

HEC PARIS

Management des opérations de la supply chain

Auteure :

Adèle MORTIER

Professeur :

Simon TAMAYO-GIRALDO

11 mai 2017

Table des matières

1	Introduction et concepts fondamentaux	2
1.1	Séance 1 : introduction générale	2
1.2	Séance 2 : produits, ressources et typologies	2
1.3	Séance 3 : flux, stocks, cycles et délais	3
1.4	Séance 4 : charge, capacité et équilibre	3
2	Planification hiérarchisée	5
2.1	Séance 5 : prévision de la demande	5
2.2	Séance 6 : planification à moyen terme (PIC et PDP)	7
2.3	Séance 7 : calcul des besoins et gestion des flux amont	8
2.4	Séance 8 : systèmes et modèles de gestion des stocks	8
2.5	Séance 9 : aléas et stocks de sécurité	12
2.6	Séance 10 : flux industriels et processus connectés	13
2.7	Séance 11 : flux industriels et processus discontinus	14
3	Processus logistiques	16
3.1	Séance 12 : processus et réseaux de distribution	16
3.2	Séance 13 : Transports, problématique et choix du mode	19
4	Décisions stratégiques et amélioration de la performance	22
4.1	Séance 14 : achats et RSE	22
4.2	Séance 15 : flexibilité et réactivité, juste-à-temps et Lean	23

1 Introduction et concepts fondamentaux

1.1 Séance 1 : introduction générale

Source : approvisionnement	}	trois piliers de la supply chain
Make : Fabrication		
Deliver : Livraison		

Bull-whip : augmentation de la variabilité des commandes à mesure qu'on remonte en amont de la chaîne (amplification, oscillation, déphasage...).

Modèle SCOR : Plan – Source – Make – Deliver – Return.

Make to Stock : production en continu, présence de stocks de produits finis.

Make to Order : production à la demande, pas de stocks de produits finis.

Engineer to Order : production par projet, mise en place de toute la chaîne en fonction de ce projet unique.

1.2 Séance 2 : produits, ressources et typologies

Nomenclature : relation composés - composant (quantités, rebuts, dates de validité, gestion des infos...).

Gamme : processus d'élaboration des articles (délai, rapport charge/capacité, performances temps alloué/ temps passé...).

Coefficient technique de montage : indique combien d'unités du produit sont nécessaires pour produire son produit-père dans la nomenclature. Si p_n est le fils du produit fini PF au n -ième degré, alors le nombre de produits p_n nécessaires à la fabrication de PF est :

$$\prod_{i=1}^n x_i$$

Où x_i désigne le coefficient technique de montage du produit p_i .

Différentiation retardée : consiste à garder un produit standard aussi loin que possible dans la chaîne. L'ajout d'options non-standard arrive ainsi à la fin.

Flow shop : un atelier par produit.

Job shop : un atelier par tâche, chaque atelier servant ainsi à plusieurs produits.

1.3 Séance 3 : flux, stocks, cycles et délais

Processus : ensemble de tâches reliées par des flux de matière et d'informations, et qui transforment les entrées en sorties.

Flux : quantité de produits qui passent à un endroit donné, par unité de temps.

Stock : accumulation générée par une différence de flux entre deux processus.

Flux poussé : l'aval attend que l'amont lui envoie de la matière. L'amont envoie en continu, que l'aval en ait besoin ou non.

Flux tiré : l'amont attend que l'aval lui ait donné le feu vert pour produire de la matière.

Flux tendu : flux sans latence : dès que l'aval a un besoin, l'amont a déjà produit ce qu'il fallait, sans avoir produit en avance (pas de stocks – "juste à temps").

Cycle de production : temps mis par la matière première à être changée en produit fini :

$$T_{cycle} = T_{gamme} + T_{attente}$$

Où T_{gamme} désigne le temps de production effective et $T_{attente}$ désigne le temps d'attente (passé en stock...).

En-cours : nombre de produits sortis pendant un cycle, donné par :

$$EC = F \times T_{cycle}$$

Où EC désigne le volume de l'en-cours, F le flux du système et T_{cycle} le temps d'un cycle de production.

1.4 Séance 4 : charge, capacité et équilibre

Capacité : flux qu'une ressource peut traiter. On l'exprime en heures (h), ou en unités par heure ($u.h^{-1}$).

Temps d'ouverture équipement : temps théorique où les machines sont allumées, en supposant zéro problèmes.

Temps brut de fonctionnement : temps d'ouverture moins les temps d'arrêt

machine (pannes, absentéisme...).

Temps net de fonctionnement : temps brut de fonctionnement moins les écarts de performance et les micro-arrêts.

Temps utile : temps net de fonctionnement moins les rebuts et les non-qualités.

$$\begin{aligned} TBF &= TOE - T_{pannes} \\ TNF &= TBF - T_{non-perf} \\ TU &= TNF - T_{non-qualite} \end{aligned}$$

Taux de rendement systématique : rapport entre le temps utile et le temps employé, autrement dit :

$$TRS = \frac{TU}{TBF}$$

Taux de charge : rapport entre le temps théorique de travail et le temps d'ouverture réelle :

$$TC = \frac{TBF}{TOE}$$

Taux de rendement global : rapport entre le temps utile et le temps théorique, c'est-à-dire :

$$TRG = \frac{TU}{TOE}$$

Charge : quantité de flux nécessaire pour satisfaire une commande. S'exprime le plus souvent en heure machine (h). La charge totale est la somme de la charge commerciale (obtenue directement à partir de la taille de la commande), et de la durée des réglages, retouches ou reprises sur les produits.

$$C_{totale} = C_{commerciale} + T_{reglages/reprises} \quad (1)$$

Courbe d'apprentissage : notion servant à calculer le temps d'une opération en fonction du nombre d'opérations similaires déjà faites, en supposant qu'une opération prend de moins en moins de temps à mesure qu'elle est répétée. On a alors :

$$\forall n > 1 \quad T_n = T_1 \times n^{\frac{\ln k(n)}{\ln 2}} \Leftrightarrow k(n) = \exp \left(\frac{\ln (T_n/T_1) \ln 2}{\ln n} \right)$$

Indice de fluidité : part du temps où le produit fait l'objet d'une transformation effective lors de son séjour dans la chaîne.

$$IF = \frac{T_{VA}}{T_{sejour}}$$

Où T_{VA} désigne le temps à valeur ajouté (temps de transformation effective), et T_{sejour} désigne le temps total de séjour du produit dans la chaîne.

Goulet d'étranglement : opération ayant le rapport "charge/capacité de production de produit fini" le plus haut. La capacité de production de produit fini du goulet est celle du système tout entier.

$$\begin{aligned} Goulet &= \underset{\text{opérations } i}{\operatorname{argmax}} \left(\frac{Charge_i}{Capacite_i} \right) \\ &= \underset{\text{opérations } i}{\operatorname{argmax}} \left(\frac{Charge_{PF} \times N_i}{Capacite_i} \right) \end{aligned}$$

Où $Charge_i$ et $Capacite_i$ désignent respectivement la charge et la capacité du processus i en unités par heure, et N_i désigne le nombre de produits fabriqués par i nécessaires à la fabrication d'une unité de produit fini.

Single Minute Exchange of Die (SMED) : technique de réglage machine accéléré, par une transformation des opérations "internes" en opérations "externes", la standardisation des fixations d'outils, la concentration des ressources.

2 Planification hiérarchisée

2.1 Séance 5 : prévision de la demande

Long terme : entre 3 et 5 ans. Nouveaux produits, nouvelles technologies, politiques d'investissement sont pensée sur le long terme.

Moyen terme : entre 12 et 24 mois. Plan industriel et commercial (PIC) et budgets sont pensés sur le moyen terme.

Court terme : de l'ordre de la semaine. Programme directeur de production (PDP), calcul des besoins moyens (MRP) et programme d'approvisionnement continu (CRP) sont pensés sur le court terme.

Très court terme : de l'ordre du jour. L'ordonnancement des tâches est pensé sur le très court terme.

Tendance : augmentation ou diminution significative de la demande au cours du temps.

Saisonnalité : variation périodique e la demande.

Cycle : évolution de la demande sur plusieurs années, liée à la vie d'un produit,

aux conditions politico-économiques etc.

Demande irrégulière : variation inhabituelle mais explicable dans la demande.

Demande aléatoire : variation non explicable dans la demande.

Méthode de la moyenne mobile : la valeur prévue est égale à la moyenne des données précédentes sur une certaine fenêtre.

$$P_{t+1}^n \simeq D_{t+1} = \frac{D_t + \dots + D_{t-n+1}}{n}$$

Où P_{t+1}^n désigne la prévision à la date t suivant une fenêtre de taille n , et où D_t désigne la donnée connue à la date t .

Méthode de la moyenne mobile pondérée : même chose qu'avec la moyenne mobile, sauf que l'on tient de moins en moins compte des données à mesure qu'elles gagnent en ancienneté (usage d'une suite de coefficients dégressif $(a_i)_{i \in \mathbb{N}}$ pour la pondération).

$$\begin{aligned} P_{t+1}^n \simeq D_{t+1} &= a_0 D_t + \dots + a_{n-1} D_{t-n+1} \\ \text{avec } \sum_{i=0}^{n-1} a_i &= 1 \end{aligned}$$

Méthode du lissage exponentiel : consiste à prendre en compte pour une part la donnée précédente, et pour une autre part, la prévision précédente.

$$\begin{aligned} P_{t+1}^n \simeq D_{t+1} &= \alpha D_t + (1 - \alpha) P_t \\ \text{avec } \alpha &\in [0; 1] \end{aligned}$$

Régression linéaire : à partir des données précédentes, on bâtit un modèle temporel affine qui sert à la prévision des données futures.

$$\begin{aligned} P_{t+1} \simeq D_{t+1} &= a^*(t+1) + b^* \\ \text{avec } (a^*, b^*) &= \underset{(a,b) \in \mathbb{R}^2}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_{k=1}^t (D_k - ak - b)^2 \right) \\ \text{soit } &\begin{cases} a^* = \frac{\sum_{k=1}^t (D_k - \bar{D})(k - \bar{t})}{\sum_{k=1}^t (k - \bar{t})^2} \\ b^* = \bar{D} - a^* \bar{t} \end{cases} \end{aligned}$$

Où \bar{D} et \bar{t} désignent respectivement la demande moyenne sur les données et le temps moyen sur les données :

$$\begin{aligned}\bar{D} &= \frac{1}{t} \sum_{k=1}^t D_k \\ \bar{t} &= t/2\end{aligned}$$

Régression linéaire avec correction de saisonnalité : à un cycle donné et pour chaque donnée de ce cycle, on mémorise le taux d'écart à la prévision, et on reporte ce taux pour les nouvelles prévisions aux mêmes périodes sur le cycle suivant. Le taux d'écart à la date t , est défini par :

$$I_t = \frac{D_t}{a^*t + b^*}$$

Cet écart est utilisé pour prévoir la demande à la même période dans le cycle suivant ; ce qui donne, en supposant le cycle de taille n :

$$P_{t+n} = (a^*t + b^*)I_t$$

Signal d'alerte : critère de performance du modèle prédictif. Lorsque le signal d'alerte est au-dessus de 4, on considère généralement qu'il faut changer de modèle. Le signal d'alerte est défini comme suit :

$$Sig = n \times \frac{EalgM}{EabsM} = n \times \frac{\sum_{i=1}^n D_i - P_i}{\sum_{i=1}^n |D_i - P_i|}$$

Où $EalgM$ et $EabsM$ désignent respectivement l'écart algébrique moyen et l'écart absolu moyen :

$$\begin{aligned}EalgM &= \frac{\sum_{i=1}^n D_i - P_i}{n} \\ EabsM &= \frac{\sum_{i=1}^n |D_i - P_i|}{n}\end{aligned}$$

2.2 Séance 6 : planification à moyen terme (PIC et PDP)

Plan industriel et commercial : le PIC inclut la prévision des ventes, le plan de production, les charges liées à ce plan, et la comparaison de ces charges aux capacités disponibles.

Chase strategy : la production suit la demande de près. Dans l'idéal, aucun coût de stockage, mais requiert beaucoup de flexibilité.

Level strategy : production constante égale à la moyenne des productions requises sur la période donnée. Présence de stocks d'anticipation (coûts supplémentaires), mais stratégie facile à implémenter.

Programme directeur de production : le PDP inclut le plan de production pour chaque produit, et le calcul des dates de disponibilité.

Horizon de planification : égal au plus long délai cumulé en considérant toutes les branches possibles de la nomenclature. C'est le temps d'obtention du produit fini à compter de la commande des matières premières.

2.3 Séance 7 : calcul des besoins et gestion des flux amont

Calcul des besoins nets (*Materials resources planning*) : consiste à calculer en cascade la demande nette des composants du produit fini (besoins nets produits finis, besoins nets composant, besoins nets matière première), jusqu'à obtenir la demande nette des matières à acheter à l'extérieur. La demande nette du produit x (x = produit fini, composant, matière première...) est donnée par :

$$D_n(x) = D_b(x) - S(x)$$

Où $D_n(x)$ désigne la demande nette en produit x , $D_b(x)$ désigne la demande brute en produit x et $S(x)$ désigne les stocks de produit x .

2.4 Séance 8 : systèmes et modèles de gestion des stocks

Rotation des stocks : elle est égale au quotient de la consommation totale en nombre de pièces par unité de temps ($u.t^{-1}$) par le stock moyen en nombre de pièces (u). La rotation s'exprime donc en fréquence (t^{-1}). C'est la fréquence à laquelle les stocks se renouvellent entièrement.

$$R_{stocks} = \frac{C_{totale}}{S_{moyen}}$$

Couverture ou durée d'écoulement des stocks : c'est l'inverse de la rotation des stocks. La couverture désigne donc la durée pendant laquelle le stock moyen

satisfait la demande moyenne.

$$Couv_{stocks} = DE_{stocks} = \frac{1}{R_{stocks}} = \frac{S_{moyen}}{C_{totale}}$$

Analyse ABC (Pareto) : segmentation des références produit selon la loi de Pareto :

Segment	Fraction des produits	Fraction de la valeur
A	20%	80%
B	30%	15%
C	50%	5%

Système à point de commande : on commande une quantité fixe, mais la période des commandes varie. On commande dès que le point de commande (stock-seuil) est atteint. Ce stock seuil correspond "peu ou prou" (modulo le stock de sécurité SS) à la demande sur le délai de livraison :

$$PDC = D_{\text{délai de livraison}} + SS$$

Système à recomplètement périodique : on commande à période fixe, mais une quantité variable, qui correspond "peu ou prou" (modulo le stock de sécurité) à la demande sur la période à venir (jusqu'à la prochaine commande), délai de livraison inclus :

$$RP = D_{\text{période à venir}} + SS$$

Coût d'acquisition : prix total payé pour la commande.

$$C_{\text{acquisition}} = CD$$

Où C désigne le coût unitaire des articles achetés et D désigne le nombre d'unités achetées.

Coût de possession : coûts induits par le stockage des produits. Il dépend du prix des produits, de la taille du stock, et d'un facteur H qui peut par exemple correspondre au coût d'opportunité par rapport au placement des actifs en banque.

$$C_{\text{possession}} = CS_{\text{moyen}}H$$

Où $S_{\text{moyen}} = Q/2$ désigne le stock moyen et $H \in [0; 1]$ désigne le taux de détention.

Coût de passation de commande : somme des coûts fixes associés à la passation de commande.

$$C_{\text{passation}} = NL$$

Où $N = D/Q = 1/T$ désigne le nombre de passations de commande, et L désigne le coût fixe de passation par commande.

Coût de rupture : coût associé aux ruptures éventuelles.

$$C_{\text{rupture}} = R\mathbb{E}[N_R]$$

Où R désigne le coût d'une rupture de stock, et $\mathbb{E}[N_R]$ désigne l'espérance du nombre de ruptures. Cette espérance est égale à :

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[N_R] &= \int_{N_R=0}^{\infty} N_R \mathbb{P}[N_R] dN_R \\ &= \int_{D=PDC}^{\infty} (D - PDC) \mathbb{P}[D] dD\end{aligned}$$

Mais cette formule est en fait souvent utilisée dans sa version discrète :

$$\mathbb{E}[N_R] = \sum_{i, D_i > PDC}^{\infty} (D_i - PDC) \mathbb{P}[D_i]$$

Coût variable total : somme des coûts de possession et des coûts de passation de commande.

$$\begin{aligned}CVT(Q) &= \frac{CHQ}{2} + \frac{DL}{Q} \quad (PDC) \\ CVT(N) &= \frac{CHD}{2N} + NL \quad (RP)\end{aligned}$$

Quantité économique : dans un système à point de commande, c'est quantité Q^* qu'il faut commander pour minimiser le coût variable total de gestion des stocks. Elle est donnée par :

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DL}{CH}}$$

Et le coût variable total correspondant est :

$$CVT^* = CVT(Q^*) = \sqrt{2DLCH}$$

Périodicité optimale : dans un système à recomplètement périodique, c'est la périodicité N^* des commandes qui minimise le coût variable total de gestion des stocks. Elle est donnée par :

$$N^* = \sqrt{\frac{DCH}{2L}} = \frac{D}{Q^*}$$

Et le coût variable total correspondant est :

$$CVT^* = CVT(N^*) = \sqrt{2DLCH}$$

Commandes groupées : c'est une généralisation du cas à une commande. On suppose ici qu'on commande n articles différents, ayant chacun un coût C_i et une demande D_i . le système optimal dans ce cas est le système à reconstituer périodiquement, avec choix d'une périodicité commune. Le coût variable total est alors :

$$CVT(N_g) = N_g L_g + \frac{H \sum_{i=1}^n D_i C_i}{2N_g}$$

Où N_g désigne la périodicité commune, et $L_g = L^f + nL^v$ désigne le coût de lancement (ayant une composante fixe L^f et une composante variable L^v).

Dans ce cas, la périodicité commune optimale minimisant le coût variable total est :

$$N_g^* = \sqrt{\frac{H \sum_{i=1}^n D_i C_i}{2L_g}}$$

Production et consommation simultanées : c'est une amélioration du modèle basique précédent. On suppose ici que les commandes n'arrivent pas tout d'un bloc : elles sont produites à un rythme P . La consommation elle, conserve le rythme D . Du coup, le Dirac de la commande est remplacé par une plage (à définir), où les stocks augmentent à un rythme $P - D$. Cette plage a une durée de :

$$Pt = Q \Rightarrow t = Q/P$$

A la fin du processus de production/consommation, la taille du stock est donc de :

$$Q/P(P - D) = Q(1 - D/P)$$

Ce qui modifie les formules de quantité économique et de coût variable total optimal comme suit :

$$\begin{aligned} Q^* &= \sqrt{\frac{2DL}{CH(1 - \frac{D}{P})}} \\ CVT(Q) &= \frac{DL}{Q} + \frac{QCH(1 - \frac{D}{P})}{2} \\ CVT^* &= \sqrt{2DLCH \left(1 - \frac{D}{P}\right)} \end{aligned}$$

Coût total : égal au coût variable total auquel on ajoute le coût d'acquisition. C'est le critère qu'il faut utiliser pour choisir entre différentes quantités à rabais différents.

$$CT = CVT + C_{\text{acquisition}} = \frac{DL}{Q} + \frac{QCH}{2} + CD$$

2.5 Séance 9 : aléas et stocks de sécurité

Taux de service : probabilité que la demande soit couverte, sans rupture. Généralement, on le fixe autour de 95%. La détermination du taux de service dépend des coûts de rupture, et plus précisément du point d'indifférence entre rupture et surplus, quantifié par la probabilité de rupture optimale :

$$\begin{aligned} p_{\text{rupture}} \times C_{\text{rupture}} &= (1 - p_{\text{rupture}}) \times C_{\text{surplus}} \\ TS &= 1 - \widehat{p_{\text{rupture}}} \end{aligned}$$

Où $\widehat{p_{\text{rupture}}}$ est obtenue en prenant la borne sup de l'encadrement "au plus près" de p_{rupture} par les probabilités de demande cumulées empiriques :

$$\sum_{i=k-1}^{\infty} \mathbb{P}[D_i] \leq p_{\text{rupture}} \leq \sum_{i=k}^{\infty} \mathbb{P}[D_i] \triangleq \widehat{p_{\text{rupture}}}$$

Stock de sécurité : en supposant que la distribution de la demande suit une loi normale, le stock de sécurité est le stock qu'il faut rajouter par rapport à la demande moyenne pour satisfaire un certain taux de service. Ce stock supplémentaire réduit l'espérance du coût de rupture, mais augmente les frais d'immobilisation. Le stock de sécurité est défini par :

$$SS(T_{PREV}, T_{IP}, TS) = \sigma_{T_{PREV}} \sqrt{\frac{T_{IP}}{T_{PREV}}} \Phi^{-1}(TS)$$

Où $\sigma_{T_{PREV}}$ désigne l'écart-type de la demande mesuré sur une durée T_{PREV} , T_{IP} désigne la durée de l'intervalle de protection, et $\Phi^{-1}(TS)$ désigne la loi normale inverse (moyenne 0, écart-type 1) appliquée au taux de service. Notons que T_{IP} et T_{PREV} doivent être exprimés dans la même unité (jours, semaines, mois etc.).

2.6 Séance 10 : flux industriels et processus connectés

Production à la chaîne : opérations de transformation identique impliquant des flux linéaire, des volumes élevés et une certaine rigidité. Les opérations sont réparties entre des postes répartis séquentiellement dans l'ordre spécifié par la gamme. Les composants sont incorporés progressivement. Point mort proche de la capacité.

Nombre de postes nécessaires à une chaîne : quotient du temps total de travail pour satisfaire une demande Q par la capacité offerte par les postes :

$$N_{postes} = \frac{Q \times \sum_{i=1}^k T_i}{A \times Capacite_{poste}}$$

Où : $\left\{ \begin{array}{l} Q \text{ désigne la demande à satisfaire} \\ T_i \text{ désigne le temps opératoire de l'opération } i \\ k \text{ désigne le nombre d'opérations} \\ A \text{ désigne l'activité de la chaîne} \\ Capacite_{poste} \text{ désigne la capacité par poste} \end{array} \right.$ L'activité A d'une chaîne de production se définit elle-même par :

$$A = \frac{\text{Nombre de produits sortis}}{\text{Nombre de produits attendus}}$$

Takt time : rythme de sortie du système imposé par les ventes, égal au quotient de la demande (en unités) sur une période donnée par la capacité de la chaîne (en heures) sur cette même période :

$$Takt\ time = \frac{Q}{Capacite_{chaîne}}$$

Temps de cycle objectif : temps de travail de chaque poste pour un rééquilibrage parfait, défini par :

$$T_{cycle\ objectif} = \frac{\sum_{i=1}^k T_i}{N_{postes}} = \frac{A \times Capacite_{poste}}{Q}$$

Perte d'équilibrage : rapport entre la somme des temps morts et le temps total consacré par les postes à la fabrication d'une pièce :

$$\begin{aligned} Perte_{equilibrage} &= \frac{N_{postes} \times Charge_{max} - \sum_{i=1}^k T_i}{N_{postes} \times Charge_{max}} \\ &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^k T_i}{N_{postes} \times Charge_{max}} \end{aligned}$$

Où $Charge_{max}$ désigne la charge (en heures) du poste le plus chargé.

Lignes à modèles multiples : réaménagement périodique de la chaîne pour traiter des produits différents lancés par lots homogènes (variantes). Problème de l'ordre de passage

Lignes à modèles mixtes : chaîne polyvalente pour le traitement simultané des produits. Problème de l'équilibrage.

Organisation en îlots de fabrication : mini-chaînes intégrées polyvalentes. Problème de la répartition.

Production synchrone : séquençement des flux d'approvisionnement sur la base de la chaîne principale.

2.7 Séance 11 : flux industriels et processus discontinus

Processus discontinus : processus "déconnectés" dans lesquels les flux de produits ne suivent pas de séquences d'opérations fixes, du fait de gammes opératoires ou de parcours physiques des produits différents. Ces processus nécessitent une politique d'ordonnancement, de lancement et de suivi.

Ordre de fabrication (OF) : résultat d'une gamme opératoire, ensemble d'opérations.

Ordonnancement : programmation des séquences de fabrication de produits différents sur les mêmes équipements. L'objectif peut être le respect des délais, la saturation des capacités, la minimisation de l'en-cours, la flexibilité. L'obstacle est la combinatoire élevée du problème. Trois méthodes : ordonnancement centralisé, ordonnancement décentralisé, ordonnancement avec *kanban*.

Ordonnancement centralisé : planification par OF, planning global (diagramme de Gantt) sur l'ensemble des ressources. Il faut choisir l'ordre de chargement : par numéro d'OF (FIFO), par date de besoin croissante, en fonction de la charge ... et la politique d'ordonnancement : au plus tôt, au plus tard ou en *mid-point*.

Chargement au plus tôt : pour chaque OF considéré, on trie les opérations dans l'ordre de la gamme (on part de la première), et on les place systématiquement au plus tôt dans le diagramme, dès qu'on trouve une plage suffisamment large. Cette méthode privilégie l'occupation à court terme, mais augmente l'en-cours et se révèle peu flexible (commandes urgentes, pannes).

Chargement au plus tard : pour chaque OF considéré, on trie les opérations

dans l'ordre inverse de la gamme (on part de la dernière), et on les place systématiquement au plus tard dans le diagramme, c'est-à-dire au plus proche de la date du besoin et dans une plage suffisamment large.

Ordonnancement *mid-point* : on ordonnance d'abord la machine la plus chargée, les opérations amont au plus tôt, les opérations aval au plus tard.

Ordonnancement décentralisé : gestion autonome (par poste) du planning en fonction des files d'attente. Au moment où un poste se libère, on cherche dans la file d'attente le lot le plus prioritaire, en fonction de règles de priorité : locales ou globales.

Règles de priorité locales : elle tiennent compte de la file d'attente de la machine uniquement. On peut faire du FIFO (First In First Out), du LIFO (Last In First Out), du SOT (Shortest Operating Time), du LOT (Longest Operating Time), du EDD (Earliest Due Date), du CR (Critical Ratio), ou simplement prendre le lot à la plus forte valeur.

Critical ratio ou ratio critique (CR) : quotient du temps restant avant exigibilité par le temps opératoire restant :

$$R_{critique} = \frac{\text{Temps restant avant exigibilité}}{\text{Temps opératoire restant}}$$

Notons que le ratio critique peut être négatif, s'il y a du retard.

Règles globales : elles tiennent compte de l'état de l'atelier (*i.e.* des autres files d'attente). On peut choisir la file d'attente suivante la plus courte (en-cours et surface), le poste suivant le moins chargé ou le poste suivant qui joue le rôle de goulet.

Ordonnancement par *kanban* : *kanban* signifie "signe visible" ou "étiquette". Le *kanban* signale aux postes amont qu'il faut produire (et combien produire) pour alimenter les postes aval. La gestion se fait sans ordre de fabrication, le pilotage des flux se fait par l'aval à l'aide des boucles *kanban* (flux tiré, juste-à-temps). Deux types de *kanban* : production et transfert.

Kanban de production : signale un besoin de production.

Kanban de transfert : signale un besoin de déplacement des stocks.

Principe de chevauchement : permet de raccourcir le cycle de fabrication en faisant se chevaucher les opérations successives pour un travail en parallèle. Différents types de chevauchement : avec réglage anticipé, simple, et simple avec réglage anticipé.

Chevauchement avec réglage anticipé : la plage de réglage et la plage de l'OF qui précède peuvent se chevaucher.

Chevauchement simple : la plage de réglage et les plages d'OF peuvent se chevaucher, et deux plages d'OF peuvent se chevaucher également. Deux plages de réglages ne peuvent se chevaucher.

Chevauchement simple avec réglage anticipé : tout, plages de réglages comme plages d'OF, peuvent se chevaucher.

Matrice de temps de réglage : souvent le temps de réglage des machines dépend du réglage précédent. La matrice de temps de réglage est une matrice $T \in \mathcal{M}_k[\mathbb{R}^+]$ (k désignant le nombre d'états possibles de la machine), telle que :

$\forall (i, j) \in [1, k]^2$, $T_{i,j}$ désigne le temps de réglage pour passer de l'état i à l'état j .

Lancement : le lancement transforme un ordre ferme en ordre lancé. Il inclut la vérification de la disponibilité des composants, la sortie des composants du stock, la préparation et la sortie des outillages, la préparation des documents (fiche suiveuse, bons de travail).

Suivi de fabrication : nombre de pièces réalisées, rebuts, retouches, pannes attendue, matières consommées, temps passé ...

3 Processus logistiques

3.1 Séance 12 : processus et réseaux de distribution

Distribution physique : mise à disposition des produits fabriqués avec des contraintes de niveau de service, de coût et de délai. Comprend le traitement des commandes, la manutention, le conditionnement, l'entreposage, la gestion des stocks et le transport. Deux étapes principales : le transport d'approche et la livraison terminale.

Transport d'approche : sources monoproduites, grandes quantités.

Livraison terminale : produits variés, directement chez le client (tournées de livraison).

Structure verticale du réseau : système à deux étages, système à dépôts locaux, système à entrepôt central, livraison directe.

Système à deux étages : la source livre à l'entrepôt central, qui dispatche dans

des dépôts locaux, et les dépôts livrent les clients. Transport d'approche et livraison terminale simples, proche des clients, faibles délais. Mais stock et manutention importants.

Système à dépôts locaux : la source livre dans différents dépôts locaux, qui livrent aux clients. Livraison terminale simple, faibles délais. Mais stocks et manutention importants, transport d'approche complexe.

Système à entrepôt central : la source livre à un entrepôt central, qui livre aux clients. Transport d'approche simple, peu de stocks, centralisation des opérations et mutualisation des ressources. Mais délais importants, livraison terminale complexe et peu de proximité avec les clients. La localisation de l'entrepôt central doit minimiser les coûts de distribution dans la zone géographique considérée. Considérons n destinations de livraison et un entrepôt situé au point E . La destination $i \in [1, n]$ de coordonnées (x_i, y_i) est située à une distance $D_i^{(E)}$ de l'entrepôt central et doit se faire livrer une quantité Q_i . Supposons aussi que le coût de transport unitaire $CTU_i^{(E)}$ vers la destination $i \in [1, n]$, est une fonction affine de la distance $D_i^{(E)}$:

$$\forall i \in [1, n], CTU_i^{(E)} = AD_i^{(E)} + B, (A, B) \in \mathbb{R}^+$$

Cela nous donne un coût de transport total vers la destination $CT_i^{(E)}$ de :

$$\forall i \in [1, n], CT_i^{(E)} = Q_i \times (AD_i^{(E)} + B)$$

Comme on cherche le point E qui minimise le coût total le coût total :

$$\begin{aligned} E &= \operatorname{argmin}_{E \in \mathbb{R}^2} \left(\sum_{i=1}^n CT_i^{(E)} \right) \\ &= \operatorname{argmin}_{E \in \mathbb{R}^2} \left(\sum_{i=1}^n Q_i \times (AD_i^{(E)} + B) \right) \\ E &= \operatorname{argmin}_{E \in \mathbb{R}^2} \left(\sum_{i=1}^n Q_i D_i^{(E)} \right) \end{aligned}$$

Ce qui montre clairement que E doit être le barycentre des différents points de livraison pondérés par leur quantités à livrer respectives. d'où :

$$\begin{aligned} x_E &= \frac{\sum_{i=1}^n Q_i x_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \\ y_E &= \frac{\sum_{i=1}^n Q_i y_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \end{aligned}$$

Livraison directe : la source livre aux clients. Flux d'information rapides, peu de stocks. Mais délais importants, livraison terminale complexe et peu de proximité avec les clients.

Arbitrage stock/livraison : conserver localement les articles les plus vendus

Système	TA	LT	D	S	PC
Deux étages	+	+	+	-	+
Dépôts locaux	-	+	+	-	+
Entrepôt central	+	-	-	+	-
Direct	N/A	-	-	+	-

FIGURE 1 – Avantages et inconvénients des différents réseaux de distribution

(classe A), et conserver en central les articles les moins vendus (classes B et C).

Picking : préparation des commandes, qui consiste à prélever et rassembler les articles dans la quantité spécifiée par la commande avant l'expédition de celle-ci. Si on réapprovisionne en point de commande, on envoie à l'entrepôt de grandes quantités d'un même article, donc *picking* faible. Si on réapprovisionne en re-complètement périodique, on envoie à l'entrepôt que ce qui a été vendu, donc *picking* dispersé.

Cross-docking : fait de transformer les palettes complètes monoproduit sortant des usines en palettes multiproduits prêtes à être expédiées aux clients, par la fracture et l'assemblage des différentes palettes (monoproduit). **Stock de sécurité centralisé** : pour un même niveau de service, le stock de sécurité d'un entrepôt central suivant une demande aléatoire Y est plus faible que la somme des stocks de sécurité des entrepôts répartis, sous l'hypothèse que les demandes des entrepôts

répartis sont des variables aléatoires i.i.d. $(X_1 \dots X_n)$:

$$\begin{aligned}
 Y &= \sum_{i=1}^n X_i \\
 \bar{Y} &= \sum_{i=1}^n \bar{X}_i \\
 \mathbb{V}ar[Y] &= \sum_{i=1}^n \mathbb{V}ar[X_i] \text{ (hypothèse d'indépendance)} \\
 \sigma_Y &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{X_i}^2} \\
 SS_Y &= \sqrt{\sum_{i=1}^n SS_{X_i}^2}
 \end{aligned}$$

Et comme les variables $(X_1 \dots X_n)$ suivent la même loi gaussienne les stocks de sécurité correspondants sont identiques :

$$\begin{aligned}
 \forall i \in [1, n], SS_{X_i} &= \dots = SS_{X_n} \triangleq \frac{1}{n} SS_X \\
 SS_Y &= \frac{SS_X}{\sqrt{n}}
 \end{aligned}$$

3.2 Séance 13 : Transports, problématique et choix du mode

Critères de tarification du fret : poids, dimensions, densité, trajet, nature de la marchandise, valeur de la marchandise, conditionnement.

Palette standard européenne : 1200 mm × 800 mm ou 1200 mm × 1000 mm.

Fréquence *vs* taux de remplissage : une fréquence d'expédition élevée permet de garder les stocks bas (moins coûteux), mais risque de baisser le taux de remplissage (coûteux). Une fréquence d'expédition moins élevée risque d'augmenter les stocks (coûteux), mais augmente le taux de remplissage (moins coûteux).

Rupture de charge : étape pendant laquelle des marchandises transportées par un premier véhicule sont transférées dans un second véhicule, immédiatement ou après une période de stockage (temps de transbordement). Souvent, le transport des bien nécessite 2 ruptures de charge : pré-acheminement et post-acheminement.

Transport routier : souple, peu de ruptures de charges, délais courts, gamme de services étendue, bon rapport prix / vitesse, mais la sécurité et les délais varient selon les pays et les conditions climatiques.

Camion européen : 13 m 50 × 2 m 40 × 2 m 70, 100 m^3 , 3 × 11 palettes ou 2 × 16 palettes, 23,5 t (environ), 1€/km (environ).

Less Than Truck Load (LTL) : on confie ses palettes à expédier à un prestataire qui fait du groupage pour remplir les camions.

Full Truck Load (FTL) : on remplit un camion complet avec ses propres palettes.

Messagerie : pour les petits paquets seulement. Une camionnette effectue une tournée de ramassage et amène sa cargaison à un centre de regroupement (première rupture de charge et manutention). De gros camions transportent les biens du centre de regroupement à un centre d'éclatement. Une autre camionnette réceptionne les cargaisons (deuxième rupture de charge et manutention) et effectue une tournée de distribution. Coût linéaire selon le poids.

Groupage : méthode pour le LTL. Un gros camion effectue la tournée de ramassage (*multipick*), le transport sur longue distance et la tournée de distribution (*multidrop*). Pas de rupture de charge. Coût affine par morceau selon le poids, avec des portions toujours moins croissantes.

Transport d'une traite : méthode pour le FTL. Un gros camion plein va directement de l'origine à sa destination. Coût en créneaux selon le poids (paliers croissants).

Transport ferroviaire : Possibilité de combiner et de faire du porte à porte (ITE), de faire des longues distances avec un tonnage important. Cependant, limitation au réseau ferroviaire ($\pm 30\ 000$ km), pré et post acheminements donc rupture de charge si absence d'ITE. Expédition par wagon isolé, par rame (5 - 6 wagons) ou par train entier (plus avantageux).

Installations terminales embranchées (ITE) : voie ferrée desservant une entreprise, une usine, un entrepôt, une zone industrielle ou une zone portuaire, à partir d'un réseau ferroviaire principal afin de permettre le transport des marchandises sans rupture de charge.

Wagon : 50 t.

Rame : 200 - 300 t.

Train : 2000 - 3000 t.

Transport maritime : différentes techniques (conteneurisation, vrac, navires spécialisés), et organisations (lignes régulières, tramping, pavillons économiques). Taux de fret avantageux, transports lourds et / ou volumineux, bonne couverture géographique, possibilité de stockage portuaire. Cependant délais, absence possible de conteneurs, assurance et emballage onéreux.

Conteneur : TEU ou FEU, classique ou frigorifié, 30/heure en manutention.

Twenty-foot equivalent unit (TEU) : conteneur de 20 pieds soit 15 t (selon densité). En français, équivalent vingt pieds (EVP).

Forty-foot equivalent unit (FEU) : conteneur de 40 pieds soit 30 t (selon densité). En français, équivalent quarante pieds (EQP).

Porte-conteneur : navire pouvant contenir 1500 à 5000 TEU.

Transport fluvial : sur voie naturelles ou canaux, adapté aux produits lourds ou volumineux. Bonne capacité de transport (de 300 t à 25 000 t). Coût par tonne par kilomètre faible. Cependant, transport lent (donc immobilisation des marchandises), coûts de pré et post acheminement importants, ruptures de charge.

Transport aérien : sur un appareil mixte ou tout cargo. Supporte igloos, palettes et container. Sécurité renforcée (certificat de sûreté, témoin d'intégrité, personnel habilité), vitesse, régularité fiabilité et bonne couverture géographique de l'avion, manutention horizontale, emballages peu coûteux. Cependant, limite de volume, coûts élevés, interdictions à certains produits, ruptures de charge.

Coût de la logistique : coûts de transport, coûts de la gestion de l'information, coûts de stockage.

Coûts de transport : ils comportent, dans l'ordre chronologique du trajet : le chargement, le pré-acheminement, le transbordement, le transport principal, les assurances, les frais de douane, le transbordement, le post-acheminement et le déchargement.

Coûts de stockage : coûts au départ (sur la charge de transport, valeur EXW), en transit (en fonction de la durée de transport, valeur FOB), à l'arrivée (selon volume transporté, valeur DDP).

International commercial terms (Incoterms) : termes normalisés qui définissent les transferts de frais et de risques entre acheteurs et vendeurs participant à des échanges nationaux ou internationaux. Quatre groupes d'*Incoterms* : E, F, C, D.

Groupe E (*Departure*) : valeur EXW (*Ex Works* / Sortie Usine).

Groupe F (*Main carriage unpaid*) : valeurs FCA (*Free carrier* / Franco

transporteur), FOB (*Free on board* / Franco à bord), FAS (*Free alongside ship* / Franco le long du navire).

Groupe C (*Main carriage paid*) : valeurs CIP (*Cost insurance payed to* / Coûts et assurances payés jusqu'à), CPT (*Cost payed to* / Coûts payés jusqu'à), CIF (*Cost, insurance, freight* / Coût, assurance, fret), CFR (*Cost and freight* / Coûts et fret).

Groupe D (*Delivered*) : valeurs DAP (*Delivered at place* / Rendu à la destination), DAT (*Delivered at terminal* / Rendu au terminal), DDP (*Delivered and duties paid* / Rendu droits acquittés).

4 Décisions stratégiques et amélioration de la performance

4.1 Séance 14 : achats et RSE

Achats : fonction en charge de l'acquisition de tous les biens, services et prestations de toute nature. Les achats représentent 50 à 70% du coût de revient, et leur réduction peut générer un effet de levier important. Les achats peuvent être segmentés selon trois critères : leur montant (classes A, B, C), la concentration du marché fournisseur (oligopole, concurrence pleine), la nature des risques produit (standard, spécifique).

Achats directs : biens intégrés dans les produits fabriqués et vendus (matières, composants, sous-ensembles, sous-traitance).

Achats indirects : achats nécessaires au fonctionnement de l'entreprise (investissements, maintenance, frais généraux, systèmes d'information, prestations logistiques).

Achat amont : c'est le *sourcing*. Il s'agit de constituer le portefeuille achats : recherche d'innovations, panel fournisseurs, collaboration avec le R&D dans la conception produit, élaboration du cahier des charges ...

Achat aval : c'est le procurement. Il s'agit d'optimiser l'achat du portefeuille existant : finalisation du cahier des charges, appels d'offre, sélection des fournisseurs, approvisionnement, exécution de l'achat ...

Echange informatique de données (EDI) : e-sourcing, e-procurement.

Développement durable (DD) : "développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs" (Gro Harlem Brundtland, 1987). Trois axes : social et sociétal, environnemental, économique et managérial.

Axe social et sociétal : sécurité des biens et des personnes, respect des réglementations et des Droits de l'Homme, participation aux développements locaux, développement des compétences, sécurité et santé du travail, mobilité interne, systèmes d'évaluation et de rémunération, respect des systèmes de représentation, réalité du dialogue social ...

Axe environnemental : réduction de la consommation, éco-conception, réduction des emballages, usines plus propres, réduction des impacts et des nuisances, amélioration des transports, sensibilisation, identification et prévention des risques ...

Axe économique et managérial : satisfaction des besoins client, protection, formation et information des clients, minimisation du coût de possession (et des prix), respect des fournisseurs et sous-traitants, recherche de croissance et de rentabilité, transparence des comptes, éthique des affaires, processus de décision clairs ...

4.2 Séance 15 : flexibilité et réactivité, juste-à-temps et Lean

Juste-à-temps (JAT) : approche née dans les années 70 au Japon. Elle vise à produire et approvisionner le bon produit, au bon moment et au bon endroit, de telle sorte que la demande égale la production (plus de délais). Le JAT part d'un double constat : la variabilité de la demande ne permet plus de travailler sur stocks, et les exigences des clients en matière de délais rendent obsolète le travail à la commande sur délais longs. Le JAT requiert des flux tirés et non plus poussés/

Raccourcissement des délais : réduire les cycles de fabrication (moins de stagnation du produit dans la chaîne, moins de stocks).

Accélération des flux : réduction de la taille de lots de fabrication (diminution du temps de réglage, SMED), réduction de la taille des lots de transport (augmentation de la fréquence des manutentions et des transports), réorganisation du système logistique suivant une logique des flux (réimplantation des ateliers), pilotage des flux par l'aval (méthode des *kanban*), imposer le JAT aux fournisseurs.

Lean manufacturing : approche aussi appelée *Toyota production system*, née aux États-Unis dans les années 2000. Elle vise à éliminer toutes les formes de gaspillage (perte d'efficacité, tâches inutiles, variabilité ...) pour optimiser la création de valeur et réduire les coûts. Cette méthode implique de définir la valeur aux yeux du client, d'identifier les flux et processus véhiculant cette valeur, de tendre les flux ou de les faire tirer par le client, d'impliquer les opérateurs par la formation et la responsabilisation.

Gaspillage : tout ce qui n'apporte pas de valeur d'un point de vue client : stocks, changements d'outils, retards, transports, défauts et rebuts, pannes, administration. La limitation des gaspillages passe par la limitation des stocks, car cela contraint à remédier aux autres dysfonctionnements.

Détrompeur : ou *poka-yoke* ("anti-erreur" en japonais). Dispositif, généralement mécanique, permettant d'éviter les erreurs d'assemblage, de montage ou de branchement.