

Coupe franche

Optimiser la découpe des bobines de papier pour gagner en rentabilité
Iiro Harjunoski, Simo Säynevirta

Il est communément admis que la résolution de problèmes complexes dépend souvent de la capacité à les anticiper. Ainsi, au sein d'un site industriel, les activités de planification absorbent une part considérable du travail du personnel d'encadrement. Même si les outils informatiques de planification sont encore loin de rivaliser avec la souplesse analytique du cerveau humain, l'ordinateur est capable de réaliser un nombre croissant de tâches aussi bien, sinon mieux, que l'homme.

Dans une usine papetière, les bobines qui sortent de la machine à papier doivent être découpées en bobineaux conformes aux commandes clients. Pour un opérateur humain, trouver le meilleur plan de découpe prend du temps et n'offre aucune garantie d'optimisation en termes de chutes ou de qualité. Le problème se corse lorsque certaines parties de la feuille en continu sont rejetées pour non-conformité. Deux problèmes n'étant jamais identiques et les possibilités étant infinies, ABB a développé une solution logicielle qui identifie la meilleure stratégie de découpe.



Dans de nombreux secteurs industriels, les importantes marges de réduction des coûts peuvent être exploitées par une meilleure stratégie de planification des délais et des matières premières. Dans cet article, nous décrivons une stratégie d'optimisation avancée qui associe planification hors ligne et gain de qualité en ligne. La solution part des profils de qualité de chaque bobine de papier en feuille continue (bobine mère) et les contraintes de chaque bobineau (bobine fille) à découper. Une solution géométrique complète à ce problème de minimisation des chutes est proposée. L'approche présentée débouche sur un optimum ou quasi optimum qui réduit les pertes résultant de la non-qualité, c'est-à-dire les conséquences financières du rejet des produits non conformes. Les avantages sont multiples : moindre consommation d'énergie et de matières premières, meilleure satisfaction des clients et rentabilité accrue du fait de la baisse des coûts de production.

Découpe des bobines de papier

Une machine à papier typique produit une feuille de 10 m de large à la vitesse de 120 km/h (ou 33 m/s, soit l'équivalent de 5200 pages A4). Pour un grammage de 80 g/m², cela correspond à 97 tonnes de papier par heure. La planification de ce procédé a un impact décisif sur ses performances de même que sur la productivité du site et sur sa rentabilité. ABB propose déjà une suite logicielle complète et intégrée de gestion de la production papetière avec des outils ultra-modernes de contrôle qualité et d'inspection de feuille. Qui plus est, le logiciel de planification de la production d'ABB

est souvent considéré comme LA référence dans le domaine. Il est donc tout naturel que nous cherchions à améliorer les performances de nos solutions pour réduire encore plus les coûts de production, les émissions polluantes et la consommation d'énergie et de matières premières de nos clients papetiers.

Une machine à papier typique produit plus de 5200 pages A4 par seconde.

La découpe des gigantesques bobines mères en bobineaux intervient immédiatement en sortie de la machine à papier. L'objectif prioritaire est de minimiser les chutes, c'est-à-dire les résidus de coupe lorsque la laize complète de la bobine mère ne peut être utilisée pour produire des bobineaux. Si, par exemple, des bobineaux de 1,5 m de large doivent être découpés dans une bobine mère de 10 m de large, on perd à l'évidence une bande d'un mètre (soit 10% de la production totale). Pour minimiser ces résidus, on doit résoudre un problème de «chutes de laize» en identifiant des plans de découpe appliqués par une coupeuse qui place ses lames dans les positions désirées **1**. Les deux objectifs les plus courants sont :

- Définir un plan de découpe qui donne les largeurs de bobineaux requises en minimisant les chutes de laize ;
- Minimiser le nombre de plans de découpe et les ordonnancer de manière à éviter les réglages inutiles de lames pour maximiser la productivité.

L'approche adoptée pour atteindre ces objectifs parfois contradictoires a un impact énorme sur la solution restituée. Le nombre de variables discrètes étant considérable, l'optimisation exige des opérations mathématiques complexes. Souvent, les bobineaux peuvent être découpés dans la bobine mère selon plusieurs millions de possibilités. En les analysant, on se rend rapidement compte qu'il n'existe aucune méthode pratique de toutes les tester, même en utilisant le supercalculateur le plus puissant. Le pro-

blème croît rapidement avec le nombre de bobineaux à produire du fait de la multiplicité des plans de découpe possibles. Si de nombreuses méthodes heuristiques/mathématiques efficaces (heuristique d'arrondi, génération de colonnes, résolution partielle et autres algorithmes de type sac à dos¹⁾, etc.) permettent de résoudre ce problème, la vraie question est de savoir si elles peuvent prétendre à un optimum en termes de découpe des bobines de papier.

Le critère qualité du papier

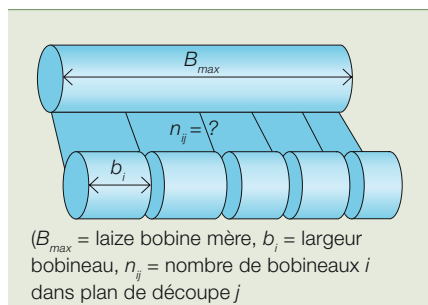
Dans les usines papetières modernes, le problème des chutes de laize est couramment résolu en l'intégrant à la planification de la production, soit bien avant la formation des bobines mères.

Cette planification amont se justifierait pleinement si la qualité du papier restait uniforme et optimale sur toute la feuille. Hélas, ce n'est pas toujours le cas. Au cours de la fabrication du papier, un volume important de données de qualité multicritères est collecté par différents systèmes de mesure et d'inspection en ligne. Ces données sont ensuite soigneusement traitées et analysées pour devenir disponibles après formation de la bobine mère prête à être découpée. Les écarts par rapport aux objectifs de qualité sont donnés par des codes couleur en **2**.

Lorsque l'on compare la carte des défauts au plan de découpe planifié d'une bobine mère, on se rend compte qu'il peut être loin de l'optimum. Ainsi, par exemple, le plan d'origine prévoit de découper les bobineaux que le client va payer au prix fort dans les parties de moins bonne qualité de la bobine mère. Si le plan de découpe est appliqué, les bobineaux seront rejetés pour non-conformité.

Les modèles existants d'optimisation de la découpe des bobines mères ne tiennent pas compte de la carte des défauts de la feuille car le problème standard des chutes de laize fait abstraction de la position exacte de chaque bobineau sur le plan de découpe. Ils se cantonnent au nombre total de bobineaux de même type contenu dans chaque plan de découpe.

- 1** Quelle solution pour découper une bobine mère en bobineaux avec un minimum de chutes de laize ?



Une programmation mathématique innovante

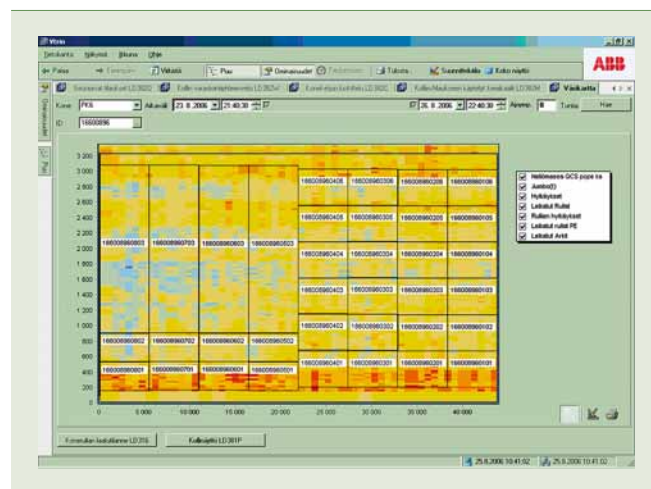
Les données de qualité sont collectées par le système contrôle qualité qui balaye en continu la feuille de papier. Des propriétés telles que l'humidité, l'épaisseur et la blancheur sont mesurées très fréquemment, tous les 10 à 50 mm en moyenne dans le sens travers et toutes les quelques centaines de mètres dans le sens machine en fonction de la vitesse de la machine à papier de même que du temps de balayage des capteurs. Concrètement, cela signifie que même une petite machine à papier compte plusieurs dizaines de milliers de points de mesure pour chaque paramètre de qualité.

Une autre technologie ABB, le système d'inspection de feuille, traque avec des caméras les défauts visibles (trous, fissures, plis, etc.). Les images analysées efficacement par des méthodes à base de réseaux neuronaux permettent d'identifier et de classer très rapidement et avec précision les défauts papetiers.

Outre ces méthodes en ligne et les informations rapides et précises qu'elles fournissent, la qualité est également analysée hors ligne dans des laboratoires. Cette analyse est beaucoup plus longue et convient donc mieux au suivi de tendance général de la qualité plutôt qu'à l'observation des variations sur le court terme. Elle est réalisée sur des échantillons et peut aboutir au rejet d'une bobine mère complète.

Intégrer toutes ces données de qualité dans un modèle mathématique standard pour résoudre le problème des chutes de laize ne ferait qu'accroître leur complexité, le rendant rapidement inextricable du fait de contraintes supplémentaires non applicables et du grand nombre de décisions discrètes. D'où la nécessité d'une autre approche de modélisation pour optimiser la découpe des bobines mères à partir de leur profil de qualité. ABB a ainsi développé une approche innovante à programmation mathématique

2 Analyse qualité d'une bobine mère (système CPM d'ABB)



pour calculer automatiquement une solution optimale au problème des chutes de laize. Partant d'un plan de découpe existant, le modèle est capable de couvrir les différents profils de qualité d'une bobine mère par une représentation géométrique pour adap-

Au cours de la fabrication du papier, un volume important de données de qualité multicritères est collecté par différents systèmes de mesure et d'inspection en ligne.

ter le plan. Piloté par des exigences de performances sévères, le modèle mathématique lui-même est modulaire et, en première approche, étudie un plan de découpe à la fois. Le positionnement des bobineaux sur le plan tient compte de la position géométrique

que exacte et des données de qualité collectées sur toute la laize. Une deuxième approche examine la bobine mère complète et cherche à réordonner les plans de découpe fixes de la meilleure manière possible. Ces deux approches peuvent ensuite être combinées de manière arbitraire par un algorithme intelligent capable aussi d'inclure le programme de production complet. Les zones de collage et de rejet sont également implicitement prises en compte. L'approche donne un résultat optimum ou quasi optimum, réduisant significative-

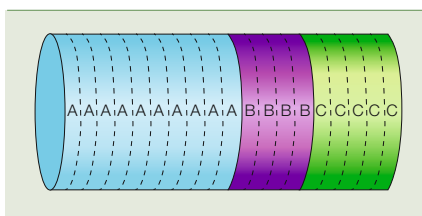
ment les non-conformités, c'est-à-dire les pertes économiques du fait de la non-qualité des produits. On renforce ainsi à la fois la rentabilité de la production et la conformité aux commandes clients; une gestion plus orientée qualité est également un gage de satisfaction des clients.

La réussite en deux étapes

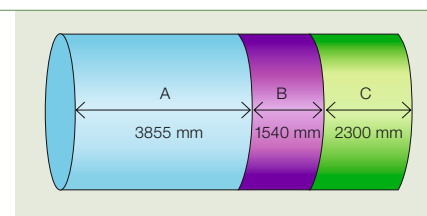
Pour pouvoir résoudre ce problème difficile et très complexe, la nouvelle approche mathématique comporte deux étapes majeures. Pour commencer, la bobine mère est discrétisée en «tranches» **3a**, la qualité de chaque tranche étant comparée à la commande du client. Le modèle d'optimisation qui en résulte établit des catégories de qualité (ex., A, B ou C). La qualité finale de chaque bobineau est calculée en combinant la carte des défauts et les exigences clés du bobineau de papier. Cette méthode de discrétisation donne une bonne approximation de la solution optimale.

3 Deux approches pour optimiser la découpe d'une bobine mère

a Approche discrète : l'algorithme convertit en mode point la feuille de papier; la solution envisagée peut uniquement être adaptée par étape.



b Approche continue : les dimensions varient à l'infini; l'optimisation est beaucoup plus difficile qu'avec l'approche discrète en **a**.



La solution est encore améliorée lors d'une deuxième étape qui applique une approche continue et exacte, garantissant la faisabilité de la solution finale et permettant également un ajustement régulier des bords de chaque levée. L'approche continue divise la bobine mère en zones – ou secteurs – de qualité continues en fonction des différentes catégories de qualité ^{3b} de chaque bobineau. Chaque secteur se voit attribuer une qualité donnée (A, B ou C). Comme pour la première étape, ce calcul associe la carte des défauts à des paramètres clés du bobineau. Cette étape aboutit à une stratégie optimale de découpe qui tient compte de la distribution de la qualité sur la feuille de la bobine mère.

ABB a développé une approche innovante à programmation mathématique pour calculer automatiquement une solution optimale au problème des chutes de laize.

Alors qu'aucune de ces deux stratégies peut, à elle seule et à tous les coups, prétendre résoudre avec exactitude et efficacité des problèmes plus complexes, cette approche en deux étapes est à la fois robuste et efficace. Elle permet de contourner la nature non convergente du problème et garantit l'obtention rapide d'une solution proche de l'optimum.

Des modèles mathématiques très discrets

L'utilisateur n'intervient nullement au niveau des modèles mathématiques ou des algorithmes. La solution d'optimisation de la découpe s'intègre en toute transparence dans l'environnement existant pour l'enrichir de fonctionnalités très utiles au client. Toutefois, pour les lecteurs désireux de savoir ce qu'il y a « sous le capot », nous allons décrire les principales fonctionnalités.

L'approche consiste à résoudre des programmes mixtes entiers linéaires au sein d'algorithmes spécialisés, utilisant pour ce faire des technologies robustes et éprouvées. Les modèles

mathématiques présentent des similarités avec l'ordonnement de la production, les deux supposant des décisions logiques essentielles. En ordonnancement, l'horizon temporel est discrétisé par un nombre fixe de points d'une grille, affectés à des tâches par des variables binaires. Dans le contexte de l'optimisation de la découpe, la largeur ou la longueur de la bobine mère remplace la variable de temps.

La solution d'optimisation de la découpe s'intègre en toute transparence dans l'environnement existant pour l'enrichir de fonctionnalités très utiles au client.

Pour la découpe d'une levée, un bobineau est représenté par un indice r et chaque « tranche » discrète par j . Alors, la variable binaire (zéro-un) xd_{rj} équivaut à « un » à la position j de la bobine mère où débute le bobineau r (bord gauche). Pour optimiser la découpe et maximiser la valeur totale d'une levée, un coefficient de coût c_{rj} , représentant la valeur du bobineau à la position donnée, est également requis. La fonction objectif est très simple : définir l'emplacement de chaque bobineau r qui maximise la valeur to-

tale d'une levée. Celle-ci est exprimée par l'équation suivante (1) :

$$\max \sum_{r,j} c_{rj} \times xd_{rj} \quad (1)$$

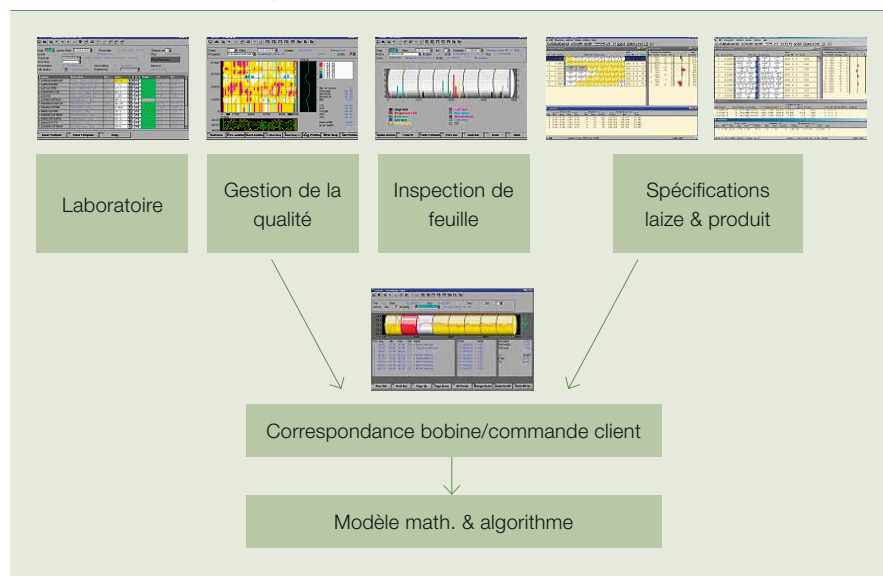
$$xd_{rj} \in \{0,1\}$$

Pour formuler mathématiquement l'ensemble, on introduit des équations qui garantissent aucune superposition de bobineaux et la production exacte de chaque bobineau. Si ces équations semblent évidentes, elles sont parfois beaucoup plus complexes que prévu.

Le problème discrétisé se traduit par un plan de découpe optimum par rapport à la densité de points choisie. Pour des largeurs de bobines mères types jusqu'à 10 000 mm, un pas de grille très fin (1 mm) rendrait le problème insoluble. On utilise donc un pas moins fin (10–20 mm). Dans ce cas, la largeur des bobineaux doit être arrondie par défaut pour que le problème reste soluble (ex., 578 mm devient 570 mm dans le cas d'un pas de grille de 10 mm). Les erreurs d'arrondi sont corrigées lors d'une étape continue consécutive.

L'étape continue s'apparente également à certaines stratégies d'ordonnement en ce sens qu'elle divise la bobine mère en repères non figés. Ceux-ci sont ordonnés de gauche à droite et les limites entre eux sont continuellement variables, c'est-à-dire

4 Intégration des données : de nombreux facteurs différents entrent en ligne de compte pour trouver un optimum global.



adaptables aux différentes largeurs de bobineaux commandés par le client. Chaque bobineau est affecté précisément à un repère et un secteur de qualité par l'utilisation de variables binaires. Dans les équations (2)–(5) ci-contre, les repères sont notés n et les secteurs s . Ainsi, une variable binaire x_{rn} equivaut à « un » uniquement si le bobineau r est affecté au repère n et, de même, la variable x_{rs} indique que le bobineau r se situe dans le secteur qualité s . W_r désigne la largeur du bobineau, r_r^{start} la position du bord gauche d'un bobineau, W_n^B et W_n^E le

début et la fin d'un repère et, enfin, S_s^B et S_s^E le début et la fin des secteurs.

$$W_n^E = W_n^B + \sum_r x_{rn} \cdot W_r \quad (2)$$

$$r_r^{start} = W_n^B \text{ si } x_{rn} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_s x_{rs} = 1 \quad (4)$$

$$S_s^B \leq r_r^{start} \leq S_s^E \text{ si } x_{rs} = 1 \quad (5)$$

$$x_{rn}, x_{rs} \in \{0,1\}$$

En résumé, l'équation (2) ajuste la largeur d'un repère en fonction du bobineau qui lui est affecté. Ce repère doit débuter exactement sur le bord gauche de son bobineau qui est exécuté dans l'équation (3). Le fait qu'un même bobineau ne puisse appartenir qu'à un seul secteur qualité est exprimé par l'équation (4) et, enfin, l'équation (5) indique que le bobineau doit être positionné au sein de ce secteur. Ces quelques contraintes clés du problème illustrent une partie des principales corrélations mathématiques et logiques.

Un algorithme intelligent peut minimiser les pertes résultant de la non-qualité. On s'assure ainsi de l'adéquation de la planification aux données de qualité les plus récentes.

Un algorithme rassembleur

Les éléments décrits précédemment sont illustrés en 4. Au-delà de la maîtrise des aspects mathématiques du modèle, il est important de comprendre comment ils peuvent être regroupés pour former un concept robuste et homogène. A des fins d'illustration, revenons à notre problème initial. La modélisation mathématique présentée plus haut, combinée à l'approche en deux étapes, permet de résoudre efficacement le problème de découpe « orientée qualité ». La stratégie qui en résulte peut être appliquée de plusieurs manières : le plan de découpe peut être réadapté à chaque levée 5a ou la séquence des levées dans une bobine mère peut être modifiée 5b.

Dans le premier cas (levée unique), la levée est ajustée pour repositionner les bobineaux afin de maximiser la valeur totale (rendement à la qualité) et donc minimiser l'incidence des écarts de qualité. Un exemple simple consisterait à placer le bobineau de plus grande valeur sur une zone de bonne qualité. En 5a, la couleur rouge indique que le bobineau doit être rejeté et la couleur jaune qu'il présente des défauts mineurs (qualité B).

La même technique peut être utilisée pour modifier la séquence des levées dans une bobine mère 5a. Selon le principe ci-dessus, en intégrant les données de défauts dans le plan de découpe de la bobine mère, on peut améliorer le rendement à la qualité en positionnant les levées là où la valeur totale est maximisée.

Un algorithme intelligent qui résout ces deux problèmes selon une séquence donnée peut minimiser les pertes résultant de la non-qualité. On s'assure ainsi de l'adéquation de la planification aux données de qualité les plus récentes. Les zones de collage et de rejet automatiques de la bobine mère dans le sens travers peuvent également être intégrées à la solution, de même que des plans de laize pour le cycle de production complet. Bref, l'intégration de la planification de la production et de la gestion de la qualité ouvre de nouvelles perspectives d'amélioration du bilan à la fois économique et écologique des sites de production.

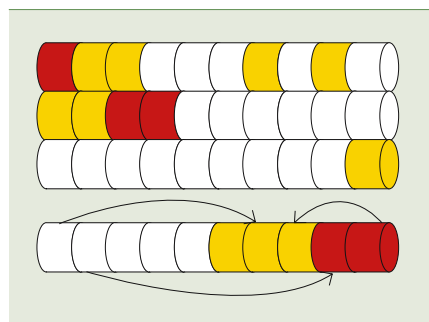
La preuve par l'exemple

Pour illustrer notre propos, nous prendrons l'exemple simple des bobineaux du tableau 1 de la page 58.

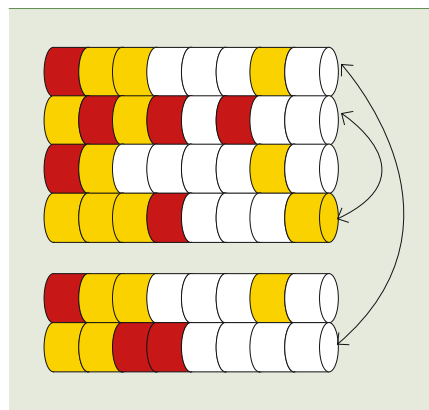
La laize de la bobine mère de notre exemple est de 8000 mm. La somme des largeurs des bobineaux à découper est de 7915 mm avec, donc, une chute de laize de 85 mm. Dans ce cas précis, on suppose que les contraintes de qualité de chaque bobineau sont identiques. Ainsi, l'exemple peut être simplifié en divisant directement la bobine mère en différentes zones de qualité. Si un bobineau couvre plusieurs zones de qualité, il est valorisé au prix de la moins bonne qualité. Pour notre exemple, 6a donne une

5 Approches d'optimisation

a Optimiser une levée à la fois



b Changer la séquence des levées



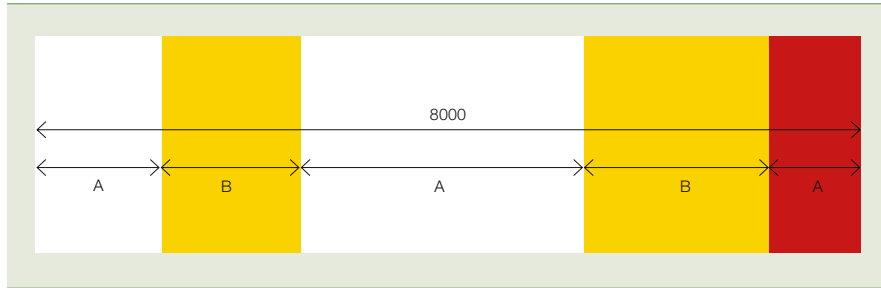
Bobineaux prêts à être conditionnés



Mesures et contrôle

6 Cartographie des défauts d'une bobine mère

a Le problème



b Plan de découpe (qualité : A = blanc, B = jaune, C = rouge)

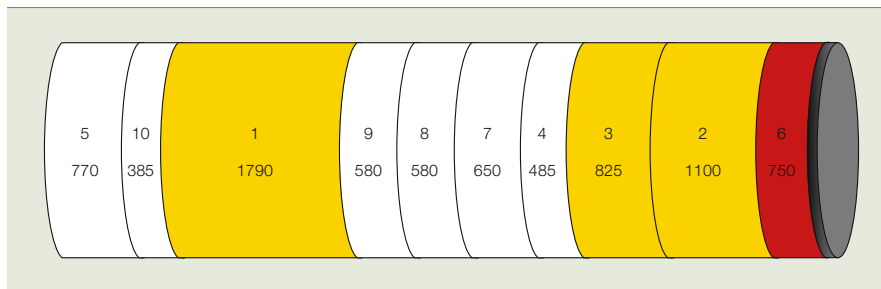


Tableau 1 Données de l'exemple (largeur des bobineaux)

Bobineau	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Largeur (mm)	1790	1100	825	485	770	750	650	580	580	385

carte des défauts avec catégories de qualité A, B et C. Pour résoudre notre problème d'optimisation, la valeur de chaque bobineau est calculée à partir des hypothèses suivantes : longueur de la levée = 5896 m, grammage = 80 g/m², prix = 500 €/tonne, qualité A (zéro défaut) = 100% du prix, qualité B (défauts mineurs) = 70% du prix et qualité C (rejeté) = 0% du prix. Sans optimisation, en découpant tout

simplement les bobineaux spécifiés au **tableau 1**, le bénéfice de la vente atteint 1236 €. L'algorithme de découpe orienté qualité trouve une solution à 1427 € **6b** soit un gain d'environ 15%. L'optimisation peut encore être affinée, un compromis entre qualité et rendement étant toujours possible. Toutefois, la stratégie combinée donne de bons résultats dans un délai raisonnable.

La levée est ajustée pour repositionner les bobineaux afin de maximiser la valeur totale (rendement à la qualité) et donc minimiser l'incidence des écarts de qualité.

Des chutes... en chute libre

La solution présentée ne résoudra pas les problèmes de qualité, mais minimisera leurs effets en poussant toujours l'optimisation pour donner la

solution la plus avantageuse au vu de la qualité produite. De plus, en mettant l'accent sur la qualité, l'entreprise adopte une culture de planification, renforçant ainsi sa capacité à identifier et analyser l'efficacité économique par la qualité.

En réduisant les pertes résultant de la non-qualité des produits, vous :

- raccourcissez les temps de production
- recyclez moins de bobineaux rejetés
- consommez moins d'énergie et de matières premières
- répondez aux exigences de qualité des clients
- respectez les délais de livraison
- améliorez votre écobilan
- réduisez les coûts globaux de production
- recevez moins de réclamations liées à la qualité
- augmentez la satisfaction des clients

Même si cela paraît évident, la solution proposée contribue à inscrire ces objectifs dans l'exploitation au quotidien du site.

Iiro Harjunkoski

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

Simo Säynevirta

ABB Process Industries
Helsinki (Finlande)
simo.saynevirta@fi.abb.com

Note

¹⁾ Le problème du sac à dos est une recherche d'optimisation combinatoire qui vise à optimiser le sous-ensemble d'un ensemble donné d'objets pour que la somme de leurs valeurs se rapproche autant que possible d'une limite donnée sans la dépasser. Le nom découle d'un exemple où le nombre maximum d'objets possibles doit tenir dans un sac à dos de taille limitée.

Notations et symboles

- $x_{d_{rj}}$ = 1, si début bobineau r au point j
- c_{rj} = valeur du bobineau r au point j
- x_{rm} = 1, si bobineau r affecté au repère n
- x_{rs} = 1, si bobineau r dans secteur s
- r^{start} = bord gauche bobineau r
- W_r = largeur bobineau r
- W_n^B = début (bord gauche) repère n
- W_n^E = fin (bord droit) repère n
- S_s^B = début (bord gauche) secteur qualité s
- S_s^E = fin (bord droit) secteur qualité s