

Définition d'un Système d'Aide à la Décision d'ordonnement des commandes sur les lignes de l'atelier d'engrais

Ahlam Azzamouri¹, Imane Essaadi¹, Pierre Fénies^{2,3}, Frédéric Fontane⁴, Vincent Giard^{3&5}

1. Doctorante à l'EMINES School of Industrial Management
2. Professeur Université Paris Ouest Nanterre La Défense
3. Professeur affilié à l'EMINES School of Industrial Management
4. Directeur des études et de la recherche de l'EMINES, Maître-Assistant à Mines-ParisTech
5. Université Paris-Dauphine, PSL Research University, CNRS, LAMSADE, 75016, Paris, France

Résumé : Cet article décrit les principes d'élaboration d'un Système d'Aide à la Décision (SAD) visant à trouver ordonnancement optimal de commandes d'engrais sur des lignes de production parallèles de caractéristiques hétérogènes, avec prise en compte de temps de lancement et de l'impact de l'ordonnancement en amont et en aval de la chaîne logistique (CL). Ce SAD utilise un modèle d'optimisation d'un problème linéaire pour résoudre un problème n'intégrant pas les conséquences de la solution sur le reste de la CL ; l'analyse de la solution proposée par le SAD permet à l'utilisateur de modifier certains paramètres du problème pour atteindre une solution acceptable en amont et en aval.

Mots-clés : Système d'Aide à la Décision (SAD), optimisation, ordonnancement, chaîne logistique.

I. Introduction

La cohérence des décisions opérationnelles et tactiques prises par les différentes entités d'une chaîne logistique (CL) est très difficile à assurer, ce qui génère d'importantes pertes d'efficacité et d'efficience. Cette incohérence a des origines organisationnelles et techniques. Une relative autonomie décisionnelle, renforcée par les systèmes locaux d'évaluation des performances, est un frein à la collaboration entre ces entités. De surcroît, une gestion centralisée des décisions de types temps réel, opérationnel et tactique, susceptible d'éliminer a priori les causes organisationnelles de pertes de performances, est pratiquement impossible à mettre en place dans les CL, en raison de la complexité de leur modélisation et des difficultés de calcul. Le pilotage d'une CL procède généralement d'une combinaison de décisions locales et de décisions de régulation prise à un niveau supérieur, lorsque l'on détecte (souvent trop tard) que la chaîne

logistique n'est plus sous contrôle. Lorsque la variété des produits échangés dans la CL n'est pas trop forte, on peut limiter les décisions de régulation en mobilisant à bon escient, des stocks de sécurité. Cette solution, qui améliore le découplage décisionnel sans le garantir, se fait au prix d'une perte d'efficacité. Une alternative consiste à mettre en place des dispositifs décisionnels diminuant fortement le caractère local des décisions et, en cas de généralisation de cette approche, d'envisager d'utiliser une régulation a priori pour limiter la régulation a posteriori aux seules actions correctrices rendues nécessaires par des perturbations significatives. Dans cette perspective, les Systèmes d'Aide à la Décision (SAD) constituent une piste intéressante d'amélioration de la cohérence décisionnelle.

Les bases des SAD ont été jetées par Gorry et Scott Morton (1971) puis systématisées par Keen et Scott Morton (1978). L'évolution des technologies informatiques a considérablement accru les potentialités des SAD (Shim *et al.*, 2002 ; Eomi et Kim, 2006 ; Bhargava *et al.* 2007...), sans en changer la logique. Fondamentalement un SAD se compose : 1) d'une interface de formalisation d'un problème complexe semi-structuré permettant de définir un problème structuré ; 2) d'un ou plusieurs modules de résolution de ce problème structuré, s'appuyant généralement sur des modèles d'optimisation ou de simulation (Power et Sharda, 2007) ; 3) d'une interface de traitement des solutions possibles permettant de les modifier à la marge et/ou de valider l'une d'entre elles ; 4) si aucune de ces solutions n'est acceptable, le SAD permet de revenir sur la formulation du problème semi-structuré, en tenant compte des enseignements tirés des formulations antérieures n'ayant pas permis d'aboutir à une solution satisfaisante.

Nous exposerons les principes mobilisés du prototype de SAD orienté vers l'amélioration des décisions d'ordonnement des ateliers d'engrais de la chaîne logistique de Jorf. On commencera par l'analyse du problème d'ordonnement posé (section II), avant de décrire les bases de ce SAD (section III), puis de conclure rapidement (section IV).

II. Définition du problème d'ordonnement

On débutera par une rapide description du problème d'ordonnement posé par l'atelier d'engrais de Jorf, en le positionnant dans le cadre plus large de son insertion dans la chaîne logistique (§II.1). On évoquera ensuite les deux modèles possibles de ce problème d'ordonnement par la programmation mathématique et en montrera les limites mais aussi l'intérêt du premier pour définir le problème structuré du second composant du SAD (§II.2), avant d'aborder la définition du système de valorisation des décisions à utiliser, aspect souvent négligé par les spécialistes de la recherche opérationnelles (§II.3).

II.1 Caractéristiques du problème décisionnel

L'OCP SA¹ détient un tiers des parts du marché mondial de l'exportation de phosphate sous toutes ses formes. L'usine d'engrais de Jorf, située près de l'océan au bout de l'axe nord de la *supply chain* de l'OCP, est la plus importante de ce groupe marocain. Vingt et une références d'engrais, regroupées en six familles sont fabriquées sur 7 lignes parallèles (3 lignes identiques « 107 » et 4 lignes identiques « 07 ») ; 7 des 21 références ne peuvent être fabriquées que sur un seul type de ligne, ce qui conduit à 35 gammes. Cette variété de qualités d'engrais est amenée à croître dans les années qui viennent. L'ordonnancement doit tenir compte d'un programme de maintenance préventive hebdomadaire qui arrête la production pendant que s'effectue la maintenance, sans modifier pour autant le temps total de production de la référence en cours de production.

La demande d'engrais est fortement saisonnière et la production de l'OCP s'effectue essentiellement à la commande. Cette saisonnalité conduit à la fermeture de certaines lignes en période de sous-activité. Chaque commande est caractérisée par une qualité d'engrais à produire, un tonnage et une fenêtre de temps au cours de laquelle la production doit être terminée. Le temps de production d'un engrais varie d'une ligne à l'autre, en raison de différence de technologie mobilisée et d'une modulation possible des régimes de marche. Il faut tenir compte d'un temps de lancement de plusieurs heures lorsqu'on lance en production, sur une ligne, une qualité d'engrais différente de celle précédemment produite, ce temps de lancement dépendant du type de ligne de production.

On peut souligner que, si le processus productif est continu, le problème d'ordonnancement est de type discret puisque le temps de production d'une commande sur une ligne est prédéterminé par la ligne et la référence antérieurement produite (ce qui peut nécessiter un temps de lancement) ; par ailleurs, les étapes de traitement du processus continu de fabrication n'interviennent pas dans le problème d'ordonnancement qui se pose implicitement « en sortie de ligne ».

L'ordonnancement retenu a des conséquences immédiates sur l'amont et l'aval qui peuvent en contrarier l'application en raison de l'occurrence d'un désamorçage (amont) ou d'une saturation d'un stock de produit fini (aval).

- La fabrication des engrais mobilise, notamment, de l'acide sulfurique et de l'acide phosphorique, ce dernier utilisant de l'acide sulfurique dans sa production ; la CL de Jorf,

¹ <http://www.ocpgroup.ma/fr>

intègre des unités de production de ces acides. Par ailleurs, l'acide phosphorique produit fait également l'objet d'exportations par bateau et ces deux acides peuvent être consommés par des *Joint Ventures* (JV) présentes sur le site de Jorf. L'analyse des nomenclatures d'engrais montre une forte dispersion dans la consommation relative de ces intrants (par exemple, la production d'une tonne d'engrais NPK 14-23-14 1B consomme près de 7 fois plus d'acide phosphorique pur que celle d'une tonne d'engrais MAP Std Normal (11-52)). Il s'ensuit que l'ordonnancement retenu a un impact important sur le rythme de consommation de ces acides et que cet ordonnancement n'est réalisable qu'en l'absence de rupture de stock de ces matières premières.

- Les engrais produits sont acheminés par convoyeur à des zones de stockage, au nombre de six. Une zone de stockage ne peut accueillir que des références d'engrais appartenant à une même famille. La capacité d'une zone varie avec le nombre de références qu'elle stocke, le mélange des engrais étant préjudiciable. L'affectation de ces zones aux familles peut varier dans le temps, une famille pouvant mobiliser plus d'une zone. Les engrais stockés sont acheminés par convoyeur pour être chargés dans des bateaux pour honorer des commandes portant généralement sur une seule référence. Ces navires séjournent à quai quelques jours, le temps du chargement, sur des fenêtres de temps programmées (que la météo peut remettre en cause). La capacité résiduelle de stockage d'une référence d'engrais varie donc au cours du temps. L'ordonnancement retenu détermine l'alimentation de ces stocks d'engrais et n'est réalisable que si les entrées en stock respectent les contraintes de capacité.

II.2 Formulations par la programmation mathématique

Le problème d'ordonnancement posé se définit en univers certain : la disponibilité des ressources, les gammes, les nomenclatures et toutes les caractéristiques des commandes à exécuter sont connues. Ce problème combine un certain nombre de caractéristiques jamais prises en compte simultanément dans la littérature (Giard *et al.*, 2015, 2016). On est en présence de processeurs parallèles de caractéristiques hétérogènes, susceptibles d'exécuter des commandes en cours au début du problème d'ordonnancement. Une commande (en cours ou nouvelle) porte sur une référence d'engrais et son temps d'exécution dépend du processeur retenu, sachant que cette référence peut ne pas être produite par tous les processeurs. Un temps de lancement significatif est nécessaire si la référence à produire sur le processeur est différente de celle précédemment produite ; ce temps de lancement dépend de ces références et du processeur utilisé. L'ordonnancement doit tenir compte d'un programme de maintenance prévisionnelle des

processeurs ; cette maintenance interrompt la production sans modifier le temps de production de la référence en cours. La date d'achèvement d'une commande est nécessairement comprise dans une fenêtre de temps, définie pour chaque commande, la prise en compte de la maintenance compliquant la prise en compte des contraintes de fenêtre de temps.

Deux modélisations de ce problème d'ordonnancement ont été proposées (Giard *et al.*, 2015, 2016). Le modèle 1 raisonne localement, en ignorant l'éventuelle indisponibilité de matières premières (amont de la CL) et l'éventuelle saturation de stocks de produits finis (aval de la CL). Le modèle 2 prend explicitement en compte ces contraintes.

Modèle 1

L'ensemble de ces caractéristiques du problème local ont été prises en compte dans un premier modèle de programmation linéaire (Giard *et al.*, 2015, 2016). Celui-ci introduit le critère de minimisation du coût de l'ordonnancement avec un système de valorisation sur lequel nous reviendrons au §II.3. Cette formulation prend en compte toutes les caractéristiques listées ci-dessus et mobilise deux variables de commande. La première x_{pij} est une variable binaire à trois dimensions, le processeur p , la référence i venant d'être produite sur ce processeur p et la référence j à produire ensuite sur ce même processeur. Elle vaut 1 si la commande j est produite sur le processeur p après la commande i , et 0 dans le cas contraire. La seconde variable, y_j est la date de fin de production de la commande j ; c'est une variable continue définie avec le repérage temporel de l'atelier qui produit la commande j (repérage tenant compte des arrêts programmés). Le problème générique a été écrit avec le modeleur Xpress-IVE, en prenant en compte les restrictions logiques à la création des variables de commandes (par exemple, x_{pij} ne peut exister si i ou j ne peut être produit par p).

Le caractère continu des dates de fin et l'existence de fenêtre de temps à respecter peuvent conduire à une multiplicité de solutions optimales, à supposer que le problème posé ait une solution. Cette indétermination est liée à l'existence possible de marges totales (au sens donné à ce terme en ordonnancement de projet) dans l'ordonnancement de certains OF. Pour lever cette indétermination, une pénalité est introduite dans la fonction-objectif, pénalité du second ordre par rapport au coût de la solution optimale. Cette pénalité est une somme pondérée des différences des dates de fin programmée par rapport aux bornes des fenêtres de temps. Les coefficients de pondération associés à chaque commande permettent de la « pousser » vers une programmation au plus tôt ou, au contraire, vers une programmation au plus tard.

Cette approche est numériquement réaliste pour des problèmes dans lesquels, on ne dépasse pas la quinzaine de processeurs et la cinquantaine de commandes. Une fois déterminée la solution optimale, il est facile de déterminer les échéanciers de consommation des acides et ceux de production des références d'engrais pour vérifier la faisabilité de cette solution. Le second modèle intègre directement ces contraintes de faisabilité.

Modèle 2

La détermination des échéanciers de production des engrais et de consommation des acides implique d'inclure plus explicitement, dans le modèle, la date de fin de traitement d'une commande. En effet, la variable y_j n'est utilisée que pour garantir le respect des contraintes potentielles² de l'ordonnancement, sans figer pour autant ces dates de fin (d'où l'existence possible de marges totales dans la solution trouvée par le modèle précédent). Il est alors nécessaire d'introduire une dimension temporelle dans la définition de la variable binaire qui devient x_{pijt} , le temps intervenant cette fois-ci de manière discrète (numéro de période). La création de ces variables est limitée, par le modelleur, par les fenêtres de temps de dates de fin de production des commandes. Cette transformation permet d'introduire deux jeux de contraintes additionnelles (Giard *et al.*, 2015). Le premier concerne les répercussions de l'ordonnancement sur l'aval en garantissant que, pour toutes les périodes, le stock d'une référence d'engrais ne dépasse pas la capacité allouée à cette référence (les programmes d'enlèvement par bateau étant connus). Le second jeu prend en compte les répercussions de l'ordonnancement sur l'amont en s'assurant que pour toutes les périodes, il n'y ait pas de rupture de stock (les programmes de production de ces acides et d'échange avec les JV étant connus).

Cette formulation est la seule possible pour intégrer explicitement les conséquences de l'ordonnancement sur l'amont et l'aval de la chaîne logistique. Le problème qu'elle pose en pratique c'est celui de la formidable augmentation du nombre de variables binaires qui en limite l'utilisation à des problèmes portant sur peu de processeurs et peu de commandes, même si l'on cherche à augmenter les bornes inférieures des fenêtres de temps des dates de fin de production des commandes (avec le premier modèle, l'amplitude de cette plage de temps importe peu). *Cette remarque est importante car elle montre qu'il est totalement irréaliste d'envisager de traiter par un même modèle d'optimisation le pilotage des ateliers de production d'acide, celui de production d'engrais et la gestion de l'espace de stockage.*

² Non-chevauchement de production sur un processeur.

11.3 Système de valorisation utilisé

La recherche d'une solution diminuant le coût de fonctionnement d'un système productif est sans intérêt si les économies que la nouvelle solution est censée procurée ne se retrouvent pas dans le compte de résultat de l'entreprise. Un modèle d'optimisation décrivant de manière suffisamment pertinente la réalité mais s'appuyant sur un système de coûts inapproprié ne présente pas d'intérêt opérationnel.

Les méfaits de l'usage d'une mauvaise comptabilité de gestion ont été soulignés à la fin des années quatre-vingt et synthétisés par Johnson et Kaplan (1991), donnant naissance au courant de la comptabilité par activité (*Activity Based Costing*, ABC) popularisé par de nombreux ouvrages, en particulier celui de Kaplan & Cooper (1997). Plutôt que de travailler sur des coûts standards, quotient de charges par une quantité produite, cette approche privilégie le concept d'inducteur de coûts. Son usage est à adapter dans le contexte d'une transformation d'un système productif, dans la mesure où certaines charges ne sont pas impactées par les décisions prises. Dès lors, il convient de reconstruire un modèle de valorisation des activités basé sur une approche processuelle et issue des préconisations du *Supply Chain Costing* (Seuring, 2002). La construction d'un système de valorisation en contexte de pilotage opérationnel pour de la production de chaîne logistique hybride constitue un enjeu majeur (Degoun *et al.*, 2015)

Les décisions d'ordonnancement dans l'atelier d'engrais sont prises dans un cadre temporel ne dépassant pas quatre semaines. À cette échéance, le nombre de lignes ouvertes et le nombre d'équipes faisant fonctionner ces lignes sont connus ; les décisions d'ordonnancement cherchent à bien utiliser ce potentiel productif, sans avoir un quelconque impact sur ces charges qui doivent être considérées comme fixes sur l'horizon retenu. Le temps de lancement correspond à un temps de nettoyage de la ligne. Le coût de personnel n'est pas à prendre en compte puisqu'il rentre dans les charges fixes de période ; par contre, le coût des matières premières perdues lors du nettoyage et des produits de nettoyage (principalement de l'eau) est à prendre en compte ; l'inducteur de coûts est alors clairement le changement de référence produite sur une ligne. Par ailleurs, les lignes 07 et 107 ont des performances différentes. La différence de débit pour la fabrication d'une référence d'engrais joue seulement sur le temps d'exécution de la commande et donc sur le potentiel productif utilisé. Entre ces types de lignes, on observe de légères différences sur les nomenclatures de production : pour produire une tonne d'une référence d'engrais donnée dans un atelier 07, par rapport à un atelier 107, il faut un peu plus de matières premières (l'écart pouvant aller jusqu'à 0,5 %) et un peu plus d'énergie. L'inducteur de coût est alors clairement la

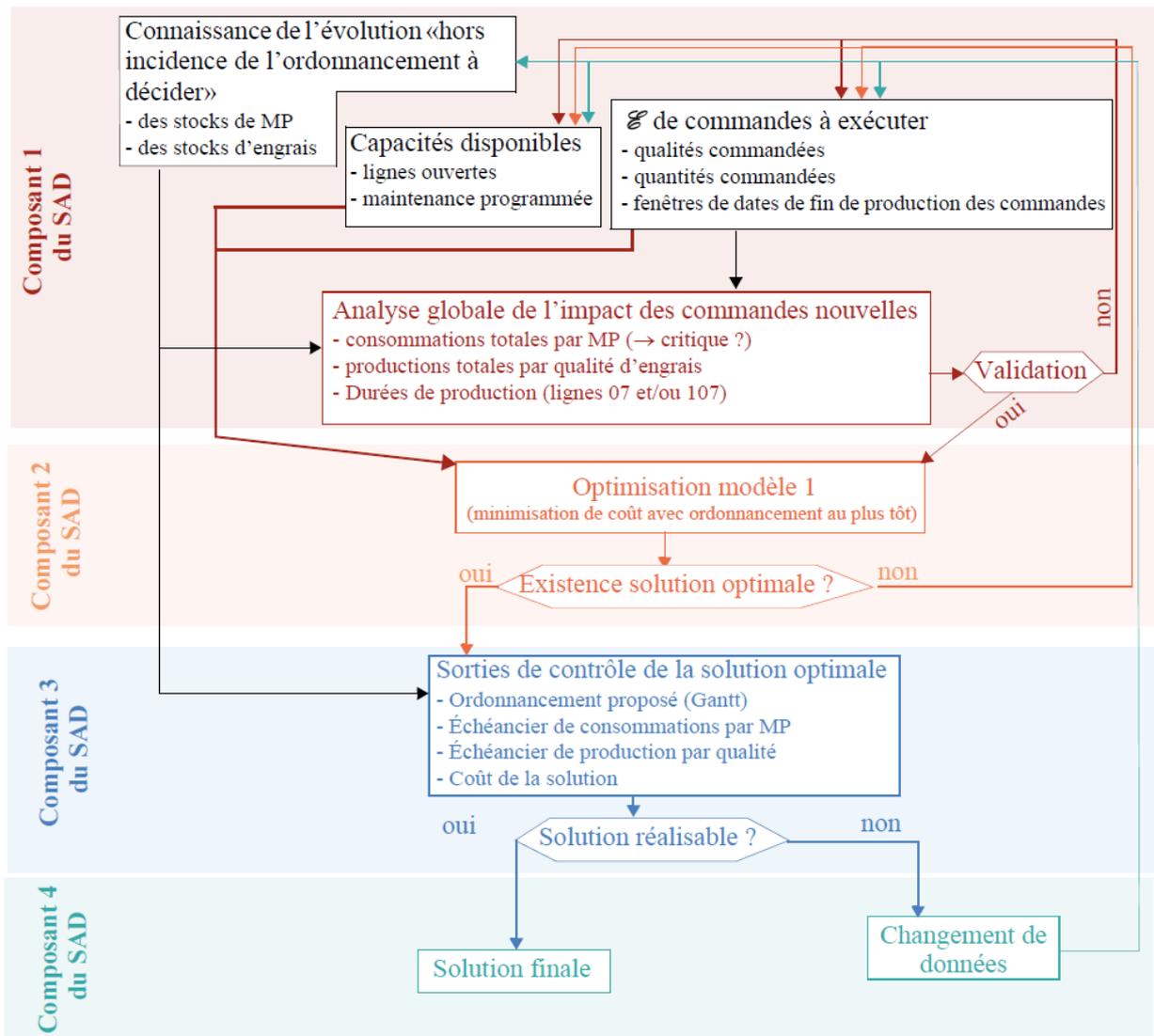
quantité produite sur un atelier donné. A priori, aucune autre charge ne varie en fonction de la solution d'ordonnancement retenue.

La prise en compte de ces inducteurs dans le choix d'un ordonnancement se traduit bien par des différences possibles de charges effectivement décaissées.

III. Bases du SAD

Le prototype de SAD s'appuie sur une base de données relationnelle qui comporte un certain nombre de données structurées (description du système productif, gammes, nomenclatures, coûts) et de données permettant de définir un problème semi-structuré : carnet de commandes, maintenance préventive, évolutions prévisionnelles – hors incidence de l'ordonnancement des commandes – des stocks de matières premières utilisées et des stocks de référence d'engrais. Un premier module de l'interface du SAD, créée en Java, est utilisé pour mettre à jour cette base de données implémentée sous MySQL.

Un second module de cette interface permet de définir le problème semi-structuré à traiter (composant 1 du SAD), permettant une première vérification de faisabilité éventuelle, puis de définir un problème structuré à résoudre avec le modèle 1 (l'usage possible du modèle 2 n'est pas envisagé ici) et de générer le fichier de données à utiliser pour créer une instance du problème générique formalisé sous Xpress-IVE, puis d'en lancer l'exécution (composant 2 du SAD). Un troisième module exploite les résultats de l'optimisation pour en évaluer la faisabilité, par rapport à ses incidences en amont et en aval de la CL (composant 3 du SAD). Le diagnostic d'infaisabilité de la solution trouvée conduit à une révision du problème à optimiser (composant 4 du SAD). La figure suivante résume le fonctionnement du SAD.



IV. Conclusions

L'intégration de ces modèles dans un SAD a été réalisée sur un prototype interfacé avec Xpress-IVE, mais le modèle 2 est d'un intérêt restreint pour des raisons de taille du problème à résoudre. La rétroaction de l'analyse d'une solution trouvée avec le modèle 1 (composant 4 du SAD) sur la reformulation du problème semi-structuré (composant 1 du SAD) joue principalement sur la définition des fenêtres de date de fin de production d'une commande et sur les coefficients de pondération poussant une commande à être ordonnancée de préférence au plus tard ou au plus tôt. Elle peut aussi conduire à scinder une commande pour arriver à respecter une date de livraison s'il apparaît que le potentiel productif est sous-utilisé ou à modifier le programme de maintenance préventive.

La CL de l'OCP est constituée de plusieurs axes parallèles. Deux d'entre eux, l'axe-nord (celui de Jorf) et l'axe-centre, disposent d'un atelier de production d'engrais. L'approche

proposée s'adapte sans difficulté pour permettre une gestion globale, et donc plus efficace, de la production des engrais de ces différentes unités de production.

V. Bibliographie

Eom, S., Kim, E. (2006). A Survey of Decision Support System Applications (1995–2001). *Journal of the Operational Research Society* 57 (11), 1264-1278.

Bhargava, H.K, Power, D.J, Sun, D. (2007). Progress in Web-based decision support technologies, *Decision Support Systems*. 43 (4), 1083-1095.

Degoun M., Fenies P., Giard V., Retmi K., Saadi J., (2015). Évaluation de la performance économique d'une chaîne logistique hybride, *Congrès de Génie Industriel (CIGI)*, Montréal, Octobre 2015.

Giard, V., Azzamouri, A., Essadi, I. (2015). Définition d'un Système d'Aide à la Décision d'ordonnancement des commandes sur les lignes de l'atelier d'engrais, *Cahier de recherche 369 du LAMSADE*, Université PSL-Paris-Dauphine. http://www.lamsade.dauphine.fr/sites/default/IMG/pdf/cahier_369.pdf

Giard, V., Azzamouri, A., Essadi, I. (2016). A DSS approach for heterogeneous parallel machines scheduling with due windows, processor-&-sequence-dependent setup and availability constraints, *Information System, Logistics and Supply (ILS 2016)*.

Johnson H. T., Kaplan, R. S. (1991). *Relevance Lost: The Rise and Fall of Management Accounting*, Harvard Business Press.

Kaplan, R. S., Cooper, R. (1997). *Cost & Effect: Using Integrated Cost Systems to Drive Profitability and Performance*, Harvard Business School Press

Keen, P., Scott Morton, M. (1978). *Decision Support Systems: An Organizational Perspective*, Addison-Wesley Publishing, Reading, MA.

Gorry, G.A., Scott Morton, M.S. (1971). A framework for management, information systems, *Sloan Management Review* 13 (1).

Power, D.J., Sharda, R. (2007). "Model-Driven Decision Support Systems: Concepts and Research Directions." *Decision Support Systems* 43 (3), 1044–1061.

Seuring, S. (2002) Supply Chain Costing- A conceptual framework, in *Cost Management in Supply Chains*, Seuring S. et Goldbach M. editors, Springer, p.15–30.

Shim, J.P., Warkentin, M., Courtney, J.F., Power, D.J., Sharda, R., Carlsson, C. 2002. Past, Present, and Future of Decision Support Technology. *Decision Support Systems* 33, 111–126.