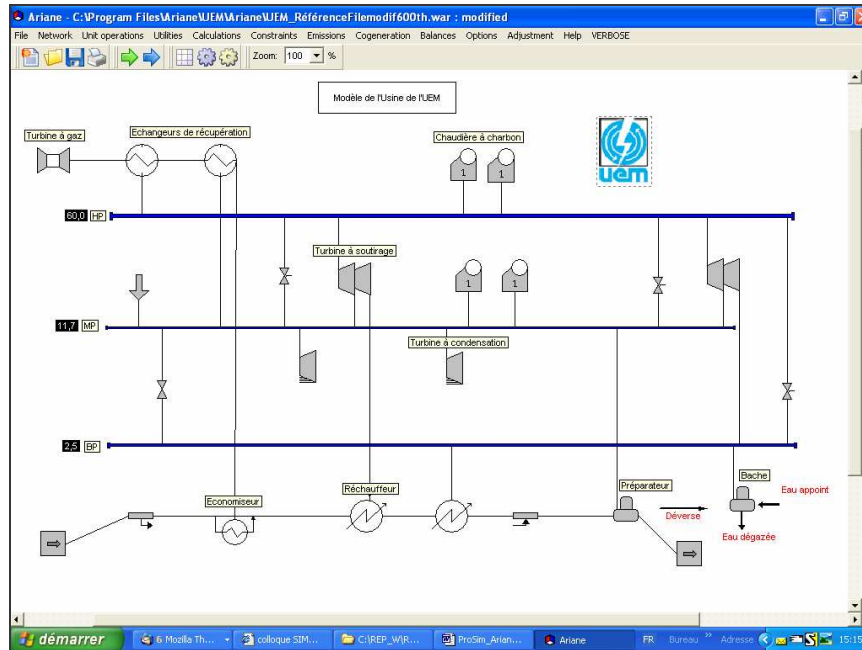
Par exemple, pour les chaudières, le débit de combustible entrant n'est pas mesuré, contrairement au débit vapeur généré. Pour les chaudières, le mode de représentation retenu pour la simulation est donc un mode « à débit de vapeur fourni ».

Dans le même esprit, les turbines ne sont pas parfaitement équipées en instruments de mesure des débits. En revanche, les puissances électriques sont accessibles. Il a donc été retenu des modèles « à puissance fournie » pour les turbines à vapeur.

La construction du modèle global obéit donc à un certain nombre de règles, et dépend notamment de la disponibilité des mesures pour caractériser le cas de marche de la centrale.

Modèle de la centrale avec Ariane

Le modèle de centrale de l'UEM obtenu avec le logiciel ARIANE, est présenté sur la figure ci-après.



Calculs avec le modèle développé dans ARIANE

Avec le modèle disponible, le potentiel de calcul est important et offre des possibilités diverses :

- **Simulation** : à partir de données, la simulation permet de caractériser un cas de marche, c'est à dire de chiffrer le *coût de production* (coût d'exploitation incluant éventuellement la maintenance et l'investissement). Si les données entrées sont les mesures du moment, sur site, la simulation chiffre exactement le coût de production instantané.
- Ce coût d'exploitation est également formulé sous la forme de *coûts moyens* de production pour tous les fluides de la centrale et pour l'électricité produite dans tous les équipements.
- En relâchant certaines contraintes choisies, le problème se transforme en problème d'**optimisation**. L'optimiseur va *minimiser le coût d'exploitation* et fournir le cas de marche optimal (engagement de chaque matériel de façon à optimiser la production, d'un point de vue économique), tout en respectant les contraintes techniques définies.
- A partir d'un cas courant, *le calcul des coûts marginaux* est également possible, pour chaque utilité produite.

Calculs systématiques

Structuration des données - Lien au système de contrôle - Optimisation en ligne

Les données et résultats du modèle de la centrale ont été architecturés sous la forme d'une arborescence xml (transfert automatique d'un modèle Ariane au format xml). Cette arborescence permet une manipulation plus intensive des données, et autorise l'importation massive des données, notamment en provenance du système de contrôle du site.

La connexion au système de contrôle étant effectuée, il est alors possible de lancer des calculs en injectant en bloc dans le logiciel toutes les mesures temps réel du site.

En une seule action, l'outil permet ainsi de récupérer les données temps réel, de lancer les calculs (simulation et/ou optimisation) et d'archiver les résultats : *l'outil mis en œuvre est un calculateur en ligne.*

Add-In

L'arborescence xml procure déjà une facilité d'utilisation du modèle, en terme d'entrée des données et d'exportation des résultats. L'encapsulation de cette architecture sous la forme d'un objet COM/DCOM permet d'aller encore plus loin dans le processus, en offrant la possibilité de piloter le calculateur depuis n'importe quelle application supportant cette technologie. L'Add-In d'Ariane ainsi conçu peut donc s'utiliser depuis Excel pour réaliser les séquences suivantes :

- ✓ Récupérer les données d'intérêt
- ✓ Transformer les données lorsque nécessaire (ébauche de réconciliation)
- ✓ Lancer tout type de calcul
- ✓ Récupérer les résultats directement dans l'application Excel

L'avantage principal de cette Add-In est la possibilité de réaliser des boucles de calcul, pour représenter des séquences de production, des périodes successives (multi-périodes) ou plusieurs sites (multi-sites). La réalisation de bilan peut par exemple se faire très simplement en réalisant une boucle sur tous les cas de marche archivés de la période visée par le bilan.

Utilisation de l'outil et perspectives d'évolution

La mise en ligne sur le site de l'UEM étant, à ce jour, encore récente, il est prématuré de tirer des conclusions sur les gains financiers générés suite à ce projet de mise en œuvre de l'outil sur site.

Ce qui est certain, c'est que la mise à disposition d'un modèle de représentation fiable du site de production constitue déjà une étape fondamentale dans un processus de rationalisation de la production. L'évolutivité du modèle (possibilité d'ajout de contraintes supplémentaires, ajout de nouveaux équipements, modification aisée des paramètres de modélisation des équipements...) garantit une utilisation continue sur le long terme, le modèle évoluant simplement en même temps que la réalité du site de production.

L'utilisation systématique de l'outil, c'est à dire le recours au modèle pour gérer la production en temps réel présente un potentiel de gain non négligeable, à la fois en terme de temps (la solution de production est fournie quasi-instantanément) mais également en termes financiers (garantir une politique de production économiquement optimale et techniquement réaliste, à chaque instant).

Par ailleurs, l'utilisation de l'Add-In offre la possibilité de réaliser des bilans extrêmement précis. A titre d'exemple, le bilan annuel des émissions polluantes (CO₂, SO₂) peut être réalisé par une simple compilation automatique de tous les cas de marche archivés de l'année. C'est ici encore un gain en temps et en précision. Enfin, la préparation des budgets (prévision des achats de matière première sur l'année) peut aussi être réalisée de façon très fine.

Une dernière étape peut encore être franchie, pour gérer complètement les contraintes à horizon de temps, en les intégrant au sein du système à optimiser. Les travaux sont en cours sur ce sujet et conduiront au final à **un véritable outil de planification de la production** (optimisation multi-périodes « vraie »), capable par exemple d'optimiser la production dans le cadre d'un contrat de cogénération d'électricité sur période hivernale. Si N cas de marche représentent une période, l'Add-in permet pour l'instant de réaliser N optimisations successives (et indépendantes) et de calculer les résultats sur toute la période (totalisation des N résultats). La planification permettra d'imposer une production ou une contrainte sur la période et d'ajuster les productions des N cas de marche de façon à obtenir un optimum global sur toute la période.