

# L'âge du cuivre

Solution de planification et d'optimisation de la production du cuivre

Iiro Harjunkoski, Gerald Beykirch, Markus Zuber, Hans-Jürgen Weidemann



La production du cuivre est un processus aux nombreuses interactions et influencé par des facteurs externes comme l'offre et la demande. Or la somme des optimums locaux n'est pas l'optimum du système global et des goulets d'étranglement ou ruptures de stock surviennent du fait d'opérations aux temps de cycle hétérogènes. Ajoutez à cela les arrêts de maintenance et les aléas, et optimiser le processus complet devient une entreprise herculéenne.

La solution logicielle de planification des sites de production de cuivre prend les choses en main et optimise leur fonctionnement tout au long d'un parcours semé d'embûches.



**L**e cuivre, plus ancien métal travaillé par l'homme depuis plus de 10000 ans, a toujours joué un rôle important au quotidien. Aujourd'hui, «l'or rouge» compte de nombreux débouchés dans le bâtiment, l'appareillage électrique, l'électronique, les transports, les biens de consommation et les biens d'équipement. Présent partout, il intervient dans la fabrication de produits aussi différents que les voitures, les navires, les canalisations et les équipements de télécommunication. Singulièrement, de nombreux aliments (légumes, fruits,

céréales, féculents, viandes, fruits de mer, chocolat, eau potable) contiennent cet oligo-élément indispensable à notre santé.

Le cuivre est également un matériau voué à un bel avenir, non seulement pour ses nombreux débouchés dans des marchés industriels en croissance rapide, mais également parce qu'il offre des propriétés uniques et est 100% recyclable sans perte de qualité ni de valeur au cours de son affinage. La consommation mondiale de

cuivre a augmenté de plus de 25% au cours de la dernière décennie, essentiellement dans les économies asiatiques en développement rapide. On prévoit que les secteurs industriels gros consommateurs de cuivre continueront de croître et de peser sur la demande. De même, la production minière mondiale a régulièrement progressé aux cours des 100 dernières années. Récemment, les régions les plus actives étaient l'Amérique du Sud et l'Indonésie. De nos jours, à l'image du pétrole, son cours est fixé sur un

## Productivité

marché mondial, obligeant à accroître les volumes de production et à identifier des gisements de productivité au sein des sites industriels existants.

La production du cuivre est complexe; ses nombreuses interactions rendent difficile toute prévision de l'incidence d'une décision locale sur le processus global. La variabilité de la matière première a un fort impact sur les opérations alors que les nombreux aléas et pannes de machines nécessitent des interventions de maintenance quotidiennes et créent des goulets d'étranglement.

Une solution logicielle développée par ABB en collaboration avec l'Allemand NA (*Norddeutsche Affinerie*, Hambourg) analyse et optimise les aspects les plus importants du processus de production du cuivre. Elle renforce les performances économiques du site en améliorant son rendement global et en réduisant l'impact des incidents techniques. La solution d'ordonnancement améliore la gestion de la production, la coordination des différents intervenants et la visibilité du processus; elle raccourcit les temps improductifs et optimise la maintenance. Source de productivité et de rentabilité, elle a été déployée chez NA, quatrième producteur mondial de cuivre.

### Métallurgie du cuivre

En théorie, le cycle d'affinage du cuivre est assez simple, le but étant de débarrasser le minerai de tous les autres éléments (soufre et fer, pour l'essentiel). Comme pour tous les métaux, cela se fait à des températures extrê-

mes et en utilisant un équipement spécial. Les étapes s'enchaînent comme suit:

- Le concentré de minerai (contenant 25 à 35% de cuivre) passe dans un premier four où sa teneur en cuivre est portée à environ 65%;
- Le cuivre fondu (matte) est affiné par convertissage pour séparer le cuivre du soufre et du fer en insufflant par le bas de l'air pour oxyder le cuivre. Le «blister» ainsi obtenu contient 98% de cuivre;
- Différentes matières sont ajoutées pour optimiser la température, les performances ainsi que le taux de recyclage interne et externe du cuivre;
- L'affinage se poursuit dans un four anodique où sont supprimés les oxydes de cuivre accumulés en injectant du gaz naturel dans le cuivre en fusion;
- Une fois atteint le taux de pureté recherché (99,6%), le cuivre est coulé sous forme d'anodes qui sont refroidies et subissent d'autres opérations.

L'équipement industriel peut affiner plus de 300 tonnes de cuivre à la fois. Une grosse usine compte souvent plusieurs lignes parallèles d'affinage pour les postes goulets ①. Dans la majorité des cas, le matériau est transporté dans des poches de coulée sur pont-roulant. En fonction de la configuration de l'usine, les opérations réalisées en parallèle doivent être synchronisées pour éviter la surcharge ou l'immobilisation des ponts-roulants ②, contribuant à la complexité de la chaîne logistique. Les nombreuses interactions – état des équipements, quanti-

tés de matières, temps de cycle et opérations parallèles – expliquent la difficulté d'optimiser les programmes de production.

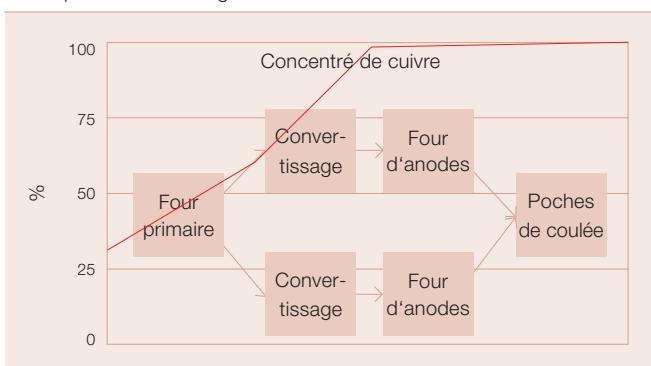
Les systèmes d'automatisation jouent un rôle clé dans ce type de processus: la fiabilité de l'équipement y est capitale alors que la dynamique lente du processus exclut les changements rapides. Les décisions basées sur des relevés et des estimations doivent être prises dans les plus brefs délais.

### Le défi de la planification de la production

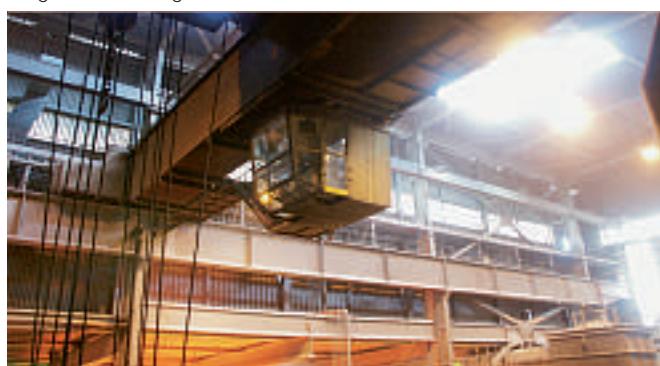
Planifier le processus d'affinage du cuivre est une tâche difficile du fait de l'absence de mesures, de la complexité de la chaîne logistique, de la variabilité des spécifications de la matière première, de la fréquence des aléas et d'autres facteurs comme les interventions de maintenance. Actuellement, la production est planifiée et ordonnancée manuellement; l'absence de synchronisation signifie que chaque poste produit à pleine capacité (optimums locaux). Or la somme des optimums locaux n'étant pas l'optimum du système global, il s'ensuit des pertes de productivité et de rendement au niveau de l'ensemble de l'usine, avec des lots bloqués inutilement entre deux étapes. De même, il est pratiquement impossible de réagir rapidement aux aléas ou modifications des conditions de production.

La variabilité des marges liée à l'instabilité des cours du cuivre et des matières premières (en 2002, le cours du cuivre a varié de 19% et de 48% en 2003) corrobore la nécessité d'une

① Suppression des goulets d'étranglement par l'exécution en parallèle d'opérations d'affinage



② La gestion optimisée des ponts-roulants contribue à supprimer les goulets d'étranglement.



optimisation dynamique du processus de production.

### Solution logicielle

Le nouvel outil logiciel d'aide à la décision développé par ABB couvre les principales étapes du processus. En corrélant de manière optimale les propriétés des matières premières (quantité et qualité) avec les temps d'affinage correspondants, il planifie et ordonne le cycle de production complet, compte tenu des paramètres clés du processus et de la dynamique réactionnelle. Les principales données en entrée incluent :

- Numéros et caractéristiques des lots (possibilité de quantités fixes de matière);
- Teneur en cuivre de différents composés (résultats de laboratoire et prédition);
- Etat effectif de l'équipement (avec heures de fin estimatives);
- Interventions de maintenance à planifier (heure exacte ou créneau horaire);
- Heures de début de l'horizon de planification (saisie automatique ou manuelle).

Il est également possible de définir de nombreuses variables décisionnelles ou de laisser la solution d'optimisation déterminer leurs valeurs.

Cette solution s'appuie sur un modèle de processus validé et robuste qui reproduit les principales réactions chimiques et tient compte des quantités variables de matières pour prédire les temps d'affinage. Une méthode mathématique a été retenue pour garantir une solution optimale. Le défi était double :

- a) le modèle résultant est, dans sa forme absolue, insoluble du fait essentiellement de la cinétique des réactions chimiques sous-jacentes;
- b) les décisions logiques à prendre pour résoudre un problème d'ordonnancement (fréquemment lié à des règles de priorité et à l'allocation des équipements) doivent être représentées par des variables binaires.

Pour résoudre le problème, un modèle de processus linéarisé fut créé, permettant d'utiliser les techniques d'optimisation standard par programmation MILP (*Mixed Integer Linear Programming*)

pour lesquelles plusieurs solveurs robustes sont commercialisés. Pour garantir la validité de la linéarisation, ce modèle fut vérifié avec une grande quantité de données réelles provenant de bases de données et de journaux manuels. Le modèle linéaire développé est une représentation fidèle du processus réel hautement non linéaire.

Le problème d'optimisation est résolu avec un logiciel du commerce (ILOG CPLEX) qui crée un programme de production pour toutes les étapes majeures du processus et calcule les besoins en matières (définition de la recette optimale pour chaque lot). Ce programme est transmis à un module de simulation de levage (eM-Plant) qui simule les déplacements des ponts-roulants et vérifie que le programme est réalisable. Tous les composants de la solution sont accessibles sur l'interface graphique. Pour permettre à l'ensemble du personnel d'accéder au programme, des pages HTML sont générées par le serveur d'optimisation et consultables pratiquement par tous

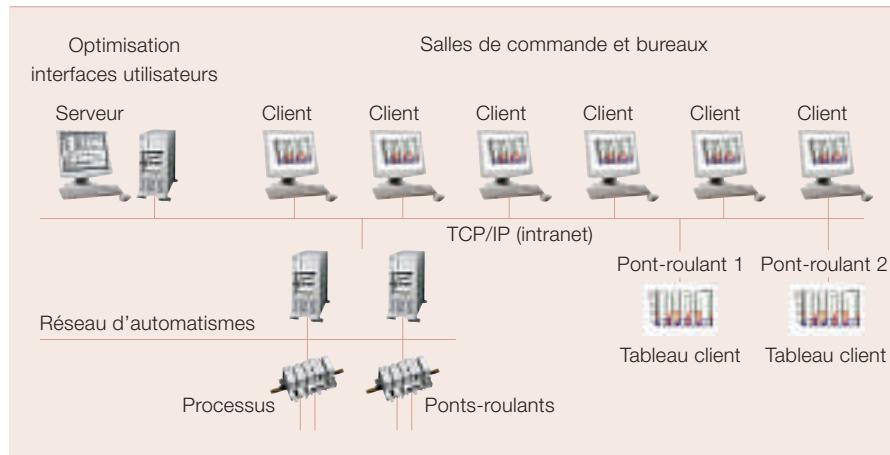
les PC raccordés à l'intranet. Ainsi, tous les intéressés peuvent visualiser le programme de production le plus récent et être automatiquement informés des dernières modifications. Une vue d'ensemble de l'architecture du système est illustrée en 3 et la solution schématisée en 4.

La solution génère des données de production de même que des graphiques illustrant le programme de production optimal. Les principales informations sont :

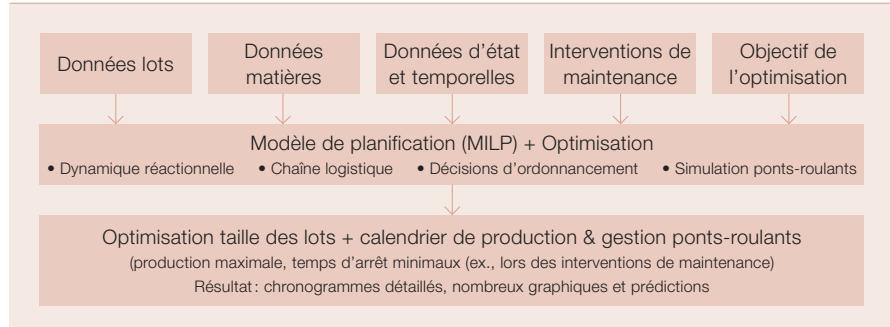
- Quantités de matières et données temporelles pour chaque lot;
- Graphique des phases d'affinage et diagramme de Gant;
- Image du processus avec les paramètres clés de production;
- Production prévisionnelle de SO<sub>2</sub>;
- Opérations de levage correspondantes sous la forme d'une liste et d'un diagramme;
- Pages clients Web à jour.

Cette solution est unique en ce sens qu'elle optimise l'intégralité du cycle

3 Architecture du système



4 Vue d'ensemble du solveur d'optimisation



## Productivité

de production, tenant compte simultanément des équipements disponibles, de l'enchaînement des opérations, de la quantité de matières (recettes) sur la base des réactions chimiques, des opérations de levage et des besoins de maintenance.

La solution de planification et d'optimisation est modulaire, ce qui signifie en pratique qu'un module peut être adapté, complété ou paramétré sans toucher aux parties non concernées.

L'horizon de planification sur 36 heures glissantes est un gage de précision. Le problème MILP, résolu en quelques secondes, met en jeu environ 900 contraintes et 750 variables, dont 50 binaires.

### Interface graphique

L'interface graphique ergonomique permet de créer et de modifier rapidement les programmes de production. Un exemple est illustré en 5. L'utilisateur adapte facilement un programme en ne modifiant que quelques paramètres. Tous les résultats peuvent être archivés et rechargés ultérieurement. Dès qu'un programme est optimisé, il est «publié», c'est-à-dire accessible à tous les clients Web, et archivé.

Beaucoup des composants de cette solution modulaire et flexible peuvent être adaptés relativement facilement à d'autres applications de fabrication par lots, tout particulièrement celles où les quantités de matières en entrée affectent les temps d'affinage et où le nombre de produits différents est limité. Le modèle central d'ordonnancement en continu est générique et aisément «portable» par paramétrage. Les problèmes spécifiques à chaque processus doivent être résolus au cas par cas pour maintenir la qualité de la solution logicielle. Toutefois, cette tâche se limite principalement à la partie modèle.

### Avantages

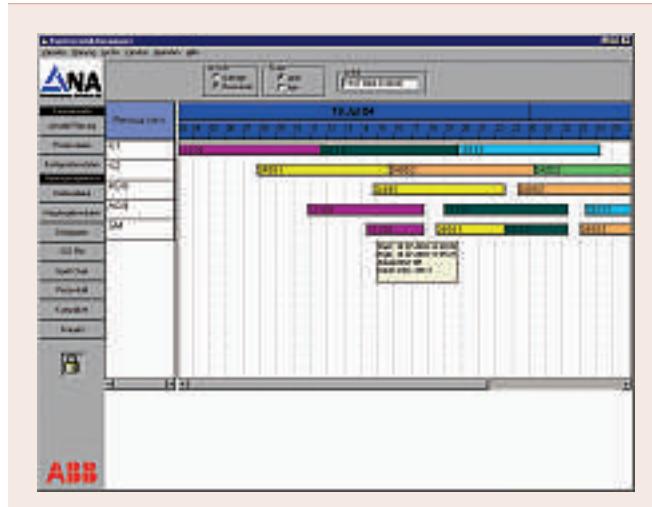
Question importante: quelle est la valeur de la solution pour l'utilisateur final? Lorsque les opérations sont stabilisées (aucun aléa ni

écart par rapport au fonctionnement «normal»), des méthodes de planification classiques peuvent être appliquées qui débouchent sur une stratégie quasi optimale. Malheureusement, c'est loin d'être le cas de la production du cuivre. La variabilité de la matière première, à elle seule, a un impact notable sur le processus alors que les incidents techniques et les arrêts machines sont fréquents, les interventions de maintenance quotidiennes et les goulets d'étranglement potentiels. Qui plus est, chaque planificateur ayant sa propre interprétation des «meilleures pratiques industrielles», les situations conflictuelles en production sont possibles. A ce titre, la solution constitue un cadre commun de référence pour toutes les parties prenantes.

Pour le client final, les avantages sont tangibles:

- Programme de production optimal «à la demande» en quelques secondes ;
- Meilleure coordination et visibilité globale du processus ;
- Optimisation de la taille des lots pour un optimum global ;
- Reprise sur aléa plus rapide par une planification efficace ;
- Planification optimale de la maintenance ;
- Gestion optimale des ponts-roulants ;
- Synchronisation de toutes les étapes du processus ;
- Gain de productivité et de rentabilité ;

5 Ecran du diagramme de Gantt



- Méthode consensuelle de planification et partage en ligne des informations par l'ensemble des intervenants.

En pratique, cela se traduit par une production supplémentaire de 10 000 à 20 000 tonnes de concentrés par an, soit un gain de 1 à 2%. Sachant que de nombreuses réactions sont exothermiques, les économies d'énergie directes découlent uniquement de la réduction des temps d'attente ou des opérations de manutention; ces économies sont toutefois mineures. Le principal avantage environnemental concerne les émissions de SO<sub>2</sub> qui deviennent prévisibles. Par une meilleure planification, les temps morts des poches de coulée pleines sont minimisés, réduisant d'environ 150 tonnes/an les émissions de SO<sub>2</sub> et, donc, la consommation d'hydrate de calcium actif.

### Conclusions

Cette solution logicielle de planification et d'ordonnancement démontre que l'utilisation systématique d'outils d'aide à la décision permet non seulement d'accroître la production et la rentabilité d'un site, mais également d'améliorer la communication interne en constituant un cadre commun de référence pour la planification de la production, avec un fort impact sur la productivité. Ce concept innovant est un levier d'efficacité industrielle et aide à mieux piloter la production.

#### Iiro Harjunkoski

ABB Corporate Research  
Ladenburg (Allemagne)  
iilo.harjunkoski@de.abb.com

#### Gerald Beykirch

ABB Process Industries  
Mannheim (Allemagne)  
bgl.beykirch@t-online.de

#### Markus Zuber

Norddeutsche Affinerie  
Hambourg (Allemagne)  
m.zuber@na-ag.com

#### Hans-Jürgen Weidemann

ABB Corporate Research  
Ladenburg (Allemagne)  
hans-juergen.weidemann@de.abb.com