

UE 4 - Logistique et Gestion de la Supply Chain

UE 4 - Logistique et gestion de la chaîne

Module 4.3 - Modélisation & optimisation de la Supply Chain

Module 4.3 - Modélisation et optimisation de la chaîne d'approvisionnement

Riccardo Rossi

Massimiliano Gastaldi

Riccardo Ceccato, riccardo.ceccato@dicea.unipd.it

1. Questions à choix multiples :

- Choisissez une réponse parmi 3 ou 4 alternatives
- Réponse correcte : 1 point
- Mauvaise réponse ou pas de réponse : 0 point

2. Exercices:

- Les formules nécessaires sont fournies
- Calculer le résultat et signaler le calcul
- Choisissez la bonne réponse parmi 3 ou 4 alternatives
- Réponse correcte : 2 points
- Mauvaise réponse ou pas de réponse : 0 point

Le texte de l'examen sera fourni en anglais et en français.

1. Exemple de questions à choix multiples :

Quel est l'ordre correct des trois principales phases de prise de décision dans la chaîne d'approvisionnement :

- (1) Stratégie ou conception de la chaîne d'approvisionnement, (2) planification de la chaîne d'approvisionnement, (3) opérations de la chaîne d'approvisionnement
- (1) Planification de la chaîne d'approvisionnement, (2) Opérations de la chaîne d'approvisionnement, (3) Stratégie ou conception de la chaîne d'approvisionnement
- (1) Opérations de la chaîne d'approvisionnement, (2) planification de la chaîne d'approvisionnement, (3) stratégie ou conception de la chaîne d'approvisionnement

2. Exemples d'exercices :

Un camion coûte 500 \$ par jour, indépendamment du poids réel chargé, et il transporte au maximum 25 tonnes. Quel est le coût total si vous devez transporter 35 tonnes ?

- 500\$
- 1000\$
- 2000\$

Écrivez ici votre calcul :

$35/25 = 1,4 ; 1,4 > 1 \rightarrow 2 \text{ camions sont nécessaires; } 2 \times 500\$ = 1000 \$$

Une entreprise a vendu 5 unités (il y a 1 an), 4 unités (il y a 2 ans), 6 unités (il y a 3 ans) et 7 unités (il y a 4 ans). Prévoyez les unités vendues pour l'année en cours en utilisant la moyenne mobile simple. La formule est :

$$F_t = \frac{A_{t-1} + A_{t-2} + A_{t-3} + \dots + A_{t-n}}{n}$$

- 3,5 unités
- 5,5 unités
- 10,5 unités

Écrivez ici votre calcul :

$$\frac{5 + 4 + 6 + 7}{4} = 5.5 \text{ units}$$

F_t = Forecast for the coming period

n = Number of periods to be averaged

A_{t-1} = Actual occurrence in the past period

A_{t-2} , A_{t-3} , and A_{t-n} = Actual occurrences two periods ago, three periods ago, and so on, up to n periods ago

Structure du cours

Partie théorique :

- Introduction
- Conception des réseaux de distribution et de transport
- Planification de l'emplacement des installations
- Gestion des capacités
- Stratégie d'approvisionnement
- Stratégie de production
- Prévion de la demande
- Gestion des stocks
- Gestion des risques
- Optimisation de la chaîne d'approvisionnement

Partie pratique :

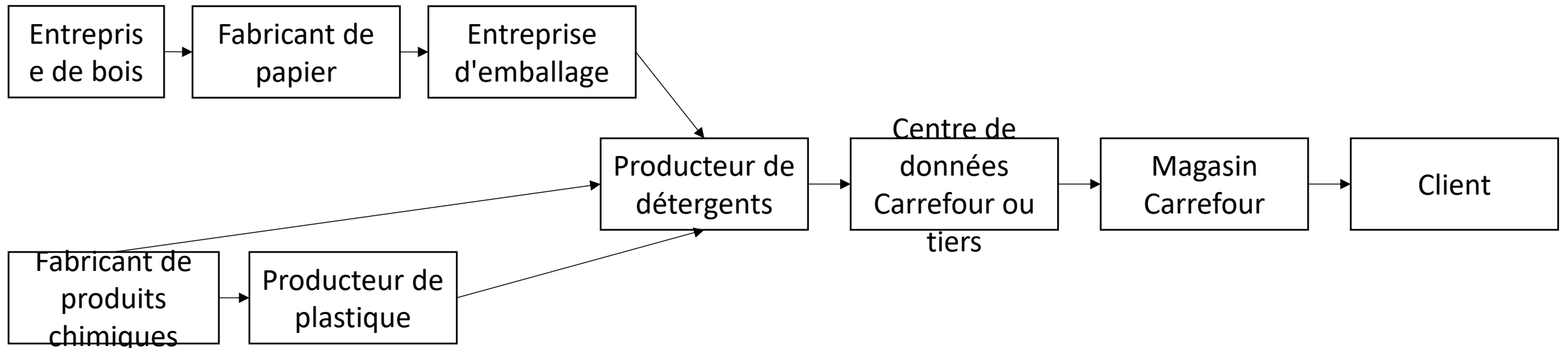
- Exercices
- Logiciel de modélisation et d'optimisation de la supply chain :
 - Problème de localisation des installations
 - Optimisation du réseau
 - Simulation de la chaîne d'approvisionnement (performance de la chaîne d'approvisionnement)
 - Modélisation des risques

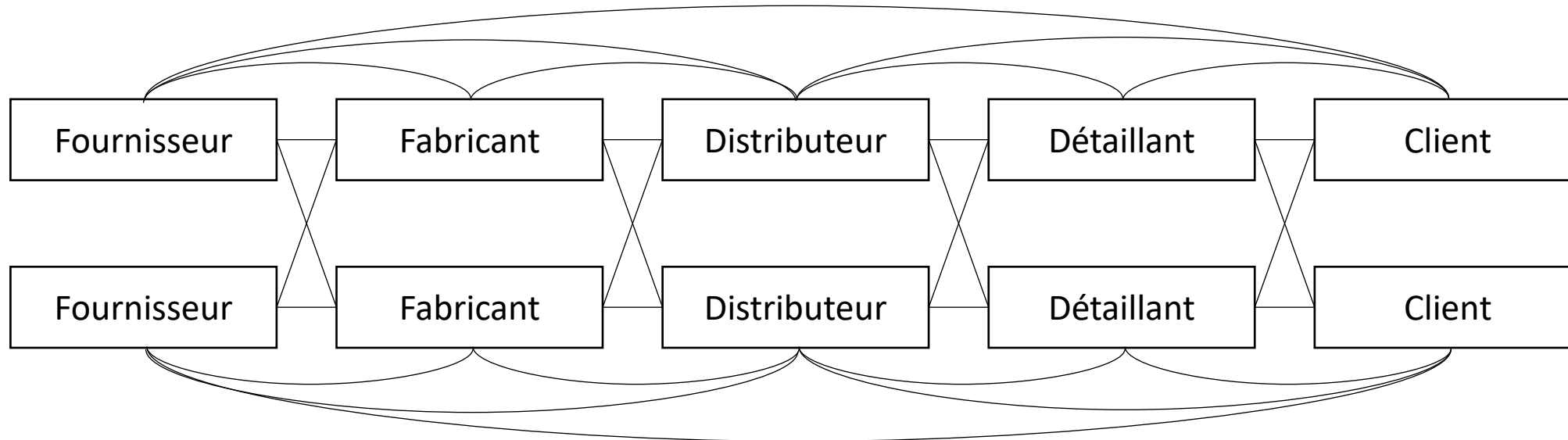
Définition d'une chaîne d'approvisionnement

Une chaîne d'approvisionnement comprend toutes les parties impliquées, directement ou indirectement, dans la satisfaction d'une demande client et comprend toutes les fonctions impliquées dans la réception et la satisfaction de cette demande (par exemple, le développement de nouveaux produits, le marketing, les opérations, la distribution, les finances et le service client).

Une chaîne d'approvisionnement implique un flux constant d'informations, de produits et de fonds entre différentes étapes.

Le client fait partie intégrante de la chaîne d'approvisionnement.





Une chaîne d'approvisionnement typique peut comprendre les étapes suivantes :

- Clients
- Détaillants
- Grossistes/distributeurs
- Fabricants
- Fournisseurs de composants/matières premières

Chaque étape d'une chaîne d'approvisionnement est reliée par un flux bidirectionnel de produits, d'informations et de fonds.

Objectif d'une chaîne d'approvisionnement

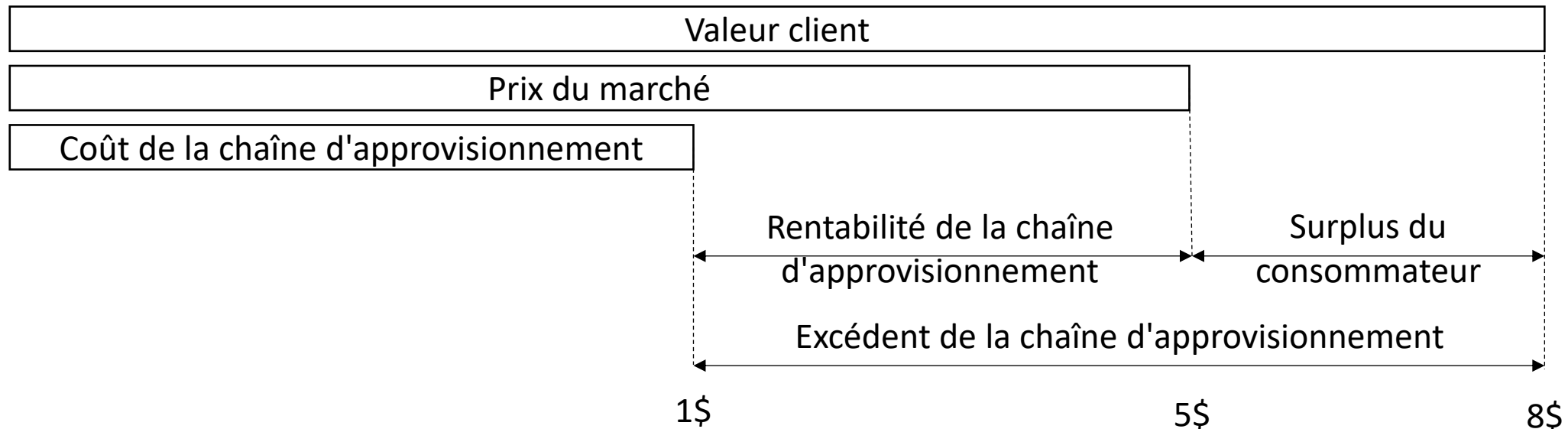
L'objectif de chaque chaîne d'approvisionnement doit être de maximiser la valeur globale générée (excédent de la chaîne d'approvisionnement).

$$\text{Supply Chain Surplus} = \text{Customer Value} - \text{Supply Chain Cost}$$

La valeur du produit final :

- peut varier pour chaque client
- peut être estimé par le montant maximum que le client est prêt à payer pour cela

$$\text{Customer Value} - \text{Market price} = \text{Consumer surplus}$$



Le succès de la chaîne d'approvisionnement doit être mesuré en termes d'excédent de la chaîne d'approvisionnement et non en termes de bénéfices à une étape individuelle.

Le client est la seule source de revenus.

Tous les autres flux de trésorerie sont simplement des échanges de fonds qui se produisent au sein de la chaîne d'approvisionnement, étant donné que les différentes étapes ont des propriétaires différents.

Une gestion efficace de la chaîne d'approvisionnement implique la gestion des actifs de la chaîne d'approvisionnement et des flux de produits, d'informations et de fonds pour accroître l'excédent total de la chaîne d'approvisionnement.

Décisions dans une chaîne d'approvisionnement

Les décisions se divisent en trois phases, en fonction de la fréquence de chaque décision et du laps de temps pendant lequel une phase de décision a un impact.

1. Stratégie ou conception de la chaîne d'approvisionnement : comment structurer la chaîne d'approvisionnement au cours des prochaines années :

- quelle sera la configuration de la chaîne
- comment les ressources seront allouées
- quels processus chaque étape exécutera

Une entreprise doit s'assurer que la configuration de la chaîne d'approvisionnement soutient ses objectifs stratégiques et augmente l'excédent de la chaîne d'approvisionnement pendant cette phase.

Les décisions relatives à la conception de la chaîne d'approvisionnement sont généralement prises sur le long terme (une question d'années) et sont coûteuses à modifier à court terme.

L'incertitude quant aux conditions de marché anticipées au cours des prochaines années doit être prise en compte.

2. Planification de la chaîne logistique : l'horizon temporel considéré est d'un trimestre à un an. La configuration de la chaîne logistique déterminée lors de la phase stratégique est figée.

Cette configuration établit des contraintes dans lesquelles la planification doit être effectuée.

L'objectif de la planification est de maximiser l'excédent de la chaîne d'approvisionnement qui peut être généré sur l'horizon de planification, compte tenu des contraintes établies pendant la phase stratégique ou de conception.

L'incertitude liée à la demande, aux taux de change et à la concurrence sur cet horizon temporel doit être prise en compte.

Le résultat est un ensemble de politiques opérationnelles qui régissent les opérations à court terme.

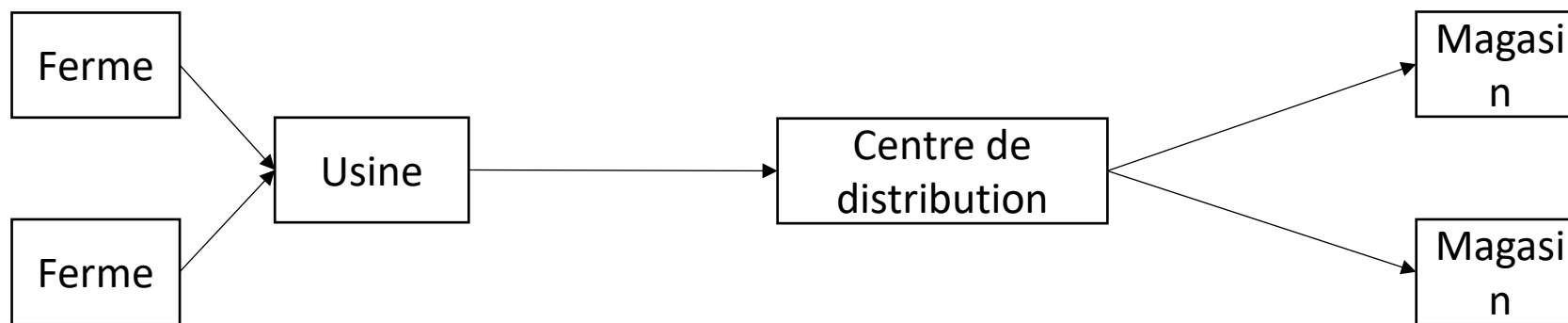
3. Fonctionnement de la chaîne logistique : l'horizon temporel est hebdomadaire ou quotidien. Les entreprises prennent des décisions concernant les commandes individuelles des clients.

La configuration de la chaîne d'approvisionnement est considérée comme fixe et les politiques de planification sont déjà définies.

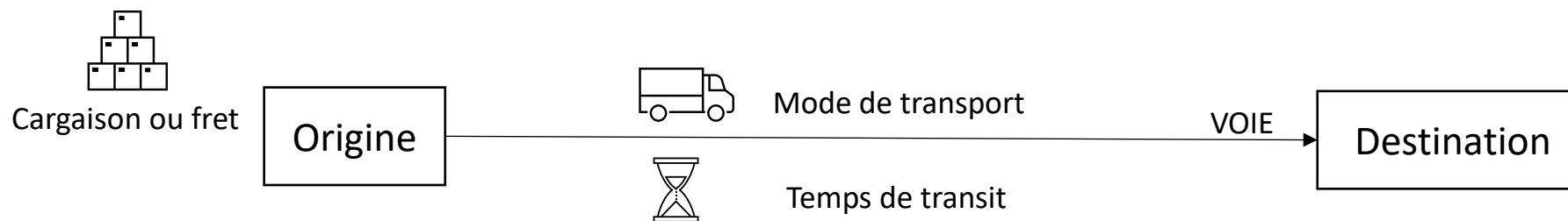
Il y a moins d'incertitude concernant les informations sur la demande.

L'objectif des opérations de la chaîne d'approvisionnement est de gérer les commandes entrantes des clients de la meilleure façon possible.

Le transport fait référence au déplacement d'un produit d'un endroit à un autre depuis le début d'une chaîne d'approvisionnement jusqu'au client.



Le transport représente une part importante des coûts supportés par la plupart des chaînes d'approvisionnement (2 à 3 % du chiffre d'affaires total et 6 à 8 % des coûts de l'entreprise).



Acteurs principaux

- Expéditeur:
 - Cela nécessite le mouvement du produit
 - Elle essaie de maximiser le rendement de ses actifs (par exemple locomotives, camions, avions)
- Transporteur:
 - Il déplace ou transporte le produit
 - Il tente de minimiser le coût total tout en offrant un niveau de réactivité approprié au client
- Propriétaire d'infrastructures de transport
- Responsable de la politique des transports :
 - Il aborde les ressources nationales
 - Il empêche les abus de pouvoir de monopole
 - Elle favorise une concurrence loyale
 - Il équilibre les préoccupations environnementales, énergétiques et sociales

Facteurs affectant les décisions de conception du réseau

Facteurs stratégiques

- Mettre l'accent sur la maîtrise des coûts : trouver l'emplacement le moins coûteux pour les installations de fabrication
- Magasin de proximité : réseau avec de nombreux petits magasins qui couvrent une zone
- Magasin discount : réseau avec quelques grands magasins qui couvrent une zone
- Chaîne d'approvisionnement mondiale : des installations dans différents pays jouant des rôles différents

Facteurs technologiques

- Si la technologie de production permet des économies d'échelle importantes, quelques sites à grande capacité sont les plus efficaces
- Si les installations ont des coûts fixes inférieurs, de nombreuses installations locales sont préférées car cela permet de réduire les coûts de transport.

Facteurs macroéconomiques

À mesure que le commerce mondial s'est développé, les facteurs macroéconomiques ont eu une influence significative sur le succès ou l'échec des réseaux de chaînes d'approvisionnement.

- Tarifs et incitations fiscales. Les tarifs désignent les droits de douane qui doivent être payés lorsque des produits et/ou des équipements sont déplacés au-delà des frontières internationales, étatiques ou urbaines. Des tarifs élevés entraînent la multiplication des sites de production au sein d'un réseau de chaîne d'approvisionnement, chaque site ayant une capacité allouée inférieure. Les incitations fiscales sont une réduction des tarifs ou des taxes que les pays, les États et les villes accordent souvent pour encourager les entreprises à implanter leurs installations dans des zones spécifiques. Les pays en développement créent souvent des zones de libre-échange dans lesquelles les droits de douane et les tarifs sont assouplis tant que la production est utilisée principalement pour l'exportation ; ils offrent également des incitations fiscales supplémentaires basées sur la formation, les repas, le transport et d'autres installations offertes à la main-d'œuvre. De nombreux pays imposent également des exigences minimales en matière de contenu local et des limites aux importations pour aider à développer les fabricants locaux.
- Risque de change et de demande. Les fluctuations des taux de change sont courantes. Pour tirer parti des fluctuations des taux de change et augmenter les profits, un moyen efficace consiste à créer une surcapacité dans le réseau et à rendre cette capacité flexible afin qu'elle puisse être utilisée pour approvisionner différents marchés. Les entreprises doivent également tenir compte des fluctuations de la demande causées par les changements dans les économies des différents pays.
- Frais de transport et de carburant. Les fortes fluctuations peuvent être mieux gérées en couvrant les prix sur les marchés des matières premières ou en signant des contrats à long terme adaptés .

Facteurs politiques

- Les entreprises préfèrent implanter leurs installations dans des pays politiquement stables où les règles du commerce et de la propriété sont bien définies.
- Indice de risque politique mondial : il vise à mesurer la capacité d'un pays à résister aux chocs ou aux crises au niveau du gouvernement, de la société, de la sécurité et de l'économie

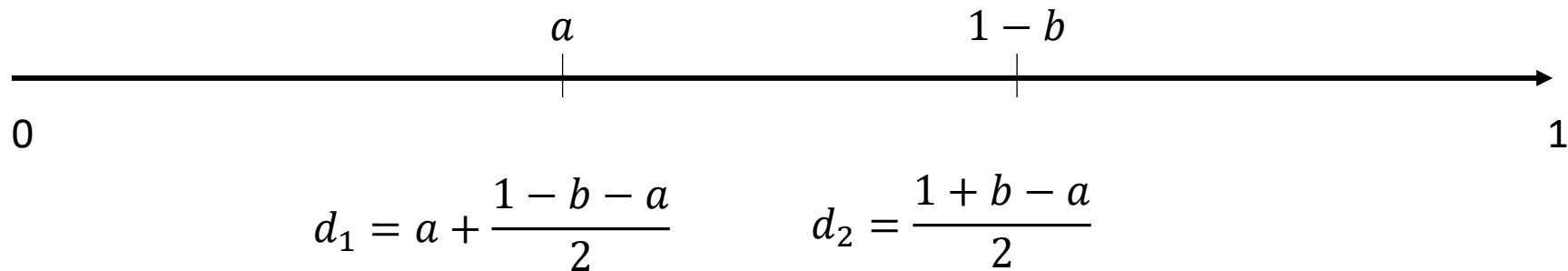
Facteurs d'infrastructure

- Disponibilité des sites et de la main-d'œuvre, proximité des terminaux de transport, service ferroviaire, proximité des aéroports et des ports maritimes, accès aux autoroutes, congestion et services publics locaux

Facteurs concurrentiels

Une décision fondamentale que prennent les entreprises est de savoir si elles doivent implanter leurs installations à proximité ou loin de leurs concurrents. La forme de concurrence et des facteurs tels que la disponibilité des matières premières ou de la main-d'œuvre influencent cette décision.

- Externalités positives. Les externalités positives se produisent lorsque la colocalisation de plusieurs entreprises profite à toutes. Les externalités positives conduisent les concurrents à s'implanter à proximité les uns des autres.
- Localisation pour diviser le marché. En l'absence d'externalités positives, les entreprises s'implantent pour pouvoir capturer la plus grande part possible du marché. Modèle simple (Hotelling) :



- Les deux entreprises maximisent leur part de marché si elles se rapprochent l'une de l'autre et s'implantent à $a = b = 1/2$.
- Le résultat de la concurrence est que les deux entreprises s'implantent à proximité l'une de l'autre, même si cela augmente la distance moyenne par rapport au client.
- Si les entreprises sont en concurrence sur les prix et que le client supporte les frais de transport, il peut être optimal pour les deux entreprises de s'implanter le plus loin possible l'une de l'autre.

Temps de réponse client et présence locale

- Les entreprises qui ciblent des clients qui apprécient un temps de réponse court doivent s'implanter à proximité d'eux.
- Si une entreprise livre ses produits à ses clients, l'utilisation d'un moyen de transport rapide lui permet de construire moins d'installations tout en garantissant un temps de réponse court. Cette option augmente cependant les coûts de transport.

Coûts de logistique et d'installation

Les coûts de logistique et d'installation engagés au sein d'une chaîne d'approvisionnement changent en fonction du nombre d'installations, de leur emplacement et de la répartition des capacités.

- Les coûts des stocks et des installations augmentent à mesure que le nombre d'installations dans une chaîne d'approvisionnement augmente. Les coûts de transport diminuent à mesure que le nombre d'installations augmente. Si le nombre d'installations augmente au point de perdre les économies d'échelle en amont, les coûts de transport augmentent.
- La conception du réseau de la chaîne d'approvisionnement est également influencée par la transformation qui se produit dans chaque installation. Lorsqu'il y a une réduction significative du poids ou du volume des matériaux à la suite d'une transformation, il peut être préférable d'implanter les installations plus près de la source d'approvisionnement plutôt que du client.
- Le nombre d'installations dans un réseau de chaîne logistique doit être au moins égal au nombre qui minimise le coût

de réponse à ses clients.

Étude de cas introductive

[D'après Ivanov et al. (2019)]

- Une grande partie du bois est achetée auprès de fournisseurs asiatiques.
- 3 ports à conteneurs
- Le conteneur est transbordé sur des camions loués, qui l'amènent sur le site de fabrication de Wood Company près de Munich
- Les coûts de transport des matières premières sont assez élevés. Wood Company ne possède pas ses propres camions. Lorsqu'une certaine quantité de marchandises doit être transportée, Wood Company loue un camion auprès d'une société de transport de marchandises à un tarif journalier fixe. Est-ce une bonne idée ?
- Wood Company prépare l'intégration de deux autres usines de meubles dans son entreprise. Pour garantir la disponibilité de quantités suffisantes de bois, les importations seront également traitées via le port néerlandais de Rotterdam.
- Faut-il conserver le mode de transport actuel ? Quelles sont les modifications possibles à apporter au transport vers l'arrière-pays ? Wood Company doit-elle acheter ses propres camions et créer son propre service de transport ? Quel site de production doit-il être approvisionné depuis quel port afin de réduire au minimum les coûts de transport ? Faut-il confier tous les services de transport nécessaires à un prestataire de services de transport ?



Structures génériques du réseau de transport

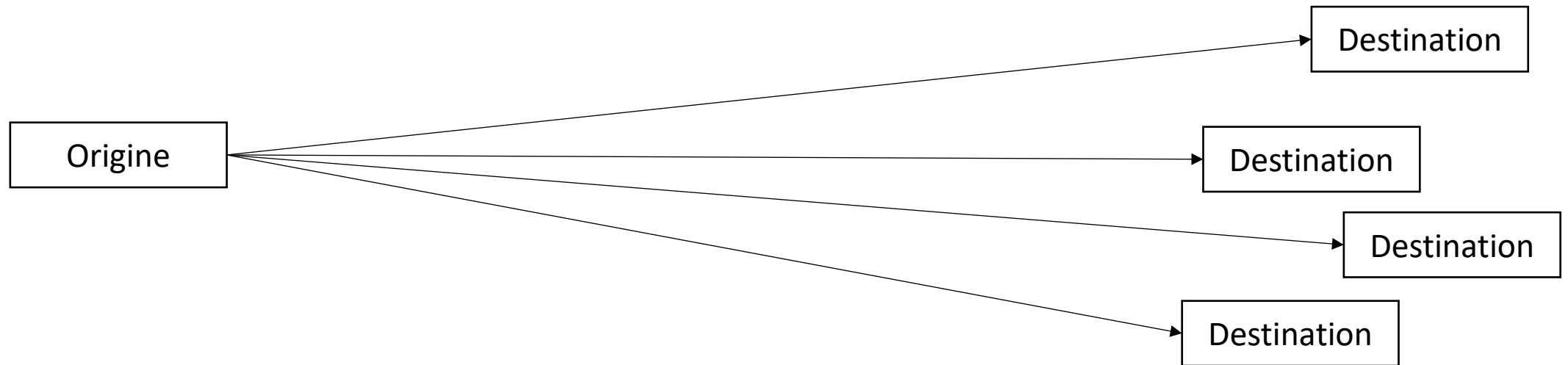
Lien de transport

- Les quantités d'approvisionnement sont disponibles à un seul endroit (l'origine) et la quantité d'approvisionnement disponible est demandée en totalité ou en partie à partir d'un seul endroit (la destination)
- Il n'y a aucune possibilité d'optimiser (réduire) les efforts de transport si la destination souhaite recevoir immédiatement la quantité demandée
- Le délai de livraison des envois individuels peut être convenu



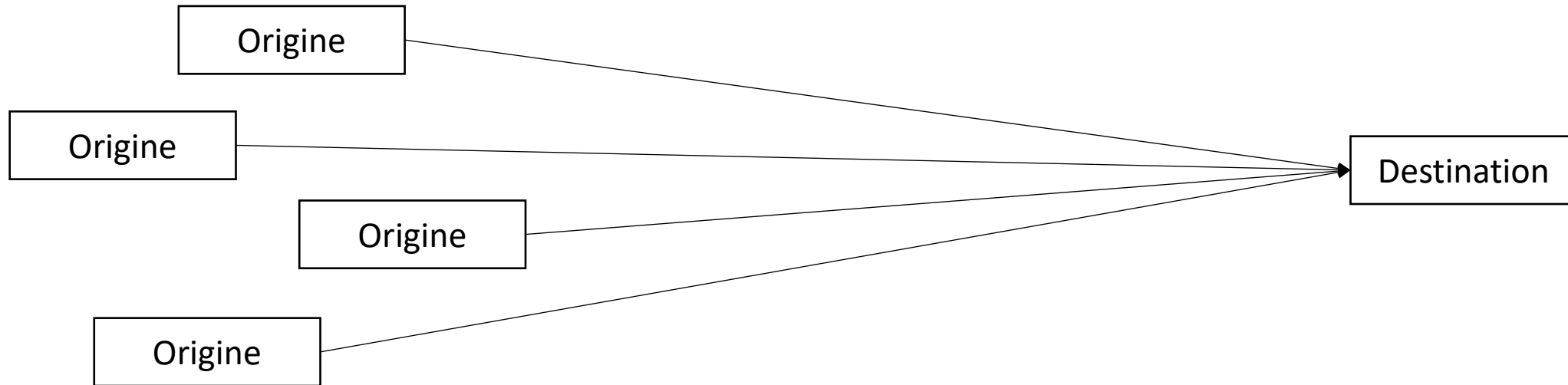
Réseau de distribution

- Les décisions concernant le réseau de distribution sont les mêmes que celles concernant la liaison de transport
- Seul le moment de la livraison peut être décidé



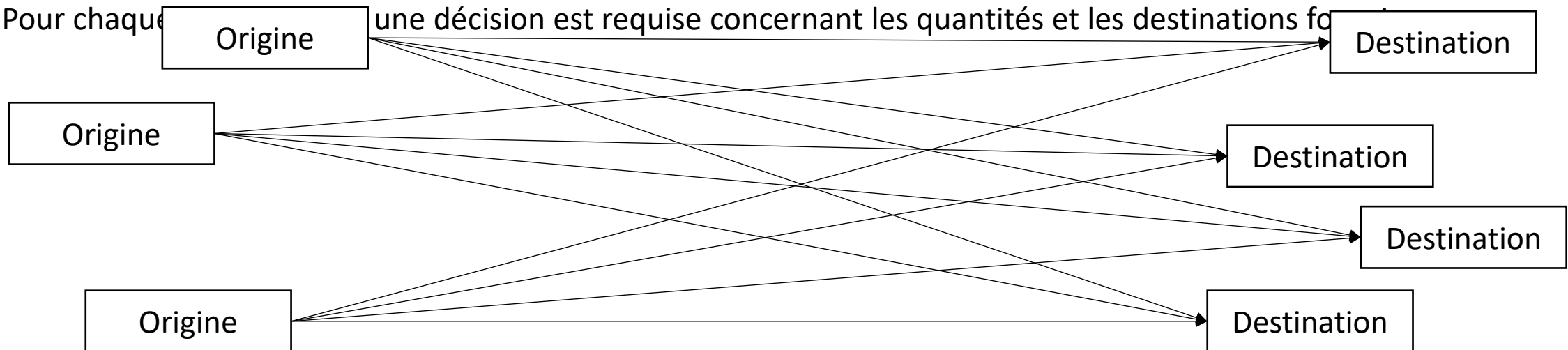
Réseau d'approvisionnement

- La destination demande une certaine quantité d'approvisionnement, mais la quantité demandée est répartie sur plusieurs emplacements d'origine
- Il est nécessaire de décider quelle origine doit fournir quelle quantité d'approvisionnement



Réseau plusieurs-à-plusieurs

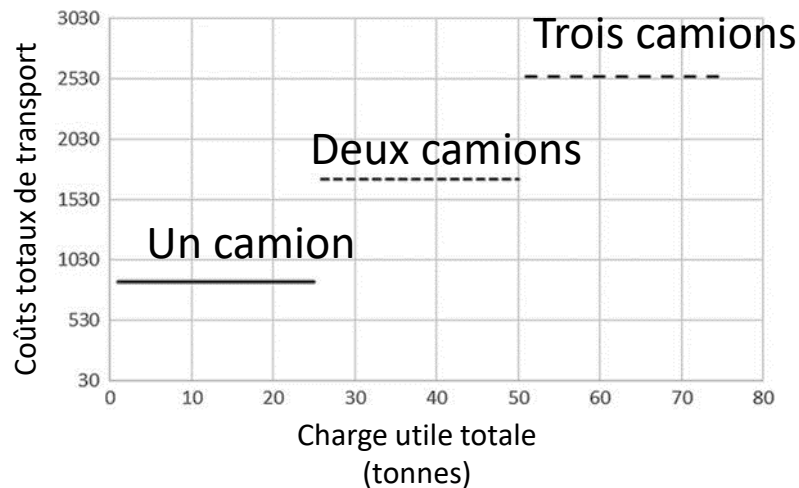
- Plusieurs origines fournissent des quantités d'approvisionnement, mais il existe également plusieurs destinations exigeantes
- Il est nécessaire de décider à partir de quel(s) endroit(s) une destination individuelle est fournie
- Pour chaque Origine une décision est requise concernant les quantités et les destinations fo



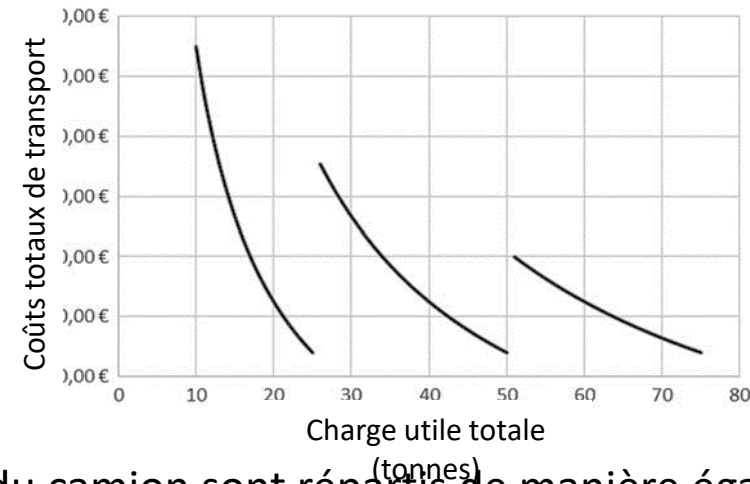
Économies d'échelle dans les transports

Les économies d'échelle sont généralement réalisées si de grandes quantités d'un produit sont achetées ou si des configurations inutiles de machines peuvent être évitées.

- Un camion coûte 850 € par jour (indépendamment du poids réel chargé)
- Il fournit une charge utile d'au plus 25 tonnes



- Il y a des discontinuités dans les coûts totaux chaque fois qu'un autre camion est nécessaire



- Si les coûts du camion sont répartis de manière égale sur la charge utile complète attribuée à un camion, alors les coûts moyens par tonne diminuent à mesure que la charge utile augmente.
- Si la charge utile dépasse 25 tonnes, il devient nécessaire de louer un camion supplémentaire, ce qui entraîne une

Consolidation des expéditions

La consolidation est la combinaison de deux ou plusieurs quantités à expédier entre une origine donnée et une destination donnée.

	Lun	Mar	Épouser	Jeu	Ven	Assis	Soleil	Sommes
Demande OD (en tonnes)	32	53	18	34	43	60	30	270
Accompli demande	32	53	18	34	43	60	30	270
Embauché camions	2	3	1	2	2	3	2	15
Frais (€)	1700	2550	850	1700	1700	2550	1700	12 750
Frais (par tonne) (€)	53.13	48.11	47.22	50,00	39,53	42,50	56,67	

- 15 camions à louer
- hebdomadaires s'élèvent à 12 750 € avec un taux de remplissage moyen de 71,5 %

Report

La demande entrante est fusionnée avec les quantités reportées à la demande disponible récente. Les chargements complets (FTL) sont dérivés des quantités de demande disponibles, mais les quantités résiduelles sont reportées à un jour ultérieur de la semaine. Cette stratégie de report est fragile.

	Lun	Mar	Épouse r	Jeu	Ven	Assis	Soleil	Som mes
Demande OD entrante	32	53	18	34	43	60	30	270
Reporté demande	0	7	10	3	12	5	15	
Disponible demande	32	60	28	37	55	65	45	
Maintenant accompli demande	25	50	25	25	50	50	45	270
Embauché camions	1	2	1	1	2	2	2	11
Frais (€)	850	1700	850	850	1700	1700	1700	9350
Frais (par tonne) (€)	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	37,78	

- 11 camions à louer
- hebdomadaires sont de 9 350 € à un taux de remplissage moyen supérieur à 98 %

Demande en attendant dans Hambourg

	Lun	Mar	Épouse r	Jeu	Ven	Assis	Soleil	Somm es
Demande OD (dans tonnes)	32	53	18	34	43	60	30	270
Accompli demande	32	53	18	34	43	60	30	270
Embauché camions	2	3	1	2	2	3	2	15
Frais (€)	1700	2550	850	1700	1700	2550	1700	12 750
Frais (par tonne) (€)	53,13	48,11	47,22	50,00	39,53	42,50	56,67	48,17
Utilisation (%)	64	71	72	68	86	80	60	72

Demande en attendant dans Wilhelmshaven

	Lun	Mar	Épouse r	Jeu	Ven	Assis	Soleil	Somm es
Demande OD (dans tonnes)	13	12	25	13	26	38	11	138
Accompli demande	13	12	25	13	26	38	11	138
Embauché camions	1	1	1	1	2	2	1	9
Frais (€)	850	850	850	850	1700	1700	850	7650
Frais (par tonne) (€)	65,38	70,83	34,00	65,38	65,38	44,74	77,27	60,43
Utilisation (%)	52	48	100	52	52	76	44	61

Demande en attendant dans Bremerhaven

	Lun	Mar	Épouse r	Jeu	Ven	Assis	Soleil	Somm es
Demande OD (dans tonnes)	23	42	31	28	38	50	20	232
Accompli demande	23	42	31	28	38	50	20	232
Embauché camions	1	2	2	2	2	2	1	12
Frais (€)	850	1700	1700	1700	1700	1700	850	10 200
Frais (par tonne) (€)	36,96	40,48	54,84	60,71	44,74	34,00	42,50	44,89
Utilisation (%)	92	84	62	56	76	100	80	79

- 36 camions à louer
- hebdomadaires s'élèvent à 30 600 € avec un taux de remplissage moyen compris entre 61 % et 79 %
- Les coûts moyens par tonne déplacée varient entre 44,89 € et 60,43 €
- Seuls 17 des 36 camions loués sont entièrement chargés

Course de lait

Un camion visite deux ou plusieurs points de ramassage avant d'amener la totalité du chargement vers une destination commune. Des tournées de collecte sont

possibles :

- (1) Hambourg, Bremerhaven et Wilhelmshaven sont desservies par le même camion comme lieux de prise en charge
- (2) Hambourg et Bremerhaven sont desservies en une seule tournée
- (3) Les quantités demandées en attente à Hambourg et à Wilhelmshaven sont consolidées
- (4) Un chargement de camion demande des quantités à Bremerhaven et à

	Lun	Mar	Épouse r	Jeu	Ven	Assis	Soleil	Somm es
Demande OD (dans tonnes)	32	53	18	34	43	60	30	270
Accompli demande	25	50	0	25	25	50	25	200
Embauché camions	1	2	0	1	1	2	1	8
Frais (€)	850	1700	–	850	850	1700	850	6.800
Utilisation (%)	100	100	0	100	100	100	100	86

Demande en attendant dans Bremerhaven

	Lun	Mar	Épouse r	Jeu	Ven	Assis	Soleil	Somm es
Demande OD (dans tonnes)	23	42	31	28	38	50	20	232
Accompli demande	0	25	25	25	25	50	0	150
Embauché camions	0	1	1	1	1	2	0	6
Frais (€)	–	850	850	850	850	1700	–	5100
Utilisation (%)	0	100	100	100	100	100	0	71

Demande en attendant dans Wilhelmshaven

	Lun	Mar	Épouse r	Jeu	Ven	Assis	Soleil	Somm es
Demande OD (dans tonnes)	13	12	25	13	26	38	11	138
Accompli demande	0	7	25	0	25	25	11	93
Embauché camions	0	1	1	0	1	1	1	5
Frais (€)	–	850	850	–	850	850	850	4250
Utilisation (%)	0	28	100	0	100	100	44	53

Restant demande accompli dans tournées de traite

	Lun	Mar	Épous er	Jeu	Ven	Assis	Soleil	Somm es
Milkrun demande dans Hambourg (HH)	7	3	18	9	18	10	5	70
Milkrun demande dans Bremerhaven (BHV)	23	17	6	3	13	0	20	82
Milkrun demande dans Wilhelmshaven (PVT)	13	5	0	13	1	13	0	45
Total demande	43	25	24	25	32	23	25	
Milkrun HH-BHV-WHV	25	25		25				
Milkrun HH-BHV			24		25		25	
Milkrun HH-VTT						23		
Milkrun BHV-WHV	18				7			
Accompli demande	43	25	24	25	32	23	25	
Embauché camions	2	1	1	1	2	1	1	9
Frais (€)	1700	850	850	850	1700	850	850	7650
Utilisation (%)	86	100	96	100	64	92	100	91
Dans l'ensemble nombre de embauché camions	3	5	3	3	5	6	3	28
Frais (€)	2550	4250	2550	2550	4250	5100	2550	23 800
Quantité déplacée	68	107	74	75	107	148	61	640
Frais par tonne (€)	38	40	34	34	40	34	42	37,38
Utilisation (%)	91	86	99	100	86	99	81	92

- 28 camions à louer
- hebdomadaires 23 800 € avec un taux de remplissage moyen de 92 %
- Coûts moyens par tonne de 37,38 €

Cependant:

- Au jour le jour, les tournées de traite doivent être adaptées à la demande récente
- Si les quantités totales provenant des sites de collecte sont légèrement supérieures à la quantité de camions pleins, l'incorporation d'un camion presque vide ne peut être évitée.

Transbordement

Les marchandises sont transférées d'un camion à un autre, afin d'augmenter le taux de remplissage des camions

parce



- Les camions qui voyagent des ports vers l' installation de transbordement parcourent des distances relativement courtes, ils peuvent donc faire deux ou même trois navettes entre leur port de ramassage et Hanovre, de sorte qu'un seul camion suffit à acheminer toutes les quantités du port vers l' installation de transbordement dans l'arrière-pays portuaire.
- En raison de la consolidation du flux entrant de quantités provenant des trois ports maritimes, il existe d'énormes possibilités de constituer des chargements complets de camions pour le service de transport principal entre Hanovre et Munich.
Aménagements possibles pour un camion loué (disponible et payant 24h)
 - A. Trois cycles de transport entre un port et l'installation de transbordement, puis un trajet principal de Hanovre à Munich
 - B. Six cycles d'alimentation et aucun trajet principal
 - C. Un seul voyage principal

Tarifs réduits :

- 750 €, car l'exploitant du camion supporte moins de frais pour les nuitées du véhicule et de l'équipage (modèle de type B)
- 700 €, pour un camion effectuant un seul trajet principal en raison de distances de déplacement réduites (modèle de type C)

Demande en attendant dans Hambourg

	Lun	Mar	Épouse r	Jeu	Ven	Assis	Soleil	Somme s
Demande OD (dans tonnes)	32	53	18	34	43	60	30	270
Accompli demande	32	53	18	34	43	60	30	270
Requis mangeoire services	2	3	1	2	2	3	2	15

Demande en attendant dans Bremerhaven

	Lun	Mar	Épouse r	Jeu	Ven	Assis	Soleil	Somme s
Demande OD (dans tonnes)	23	42	31	28	38	50	20	232
Accompli demande	23	42	31	28	38	50	20	232
Requis mangeoire services	1	2	2	2	2	2	1	12

Demande en attendant dans Wilhelmshaven

	Lun	Mar	Épouse r	Jeu	Ven	Assis	Soleil	Somme s
Demande OD (dans tonnes)	13	12	25	13	26	38	11	138
Accompli demande	13	12	25	13	26	38	11	138
Requis mangeoire services	1	1	1	1	2	2	1	9

$$Z = 850y_A + 750y_B + 700y_C$$

$$3y_A + 6y_B \geq k_{feed}$$

$$1y_A + 1y_C \geq k^{mh}$$

$$y_A, y_B, y_C \in \{0; 1; 2; \dots\}$$

	Lun	Mar	Épouse r	Jeu	Ven	Assis	Soleil	Somme s
Total demande Hanovre à Munich	68	107	74	75	107	148	61	640
Requis mangeoire cycles	4	6	4	5	6	7	4	36
Requis mangeoire cycles	3	5	3	3	5	6	3	28
Embauché camionneurs pour type-A-modèle	2	5	2	2	2	3	2	18
Embauché camionneurs pour type-B-modèle	0	0	0	0	0	0	0	0
Embauché camionneurs pour type-C-modèle	1	0	1	1	3	3	1	10
Disponible mangeoire cycles	6	15	6	6	6	9	6	54
Disponible sur les lignes principales services	3	5	3	3	5	6	3	28
Embauche frais (€)	2400	4250	2400	2400	3800	4650	2400	22 300
Embauché camions	3	5	3	3	5	6	3	28

- 28 camions à louer
- hebdomadaires sont réduits de 6 % par rapport aux tournées de livraison de lait

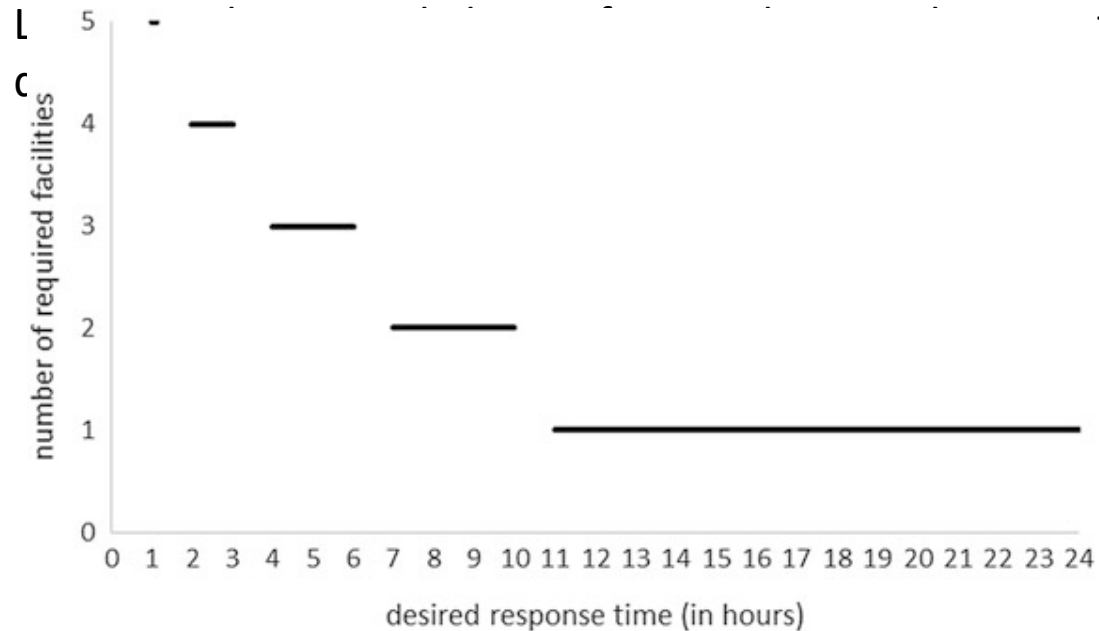
Cependant:

- L'installation de transbordement doit être construite, louée ou louée
- Les activités de transbordement et les processus de stockage nécessaires entraînent des coûts

générales pour la conception et l'évaluation des réseaux de transport :

1. les besoins des clients doivent être identifiés, mais ils sont inconnus, cachés ou changeront
2. les coûts d'installation et de déploiement du réseau de transport doivent être déterminés, mais ils sont soumis à des impacts externes, tels que la demande fluctuante des clients, les variations des prix du carburant, les coûts de main-d'œuvre, ...

Par conséquent, seule une estimation approximative des avantages en termes de satisfaction client et de coûts est possible.

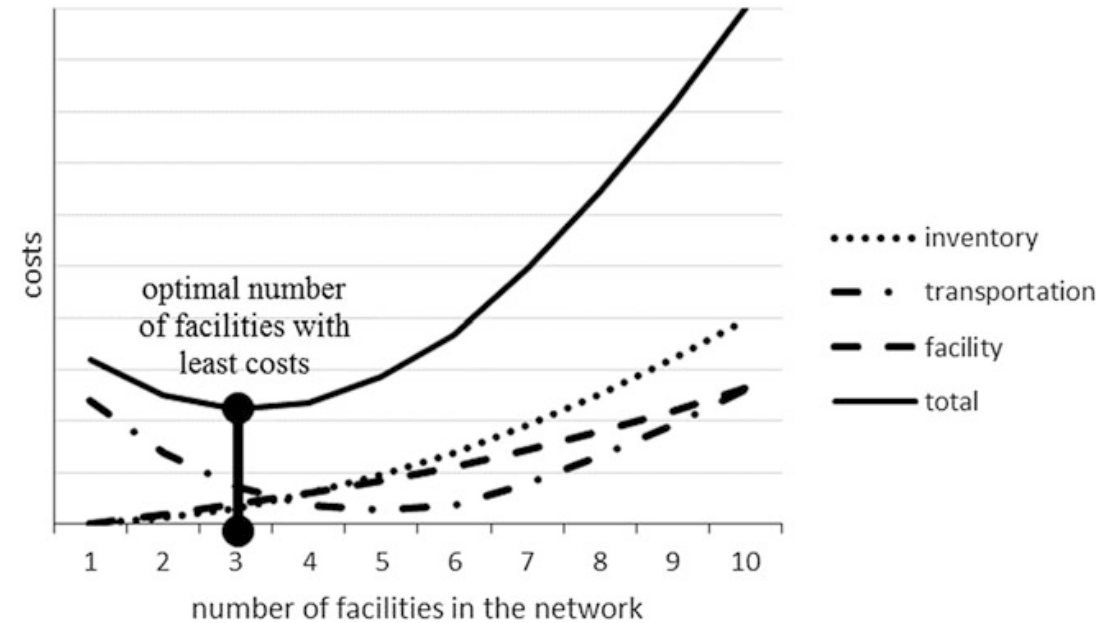


té à réagir immédiatement et avec une grande fiabilité à une

- Le temps moyen de réapprovisionnement ou temps de réponse, qui équivaut à la différence entre le moment d'arrivée du matériel supplémentaire et le moment où le besoin est exprimé, tend à diminuer avec l'augmentation du nombre de nœuds du réseau
- Il existe une forte relation entre le nombre d'installations de stockage de matériel d'approvisionnement et le niveau de service client
- Les coûts de fonctionnement de toutes les installations augmentent si le nombre d'installations exploitées augmente

Il y a trois facteurs de coût majeurs à prendre en compte lors de la détermination de la conception de réseau appropriée :

1. Coûts d'inventaire : ils ont tendance à augmenter si le nombre d'installations en réseau augmente, car chaque installation détient une certaine quantité d'inventaire
2. Coûts des installations : ils augmentent si le nombre d'installations augmente
3. Frais de transport :
 - jusqu'à un certain nombre d'installations de transbordement entretenues, des économies d'échelle supplémentaires peuvent être réalisées par consolidation
 - Au-delà d'une valeur seuil, il n'est plus possible de remplir complètement un camion. La quantité moyenne à transporter par camion diminue, car la demande totale de transport est répartie sur un plus grand nombre d'options de transport, de sorte que les coûts par tonne transportée augmentent encore



La fonction des coûts totaux est convexe, avec un nombre optimal d'installations ayant des coûts totaux minimaux. L'intégration de ce nombre optimal d'installations minimise les coûts totaux du système de transport et contribue ainsi à équilibrer les coûts et la satisfaction des clients.

La performance d'un réseau de distribution doit être évaluée selon deux dimensions :

1. Valeur apportée au client
2. Coût de la satisfaction des besoins des clients

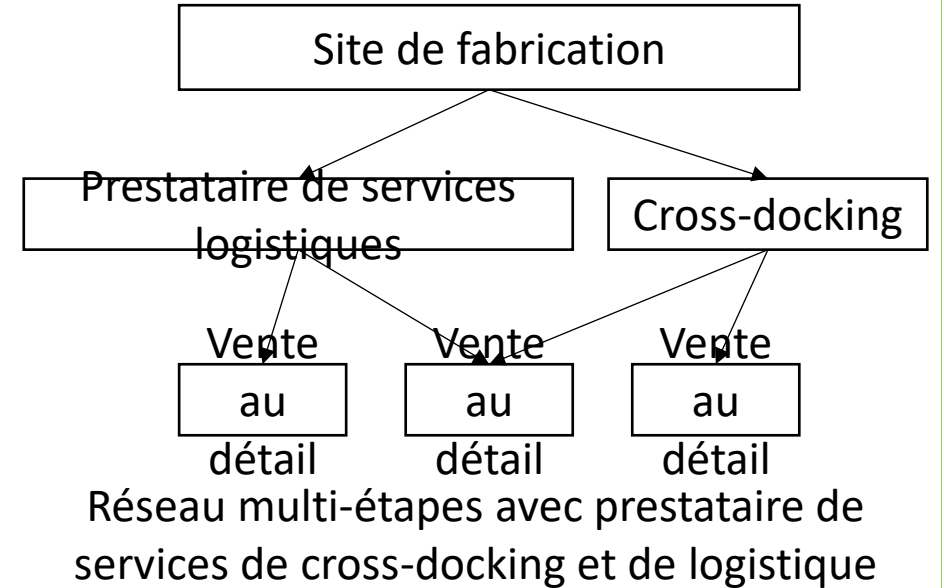
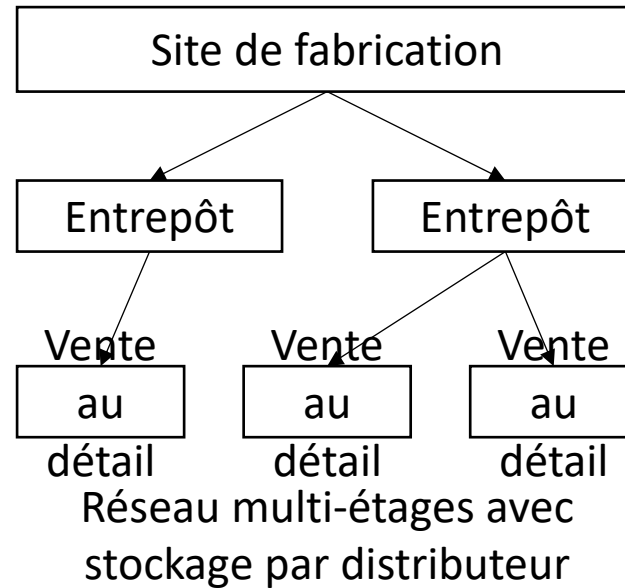
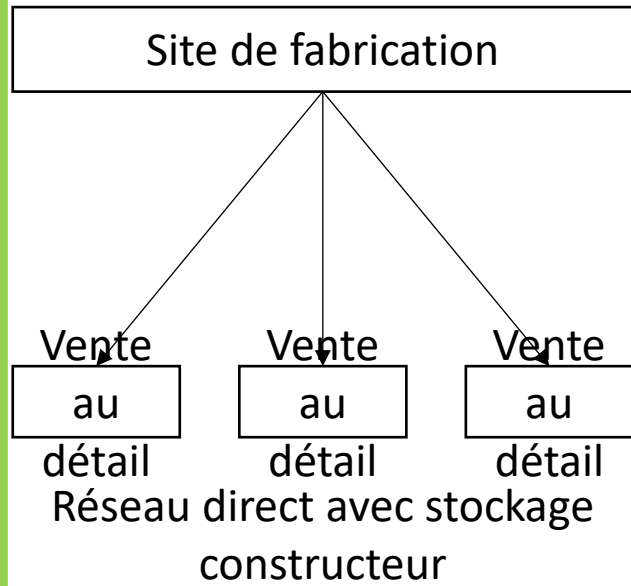
Les besoins des clients satisfaits influencent les revenus de l'entreprise, qui, avec les coûts, déterminent la rentabilité du réseau de livraison .

Mesures influencées par la structure du réseau de distribution :

- Temps de réponse : le temps nécessaire à un client pour recevoir une commande
- Variété des produits : le nombre de produits ou de configurations différents proposés par le réseau de distribution
- Disponibilité du produit : probabilité d'avoir un produit en stock lorsque la commande d'un client arrive
- Expérience client : la facilité avec laquelle les clients peuvent passer et recevoir des commandes et la mesure dans laquelle cette expérience est personnalisée
- Time to market : le temps nécessaire pour mettre un nouveau produit sur le marché
- Visibilité des commandes : la capacité des clients à suivre leurs commandes depuis leur passation jusqu'à leur livraison
- Possibilité de retour : la facilité avec laquelle un client peut retourner une marchandise insatisfaisante et la capacité du réseau à gérer ces retours

Principaux types de réseaux de distribution

- Réseau direct avec stockage constructeur
- Réseau multi-étages avec stockage par distributeur
- Réseau multi-étapes avec prestataire de services de cross-docking et de logistique



Cross-docking

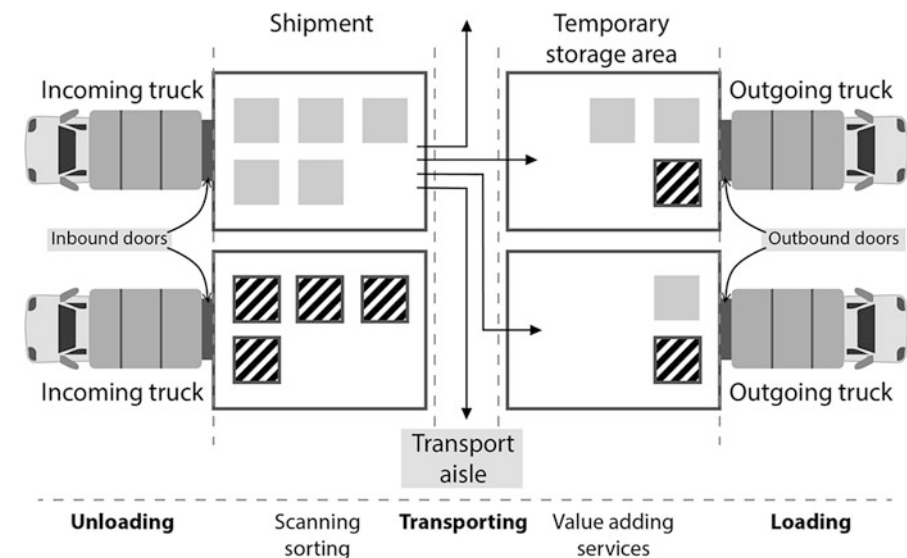
Il met en œuvre l'idée de regroupement des marchandises des camions entrants aux camions sortants via un point de transit intermédiaire. Les marchandises ne restent pas dans l'entrepôt plus de 24 heures.

Avantages :

La réalisation d'économies d'échelle dans le transport, de livraisons groupées fréquentes, de réduction des stocks, d'un flux de produits plus rapide, d'une réduction des erreurs, d'économies dans la manutention et les coûts de main-d'œuvre, et d'augmentation de l'utilisation de la capacité de la flotte.

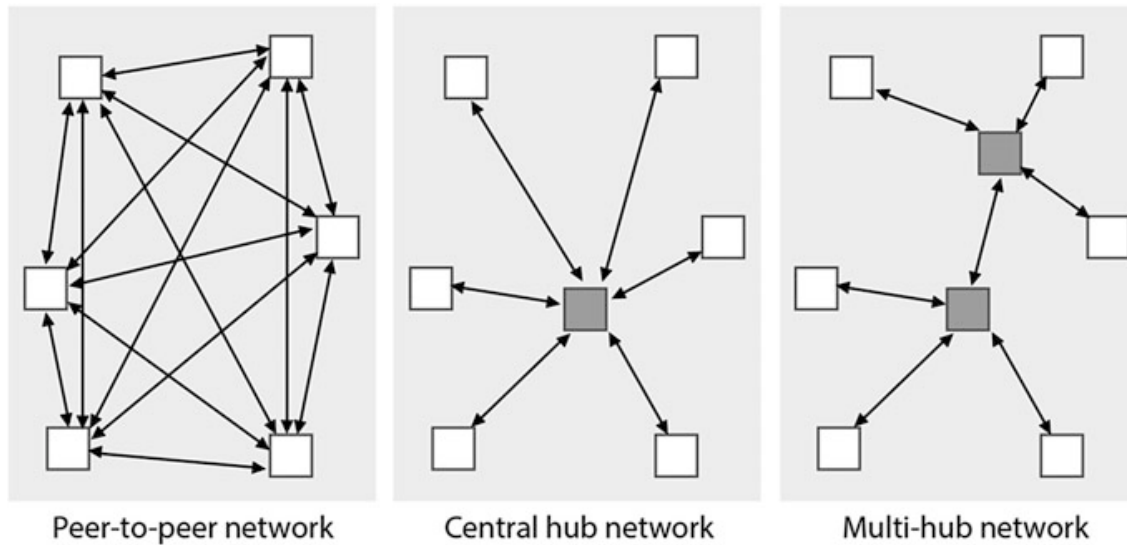
Inconvénients :

- Un investissement élevé est nécessaire.
- La complexité de la coordination et les risques de rupture de stock/perturbations dans la chaîne d'approvisionnement augmentent également.
- Les questions de sécurité des données deviennent cruciales.



Réseau en étoile

Il met également en œuvre l'idée de consolidation. Un hub représente l'élément de consolidation dans le réseau de distribution. Les rayons sont les entrepôts régionaux et les clients. Ce concept est utilisé pour la consolidation des expéditions avec des avantages et des inconvénients similaires à ceux du cross-docking.

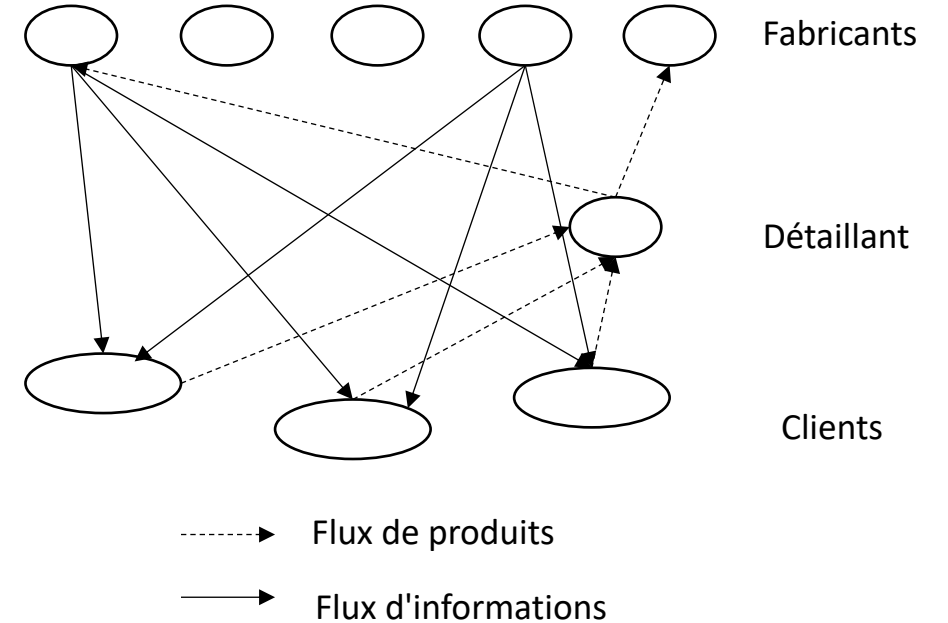


Types détaillés de réseaux de distribution

- Stockage du fabricant avec expédition directe
- Stockage du fabricant avec expédition directe et fusion en transit
- Stockage distributeur avec livraison par transporteur
- Stockage de distributeur avec livraison au dernier kilomètre
- Stockage fabricant/distributeur avec retrait client
- Stockage de détail avec retrait par le client

Stockage du fabricant avec expédition directe (drop-shipping)

- Le produit est expédié directement du fabricant au client final, en contournant le détaillant (qui prend la commande et initie la demande de livraison).
- Le détaillant n'a aucun stock.
- Les informations circulent du client, via le détaillant, vers le fabricant, et le produit est expédié directement du fabricant aux clients.



- Le principal avantage du dropshipping est la possibilité de centraliser les stocks chez le fabricant, ce qui permet de regrouper la demande de tous les détaillants qu'il approvisionne. Par conséquent, la chaîne d'approvisionnement est en mesure de fournir un niveau élevé de disponibilité des produits avec des niveaux de stock plus faibles.
- L'agrégation n'est bénéfique que si le fabricant peut répartir au moins une partie de son stock disponible entre les détaillants en fonction des besoins. Les avantages de la centralisation sont particulièrement importants pour les articles de grande valeur et à faible demande, dont la demande est imprévisible.
- Le dropshipping offre également au fabricant la possibilité de reporter la personnalisation jusqu'à ce qu'un client ait passé une commande. Le report, s'il est mis en œuvre, réduit encore davantage les stocks en les agrégeant au niveau des composants.
- Bien que les coûts d'inventaire soient généralement faibles avec le dropshipping, les coûts de transport sont élevés car les fabricants sont plus éloignés du consommateur final
- Les chaînes d'approvisionnement économisent sur le coût fixe des installations en utilisant le dropshipping car tous les stocks sont centralisés chez le fabricant. Cela élimine le besoin d'autres espaces d'entreposage dans la chaîne d'approvisionnement.
- Des économies sur les coûts de manutention peuvent également être réalisées, car le transfert du fabricant au détaillant n'a plus lieu.
- Une bonne infrastructure d'information est nécessaire entre les détaillants et le fabricant
- Les délais de réponse ont tendance à être longs lorsque l'on utilise le drop-shipping car la commande doit être transmise du détaillant au fabricant et les distances d'expédition sont généralement plus longues

depuis le site centralisé du fabricant.

- Le stockage du fabricant permet de mettre à disposition du client une grande variété de produits.
- Le dropshipping offre une bonne expérience client sous forme de livraison au domicile du client.
- La gestion des retours est plus coûteuse dans le cadre du dropshipping car chaque commande peut impliquer des expéditions de plusieurs fabricants.

Facteur coût	Performance
Inventaire	Des coûts réduits grâce à l'agrégation. Les avantages de l'agrégation sont plus importants pour les articles à faible demande et à forte valeur ajoutée. Les avantages sont plus importants si la personnalisation du produit peut être différée chez le fabricant.
Transport	Coûts de transport plus élevés en raison de l'augmentation de la distance et du transport désagrégé.
Installations et manutention	Coûts d'installation réduits grâce à l'agrégation. Économies sur les coûts de manutention si le fabricant peut gérer de petites expéditions ou expédier depuis la ligne de production.
Information	Investissement important dans l'infrastructure d'information pour intégrer le fabricant et le
Facteur coût	Performance
Temps de réponse	Délai de réponse long d'une à deux semaines en raison de la distance accrue et du traitement des commandes en deux étapes. Le délai de réponse peut varier selon le produit, ce qui complique la réception.
Variété de produits	Facile à fournir un haut niveau de variété.
Disponibilité des produits	Il est facile de fournir un niveau élevé de disponibilité des produits grâce à l'agrégation au niveau du fabricant.
Expérience client	Bon en termes de livraison à domicile mais peut souffrir si la commande de plusieurs fabricants est envoyée sous forme d'envois partiels.
Délai de mise sur le marché	Rapide, avec le produit disponible dès la première unité produite.
Visibilité des commandes	Plus difficile mais aussi plus important du point de vue du service client.
Possibilité de retour	Coûteux et difficile à mettre en œuvre.

Le stockage en usine avec expédition directe est le mieux adapté pour :

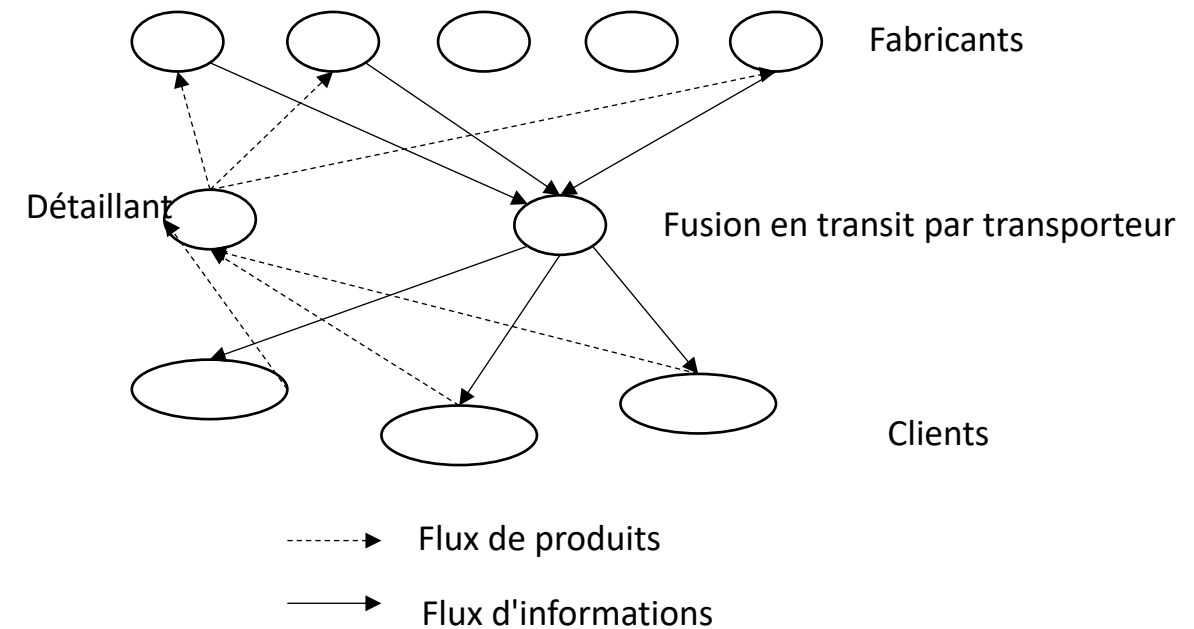
- Pour une grande variété de produits à faible demande
- Pour les articles de grande valeur pour lesquels les clients sont prêts à attendre la livraison et à accepter plusieurs expéditions partielles. Si cela permet au fabricant de reporter la personnalisation, réduisant ainsi les stocks
- Pour les vendeurs directs capables de construire sur commande.

Pour que le dropshipping soit efficace, il doit y avoir peu de lieux d'approvisionnement par commande

Stockage du fabricant avec expédition directe et fusion en transit

La fusion en transit combine des éléments de la commande provenant de différents emplacements afin que le client reçoive une seule livraison.

- Cette approche présente les plus grands avantages pour les produits à forte valeur ajoutée dont la demande est difficile à prévoir, en particulier si la personnalisation du produit peut être reportée.
- La fusion en transit réduit les coûts de transport par rapport au dropshipping en agrégeant la livraison finale
- La partie effectuant la fusion en transit a des coûts d'installation plus élevés en raison de la capacité de fusion requise. Les coûts de réception chez le client sont inférieurs car une seule livraison est reçue.
- Une infrastructure d'information sophistiquée est nécessaire pour permettre la fusion en cours de transport. En plus de l'information, les opérations du détaillant, du fabricant et du transporteur doivent être coordonnées.



- L'expérience client est susceptible d'être meilleure qu'avec le dropshipping, car le client ne reçoit qu'une seule livraison pour une commande au lieu de plusieurs expéditions partielles.
- La visibilité des commandes est une exigence importante.
- La possibilité de retour est similaire à celle du dropshipping.
- Les principaux avantages de la fusion en transit par rapport au dropshipping sont des coûts de transport réduits et une expérience client améliorée. Le principal inconvénient est l'effort supplémentaire nécessaire pendant la fusion elle-même.

Facteur coût	Performance
Inventaire	Similaire au dropshipping.
Transport	Frais de transport légèrement inférieurs à ceux du dropshipping.
Installations et manutention	Coûts de manutention plus élevés que le dropshipping chez le transporteur ; coûts de réception plus faibles chez le client.
Information	L'investissement est un peu plus élevé que pour le dropshipping.
Facteur coût	Performance
Temps de réponse	Similaire au dropshipping ; peut être légèrement plus élevé.
Variété de produits	Similaire au dropshipping.
Disponibilité des produits	Similaire au dropshipping.
Expérience client	Mieux que le dropshipping car une seule livraison est reçue.
Délai de mise sur le marché	Similaire au dropshipping.
Visibilité des commandes	Similaire au dropshipping.
Possibilité de retour	Similaire au dropshipping.

Le stockage du fabricant avec fusion en transit est le mieux adapté pour :

- demande faible à moyenne
- articles de grande valeur que le détaillant achète auprès d'un nombre limité de fabricants.

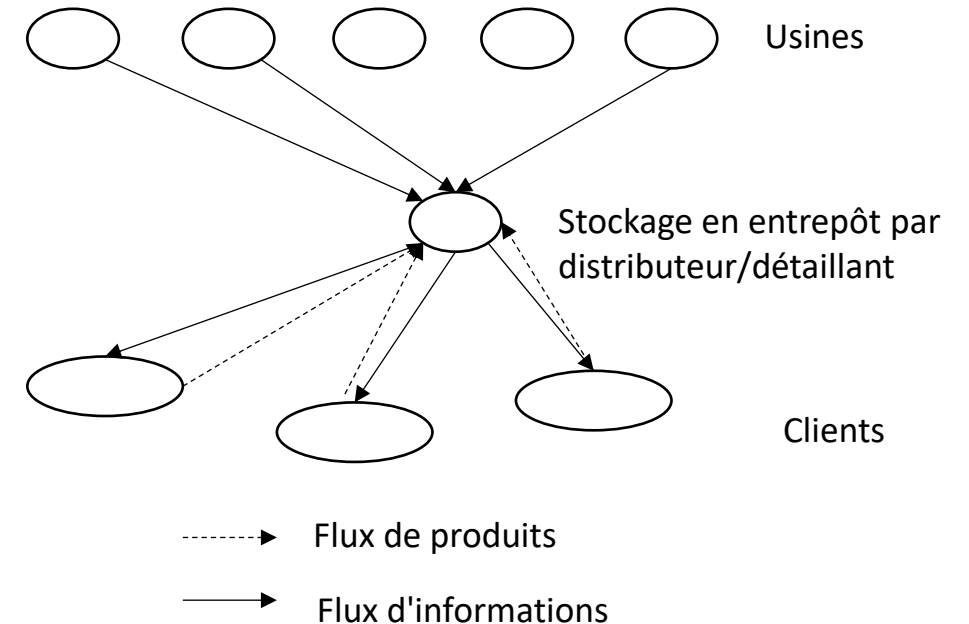
Lorsqu'il y a trop de sources, la fusion en transit peut être difficile à coordonner et à mettre en œuvre.

La fusion en transit est mieux mise en œuvre s'il n'y a pas plus de quatre ou cinq emplacements d'approvisionnement.

Stockage par distributeur avec livraison par transporteur

Les stocks ne sont pas détenus par les fabricants dans les usines, mais par les distributeurs/détaillants dans des entrepôts intermédiaires, et des transporteurs de colis sont utilisés pour transporter les produits de l'emplacement intermédiaire au client final.

- Le stockage des distributeurs nécessite un niveau de stock élevé en raison d'une perte d'agrégation.
- Du point de vue des stocks, le stockage chez le distributeur est judicieux pour les produits dont la demande est un peu plus élevée.
- Un mode de transport économique (par exemple, des camions complets) peut être utilisé pour les expéditions entrantes vers l'entrepôt, qui est plus proche du client.
- Le stockage du distributeur permet de regrouper les commandes sortantes vers le client en une seule expédition, réduisant ainsi encore les coûts de transport.
- L'infrastructure d'information nécessaire au stockage du distributeur est nettement moins complexe que celle nécessaire au stockage du fabricant.



- Une visibilité en temps réel entre les clients et l'entrepôt est nécessaire, alors qu'une visibilité en temps réel entre le client et le fabricant ne l'est pas.
- Le temps de réponse avec le stockage du distributeur est meilleur que celui avec le stockage du fabricant, car les entrepôts du distributeur sont, en moyenne, plus proches des clients et l'ensemble de la commande est regroupé dans l'entrepôt avant d'être expédié.

Facteur coût	Performance
Inventaire	Stockage supérieur à celui du fabricant. La différence n'est pas importante pour les articles à rotation rapide, mais peut l'être pour les articles à rotation très lente.
Transport	Inférieur au stockage du fabricant. La réduction est plus élevée pour les articles à rotation rapide.
Installations et manutention	Légèrement plus élevé que le stockage du fabricant. La différence peut être importante pour les articles à rotation très lente.
Information	Infrastructure plus simple par rapport au stockage du fabricant.

Facteur coût	Performance
Temps de réponse	Plus rapide que le stockage du fabricant.
Variété de produits	Stockage inférieur au stockage du fabricant.
Disponibilité des produits	Coût plus élevé pour fournir le même niveau de disponibilité que le stockage du fabricant.
Expérience client	Mieux que le stockage du fabricant avec le dropshipping.
Délai de mise sur le marché	Stockage supérieur au fabricant.
Visibilité des commandes	Plus facile que le stockage du fabricant.
Possibilité de retour	Plus facile que le stockage du fabricant.

Le stockage par distributeur avec livraison par transporteur est bien adapté :

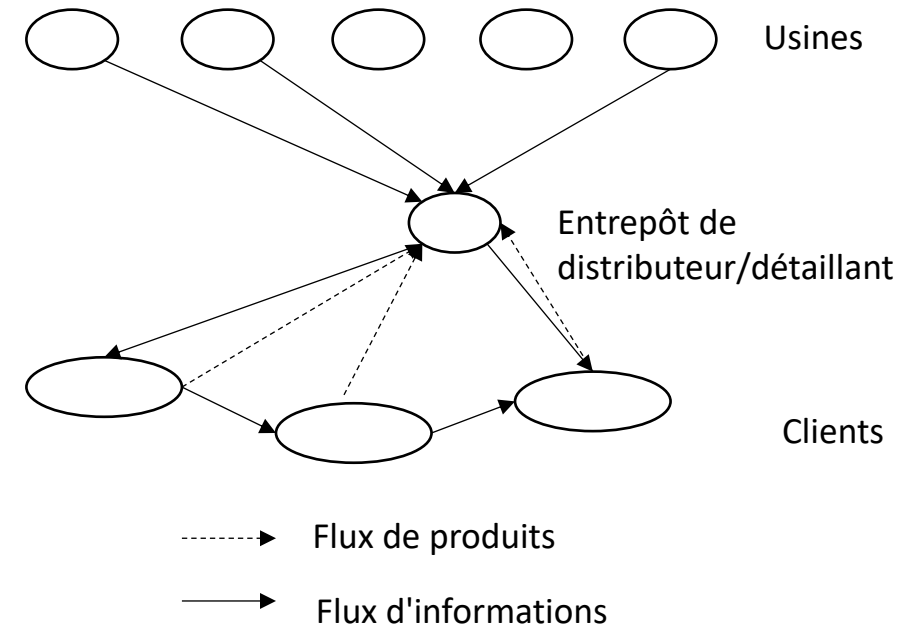
- lente ou rapide.
- Lorsque les clients souhaitent une livraison plus rapide que celle proposée par le fabricant, mais n'ont pas besoin d'une livraison immédiate.

L'entreposage du distributeur peut gérer une variété légèrement inférieure à celle du fabricant, mais peut gérer un niveau de variété beaucoup plus élevé qu'une chaîne de magasins de détail.

Stockage de distributeur avec livraison au dernier kilomètre

La livraison du dernier kilomètre fait référence au distributeur/détaillant qui livre le produit au domicile du client au lieu d'utiliser un transporteur de colis.

- Contrairement à la livraison par transporteur de colis, la livraison du dernier kilomètre nécessite que l'entrepôt du distributeur soit beaucoup plus proche du client.
- Étant donné le rayon limité qui peut être desservi par la livraison du dernier kilomètre, davantage d'entrepôts sont nécessaires par rapport à la livraison de colis.
- Il nécessite des niveaux de stock plus élevés que les autres options car il présente un niveau d'agrégation inférieur.
- Du point de vue des stocks, le stockage en entrepôt avec livraison au dernier kilomètre convient aux articles à rotation relativement rapide qui sont nécessaires rapidement et pour lesquels un certain niveau d'agrégation est bénéfique.



- Parmi tous les réseaux de distribution, les coûts de transport sont les plus élevés pour la livraison du dernier kilomètre, en particulier lors de la livraison aux particuliers.
- La livraison du dernier kilomètre peut être un peu moins chère dans les grandes villes denses, surtout si le distributeur réalise des ventes très importantes et propose une large gamme de produits.
- Les frais de transport peuvent également être justifiés pour les produits volumineux pour lesquels le client est prêt à payer pour une livraison à domicile et lorsque le client achète en grandes quantités.
- des installations sont légèrement inférieurs à ceux d'un réseau avec des magasins de détail, mais beaucoup plus élevés que ceux du stockage du fabricant ou du distributeur avec livraison par transporteur de colis.
- L'infrastructure d'information pour la livraison du dernier kilomètre est similaire à celle du stockage des distributeurs pour la livraison par transporteur de colis. Cependant, elle nécessite la capacité supplémentaire de planifier les livraisons. Les délais de réponse pour la livraison du dernier kilomètre sont plus rapides que pour les transporteurs de colis.
- L'expérience client peut être bonne
- possibilité de retour est optimale avec la livraison du dernier kilomètre, car les camions effectuant les livraisons peuvent également récupérer les retours des clients.

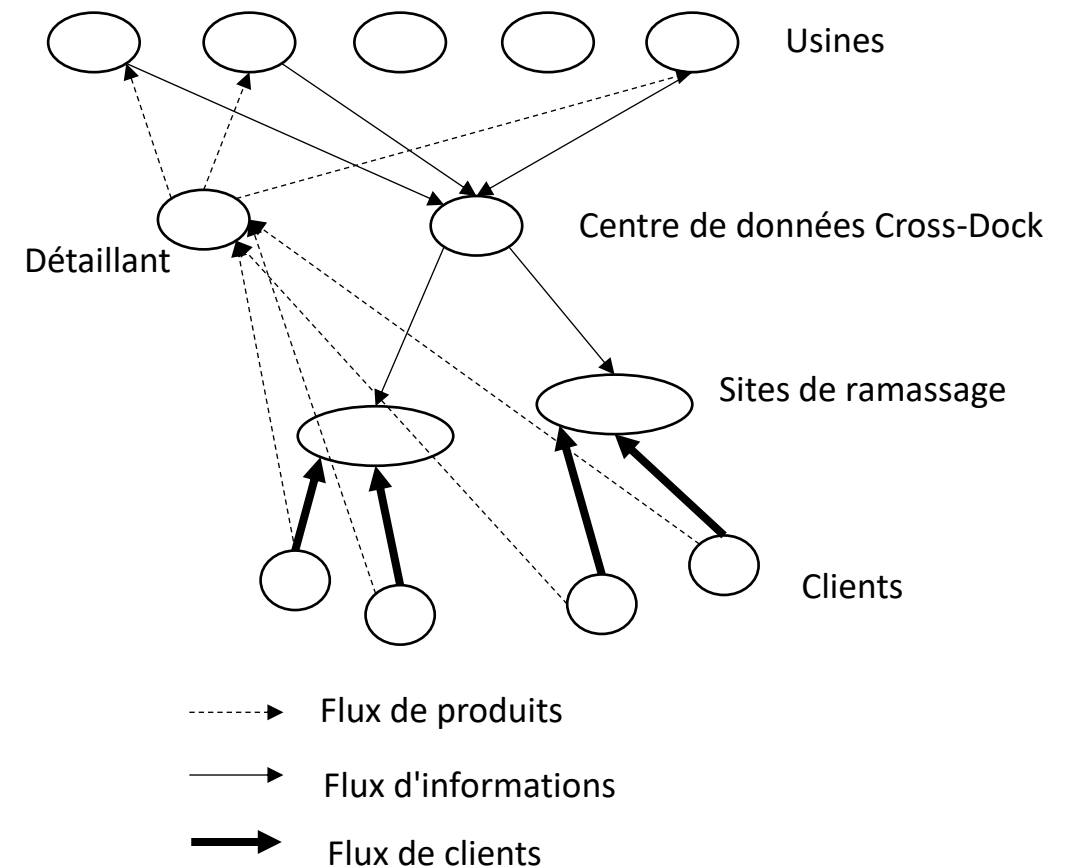
Facteur coût	Performance
Inventaire	Stockage supérieur au distributeur avec livraison par transporteur de colis.
Transport	Coût très élevé, compte tenu des économies d'échelle minimales. Plus élevé que toute autre option de distribution.
Installations et manutention	Les coûts d'installation sont plus élevés que ceux du stockage du fabricant ou du distributeur avec livraison par transporteur, mais inférieurs à ceux d'une chaîne de magasins de détail.
Information	Similaire au stockage du distributeur avec livraison par transporteur de colis.
Facteur coût	Performance
Temps de réponse	Très rapide. Livraison le jour même ou le lendemain.
Variété de produits	Un peu moins que l'entrepôt d'un distributeur avec livraison par transporteur de colis, mais plus grand que les magasins de détail.
Disponibilité des produits	Il est plus coûteux d'offrir une disponibilité que toute autre option, à l'exception des magasins de détail.
Expérience client	Très bien, surtout pour les objets volumineux.
Délai de mise sur le marché	Légèrement supérieur au stockage du distributeur avec livraison par transporteur de colis.
Visibilité des commandes	Moins problématique et plus facile à mettre en œuvre que le stockage du fabricant ou le stockage du distributeur avec livraison par transporteur de colis.
Possibilité de retour	Plus facile à mettre en œuvre que les autres options précédentes. Plus difficile et plus coûteux qu'un réseau de vente au détail.

La livraison du dernier kilomètre peut être justifiée si les commandes des clients sont suffisamment importantes pour permettre des économies d'échelle et si les clients sont prêts à payer pour cette commodité.

Stockage du fabricant ou du distributeur avec retrait par le client

Les stocks sont stockés dans l'entrepôt du fabricant ou du distributeur, mais les clients passent leurs commandes en ligne ou par téléphone, puis se rendent aux points de retrait désignés pour récupérer leur marchandise. Les commandes sont expédiées du site de stockage aux points de retrait selon les besoins.

- Les coûts d'inventaire utilisant cette approche peuvent être maintenus bas, avec un stockage du fabricant ou du distributeur pour exploiter l'agrégation.
- Le coût du transport est inférieur à celui de toute solution utilisant des transporteurs de colis, car une agrégation importante est possible lors de la livraison des commandes vers un site de retrait.
- Les coûts d'installation sont élevés si de nouveaux sites de collecte doivent être construits. Une solution utilisant des sites existants peut réduire les coûts d'installation supplémentaires.
- Les coûts de traitement au point de retrait sont élevés car chaque commande doit être associée à un client spécifique à son arrivée.
- La visibilité des commandes est extrêmement importante pour



Facteur coût	Performance
Inventaire	Peut correspondre à n'importe quelle autre option, selon l'emplacement de l'inventaire.
Transport	Inférieur au recours à des transporteurs de colis, surtout si l'on utilise un réseau de livraison existant.
Installations et manutention	Les coûts des installations peuvent être élevés si de nouvelles installations doivent être construites. Les coûts sont inférieurs si les installations existantes sont utilisées. L'augmentation des coûts de manutention sur le site de ramassage peut être significative.
Des investissements importants dans les infrastructures sont nécessaires.	Des investissements importants dans les infrastructures sont nécessaires.
Facteur coût	Performance
Temps de réponse	Similaire à la livraison par transporteur de colis avec stockage chez le fabricant ou le distributeur. La livraison le jour même est possible pour les articles stockés localement sur le site de retrait.
Variété de produits	Similaire aux autres options de stockage du fabricant ou du distributeur.
Disponibilité des produits	Similaire aux autres options de stockage du fabricant ou du distributeur.
Expérience client	Inférieur aux autres options en raison de l'absence de livraison à domicile. L'expérience est sensible à la capacité du lieu de ramassage.
Délai de mise sur le marché	Similaire aux options de stockage du fabricant.
Visibilité des commandes	Difficile mais essentiel.
Possibilité de retour	Un peu plus facile, étant donné que le point de retrait peut gérer les retours.

- Les principaux avantages d'un réseau avec des sites de retrait pour les consommateurs sont qu'il peut réduire les coûts de livraison et élargir l'ensemble des produits vendus et des clients servis en ligne.
- Le principal obstacle est l'augmentation des coûts de manutention et la complexité sur le site de ramassage.
- Un tel réseau sera probablement plus efficace si les points de vente existants sont utilisés comme sites de retrait, car ce type de réseau améliore les économies réalisées grâce à l'infrastructure existante.

Stockage de détail avec retrait par le client

Les stocks sont stockés localement dans les magasins de détail. Les clients se rendent au magasin de détail ou passent une commande en ligne ou par téléphone et la récupèrent au magasin de détail.

- Le stockage local augmente les coûts d'inventaire en raison du manque d'agrégation.
- Le coût du transport est bien inférieur à celui des autres solutions, car des modes de transport peu coûteux peuvent être utilisés pour réapprovisionner le produit au magasin de détail.
- Les coûts des installations sont élevés car de nombreuses installations locales sont nécessaires.
- De bons temps de réponse peuvent être obtenus avec ce système grâce au stockage local.
- La variété des produits stockés localement est inférieure à celle des autres options.
- Le délai de mise sur le marché est le plus élevé avec cette option

Facteur coût	Performance
Inventaire	Plus élevé que toutes les autres options.
Transport	Inférieur à toutes les autres options.
Installations et manutention	Plus élevé que les autres options. L'augmentation des coûts de manutention sur le site de retrait peut être significative pour les commandes en ligne et par téléphone.
Des investissements importants dans les infrastructures sont nécessaires.	Certains investissements en infrastructure sont nécessaires pour les commandes en ligne et par téléphone.
Facteur coût	Performance
Temps de réponse	Retrait le jour même (immédiat) possible pour les articles stockés localement au point de retrait.
Variété de produits	Inférieur à toutes les autres options.
Disponibilité des produits	Plus cher à fournir que toutes les autres options.
Expérience client	Cela dépend si le shopping est perçu comme une expérience positive ou négative par le client.
Délai de mise sur le marché	La plus élevée parmi les options de distribution.
Visibilité des commandes	Trivial pour les commandes en magasin. Difficile, mais indispensable, pour les commandes en ligne et par téléphone.
Possibilité de retour	Plus simple que d'autres options car le magasin de détail peut fournir un substitut.

- Le principal avantage d'un réseau avec stockage de détail est qu'il peut réduire les coûts de livraison et fournir une réponse plus rapide que les autres réseaux.
- Le principal inconvénient est l'augmentation des coûts d'inventaire et d'installation.
- Un tel réseau est particulièrement adapté aux articles à rotation rapide ou aux articles pour lesquels les clients apprécient une réponse rapide.

Sélection d'une conception de réseau de distribution

- Caractéristiques du produit
- exigences réseau

	Stockage de détail avec retrait par le client	Stockage du fabricant avec expédition directe	Stockage du fabricant avec expédition directe et fusion en transit	Stockage distributeur avec livraison par transporteur	Stockage de distributeur avec livraison au dernier kilomètre	Stockage fabricant/distributeur avec retrait client
Réponse temps	1	4	4	3	2	4
Produit variété	4	1	1	2	3	1
Produit disponibilité	4	1	1	2	3	1
Client expérience	1-5	4	3	2	1	5
Temps à marché	4	1	1	2	3	1
Visibilité des commandes	1	5	4	3	2	6
Possibilité de retour	1	5	5	4	3	2
Inventaire	4	1	1	2	3	1
Transport	1	4	3	2	5	1
Facilité et manutention	6	1	2	3	4	5
Information	1	4	4	3	2	5

1 correspond à la performance la plus forte et 6 à la performance la plus faible .

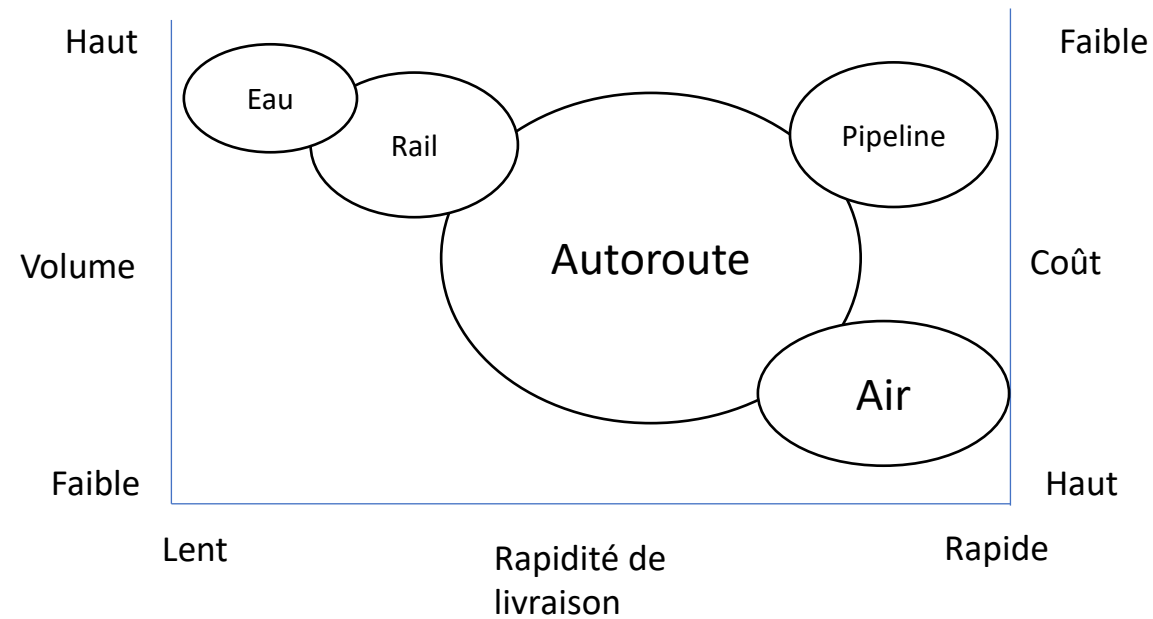
La plupart des entreprises sont mieux servies par une combinaison de réseaux de distribution. La combinaison utilisée dépend des caractéristiques du produit et de la position stratégique que l'entreprise vise.

	Stockage de détail avec retrait par le client	Stockage du fabricant avec expédition directe	Stockage du fabricant avec expédition directe et fusion en transit	Stockage distributeur avec livraison par transporteur	Stockage de distributeur avec livraison au dernier kilomètre	Stockage fabricant/distributeur avec retrait client
Forte demande produit	+2	-2	-1	0	+1	-1
Demande moyenne produit	+1	-1	0	+1	0	0
Faible demande produit	-1	+1	0	+1	-1	+1
Très faible demande produit	-2	+2	+1	0	-2	+1
De nombreux produits sources	+1	-1	-1	+2	+1	0
Haut produit valeur	-1	+2	+1	+1	0	+2
Rapide souhaité réponse	+2	-2	-2	-1	+1	-2
Haut produit variété	-1	+2	0	+1	0	+2
Faible clientèle effort	-2	+1	+2	+2	+2	-1

+ 2 = très approprié; + 1 = quelque peu approprié; 0 = neutre; - 1 = quelque peu inapproprié; - 2 = très inapproprié.

Modes de transport

- Autoroute:
 - Camion
 - Colis
- Rail
- Navire cargo
- Air
- Pipeline



Camion

La taille du produit, le poids et le liquide ou le volume peuvent tous être pris en charge avec ce mode.

La quantité de marchandises qu'un seul camion peut transporter est limitée par la taille et le poids.

Deux modes de transport sont courants :

- complet (FTL) :
 - vous pouvez choisir n'importe quelle origine et destination
 - vous payez généralement un forfait par mile
 - le moyen le plus rapide et le plus fiable d'expédier une charge
 - plus économique pour les expéditions volumineuses
- partiel (LTL) :
 - votre cargaison est combinée avec la cargaison d'autres expéditeurs dans la même remorque
 - facturé uniquement pour l'espace que vous utilisez dans la remorque (poids et dimensions) et la distance parcourue
 - mieux pour les petits envois

Les prix du transport routier sont appelés tarifs. Les tarifs sont fonction de l'offre, de la demande, de l'origine et de la destination, et ils changent en permanence.

Colis

Pour une charge relativement petite, comme quelques cartons.

Le prix que vous payez pour l'expédition d'un colis dépend du poids, de la dimension, du diamètre extérieur et de la vitesse.

Rail

Pour les cargaisons volumineuses et lourdes qui doivent parcourir de longues distances par voie terrestre.

L'adéquation du rail peut varier en fonction de l'infrastructure ferroviaire.

ferroviaire de marchandises est lent et les délais de transit peuvent être imprévisibles.

De nombreuses usines et centres de distribution qui expédient de grandes quantités de marchandises par train ont installé leur propre ensemble de voies, appelé embranchements ferroviaires.

Navire cargo

Très grande capacité et très faible coût, mais les temps de transit sont lents et de vastes zones du monde ne sont pas directement accessibles aux transporteurs d'eau.

Différents types de navires sont conçus pour transporter des types spécifiques de marchandises.

Air

Rapide mais cher. Les articles petits, légers et coûteux sont les plus adaptés à ce mode de transport.

Le fret aérien est souvent chargé dans des conteneurs spéciaux appelés igloos, conçus pour protéger à la fois le fret et l'avion.

Pipeline

Il s'agit d'un procédé hautement spécialisé, limité aux liquides, gaz et solides sous forme de boues. Aucun emballage n'est nécessaire et les coûts par kilomètre sont faibles. Le coût initial de construction d'un pipeline est très élevé.

Intermodal

Le transport intermodal est l'utilisation de plus d'un mode de transport pour acheminer une expédition vers sa destination.

Le trafic intermodal a considérablement augmenté avec l'utilisation accrue de conteneurs pour le transport et l'essor du commerce mondial.

Pour le commerce mondial, le transport intermodal est souvent la seule option, car les usines et les marchés ne sont pas toujours situés à proximité des ports.

Sur terre, le système intermodal rail/camion offre les avantages d'un coût inférieur à celui du TL et de délais de livraison meilleurs que ceux du rail.

Cela crée également une commodité pour les expéditeurs qui traitent désormais avec une seule entité représentant tous les transporteurs qui fournissent ensemble le service intermodal.

Sélection des modes de transport

Facteurs:

- Caractéristiques du produit : quels modes conviennent au produit et quel type de contenant est nécessaire
- Caractéristiques des installations : la conception et les capacités des installations par lesquelles le produit circulera (installations d'origine et de destination, centres de distribution, ports et quais de transbordement)
- Contraintes de temps
- Coût du mode de transport : quelle voie offre le meilleur rapport qualité-prix ?

Guide de routage : document qui spécifie les règles concernant les modes à utiliser et les transporteurs à sélectionner en fonction de facteurs tels que le type de fret, la taille de la charge et la paire OD.

Retour : mouvement de retour d'un véhicule de transport de sa destination initiale à son point de départ initial.

Défis pratiques :

- Disponibilité du choix mode de transport pour une paire OD
- Disponibilité de la capacité pour le choix mode

Introduction

Le nombre et l'emplacement de ces installations constituent un facteur essentiel au succès de toute chaîne d'approvisionnement (80 % des coûts de la chaîne d'approvisionnement).

Objectifs : déterminer l'emplacement optimal des installations (entrepôts, usines, lignes au sein des usines et fournisseurs) et le meilleur flux de produits à travers cette structure de réseau d'installations :

- Combien d'entrepôts devrions-nous avoir, où devraient-ils être situés, quelle devrait être leur taille, quels produits distribueraient-ils et comment servirions-nous nos différents types de clients ?
- Combien d'usines ou de sites de fabrication devrions-nous avoir, où devraient-ils être situés, quelle devrait être leur taille, combien de lignes de production devrions-nous avoir et quels produits devraient-ils fabriquer, et quels entrepôts devraient-ils entretenir ?
- Quels produits devrions-nous fabriquer en interne et lesquels devrions-nous nous procurer auprès d'entreprises extérieures ?
- Si nous nous approvisionnons auprès d'entreprises extérieures, à quels fournisseurs devrions-nous faire appel ?
- Quel est le compromis entre le nombre d'établissements et le niveau de service ? Combien coûte l'amélioration du niveau de service ?

Facteurs influençant la décision d'emplacement

Coût du transport

L'emplacement de vos installations détermine la distance dont vous avez besoin pour déplacer le produit, ce qui a un impact direct sur le montant que vous dépensez en transport.

Niveau de service

La proximité avec les clients a un impact sur le temps nécessaire pour faire parvenir le produit à vos clients.

Risque

Le nombre et l'emplacement des installations ont un impact sur le risque de perturbation de la production. Le risque politique doit être pris en compte.

Main d'œuvre locale, compétences, matériaux et services publics

L'emplacement des installations détermine également le montant de la rémunération du travail, la recherche des compétences nécessaires, le coût des matériaux achetés localement et le coût des services publics.

Impôts

Cela dépend de l'emplacement des installations, du type d'opérations effectuées et des produits expédiés.

Infrastructures

Des infrastructures de transport adéquates, des besoins en énergie et en télécommunications et la volonté du gouvernement d'investir dans la modernisation des infrastructures.

Fournisseurs

Une base de fournisseurs de haute qualité et compétitive rend un emplacement donné approprié

Autres installations

L'emplacement d'autres usines ou centres de distribution de la même entreprise a un impact sur la gamme de produits et la capacité.

Émissions de carbone

L'implantation d'installations de manière à minimiser la distance parcourue ou les coûts de transport présente souvent l'avantage secondaire de réduire les émissions de carbone.

Réglementation environnementale

Outre les implications financières mesurables, ces réglementations influencent les relations avec la communauté locale.

Rôles et types d'entrepôts et d'usines

Un entrepôt représente une installation où les entreprises stockent des produits ou un emplacement où les produits passent simplement d'un véhicule à un autre. Les entrepôts sont nécessaires dans une chaîne d'approvisionnement pour les raisons suivantes :

- Consolidation de produits : regroupement de produits différents pour réaliser une seule expédition à un client. Cette méthode sera moins coûteuse que l'expédition directe des produits aux clients à partir de chaque source d'approvisionnement individuelle.
- Délai tampon : expédition à vos clients avec un délai plus court que celui qui peut être offert en expédiant directement depuis l'usine ou le site du fournisseur
- Niveaux de service : le besoin d'être proche des clients peut créer le besoin de plusieurs entrepôts
- Taille des lots de production : les plans de production tentent de maximiser le nombre d'unités de produit fabriquées à chaque cycle (taille du lot). Cela nécessite que les unités supplémentaires soient « stockées » dans des entrepôts jusqu'à ce que la demande future les exige
- Stocks pré-constitution : certaines industries connaissent d'énormes pics d'approvisionnement en matières premières ou de demande de produits finis. Ces matières premières abondantes doivent être stockées jusqu'au moment où elles seront nécessaires pour des cycles de production mensuels réguliers. La capacité supplémentaire pendant les périodes creuses est utilisée pour stocker des unités de produits finis en attendant leur utilisation pour répondre aux pics de demande à venir

Compromis entre les modes de transport : un entrepôt peut aider à réduire les coûts en permettant l'expédition de produits sur une longue distance avec un mode de transport efficace (et moins coûteux), puis en facilitant le passage à

Une chaîne d'approvisionnement peut comporter de nombreux types d'entrepôts pour répondre à de nombreux besoins différents :

- Centre de distribution : un entrepôt où les produits sont stockés et à partir duquel les commandes des clients sont exécutées
- Cross-Dock : un entrepôt qui est simplement un lieu de rencontre pour les produits qui passent des camions entrants aux camions sortants
- Entrepôt rattaché à une usine : un entrepôt rattaché à une usine de fabrication (à la fin de la chaîne de production où le produit est préparé avant d'être chargé sur un camion pour être expédié ou un point de stockage pour les produits fabriqués à l'usine ou pour les produits fabriqués dans d'autres usines). L'un des principaux avantages d'un entrepôt rattaché à une usine est la réduction des coûts de transport, car un produit n'a pas besoin d'être expédié vers un autre endroit immédiatement après sa sortie de la chaîne de production.
- Entrepôt central ou hub warehouse : un entrepôt qui regroupe les produits à expédier vers d'autres entrepôts du système avant de les transmettre aux clients. Contrairement aux cross-docks, les produits sont normalement stockés dans ces emplacements pendant des périodes plus longues avant d'être utilisés pour répondre à la demande

Il existe également des besoins en termes de classes de température différentes (congelé, réfrigéré ou ambiant), de niveaux de sécurité différents (dangereux ou non dangereux) et de niveaux de propriété différents (propriété de

Une usine est un lieu où un produit est fabriqué ou d'où il vient. Il peut s'agir d'une usine de fabrication qui produit des matières premières, des composants ou des produits finis, ou qui se contente d'assembler.

L' emplacement de l'usine peut avoir un impact sur les coûts de transport et la capacité à servir les clients. Facteurs qui conduisent plusieurs usines à fabriquer le même produit :

- Niveaux de service . La proximité des usines avec le client affecte le niveau de service (surtout si les entrepôts ne sont pas utilisés)
- Coûts de transport, en particulier pour les producteurs de produits lourds ou volumineux qui remplissent facilement les capacités des camions
- Économies d'échelle . Plus le niveau de production sur un site est élevé, plus le coût de production par unité est faible.
- Impôts
- Étapes du processus de production. Par exemple, il peut souvent être judicieux de fabriquer un produit en vrac dans une usine à faible coût, puis de l'expédier en vrac vers une autre usine plus proche du marché pour terminer la conversion en produit fini.

Une plante peut représenter :

- Un site de fabrication ou d'assemblage : un site appartenant à l'entreprise qui fabrique des produits
- Un fournisseur : un emplacement qui n'appartient pas à l'entreprise mais qui fournit des produits à l'entreprise
- Site de fabrication tiers : un emplacement similaire aux usines des fournisseurs, mais ces sites fabriquent des produits pour le compte de l'entreprise et sont donc traités davantage comme les propres usines de l'entreprise que comme un fournisseur de matières premières

Éléments d'un problème d'optimisation

mathématique est le meilleur moyen de trier les différentes options, d'équilibrer les compromis, de déterminer les meilleurs emplacements pour les installations et de soutenir une meilleure prise de décision.

L'optimisation est une technologie complémentaire, et non concurrente, qui vous permet de déterminer réellement les meilleurs emplacements pour vos installations.

Pour formuler un modèle de réseau de chaîne d'approvisionnement logique, les quatre éléments suivants sont nécessaires :

- Objectif. L'objectif est le but de l'optimisation et les critères que nous utiliserons pour comparer différentes solutions (par exemple, minimiser les coûts). Un problème d'optimisation doit avoir un objectif quantifiable.
- Contraintes. Les contraintes définissent les règles d'une solution légitime (par exemple, quels produits peuvent être fabriqués où, quelle capacité de production est disponible, à quelle distance vos entrepôts doivent se trouver des clients)
- Décisions. Les décisions (variables de décision) définissent les choix que vous autorisez l'optimisation (par exemple, où se trouvent ces sites et quel produit est fabriqué à quel endroit). Les décisions autorisées ne peuvent pas être séparées des contraintes.
- Données

Le problème est traduit en une série d'équations puis résolu à l'aide de techniques de programmation linéaire et entière.

Programmation mixte en nombres entiers : série d'étapes influencées par l'objectif, les contraintes et les variables de décision. Au cours des étapes, l'objectif oriente la solution vers des coûts plus favorables et évite les coûts moins favorables, les contraintes fixent les règles et peuvent l'empêcher de faire plus de ce qu'il veut ou peuvent l'obliger à faire quelque chose qui n'est pas favorable à l'objectif, et les variables de décision lui indiquent ce qu'il est autorisé à changer.

Le rôle des données qualitatives

Facteurs non quantifiables :

- Stratégie de l'entreprise. L'entreprise peut accorder plus d'importance au coût qu'au service ou vice versa
- Risque
- Coût de perturbation. Les changements pourraient entraîner des perturbations
- Volonté de changement
- Relations publiques et image de marque. Les entreprises qui ont une marque très visible doivent tenir compte de la réaction du public et de l'impact sur leur marque.
- Concurrents
- Syndiqués versus non-syndiqués
- Réductions d'impôts
- Relations avec les entreprises de transport routier, les entreprises d'entreposage et d'autres partenaires de la chaîne d'approvisionnement

Principaux défis de la planification de l'emplacement

Une étude de la chaîne d'approvisionnement doit couvrir de nombreux domaines différents d'une organisation : ventes, opérations, logistique, finances et informatique.

1. Pour comprendre et commencer à équilibrer les objectifs différents et contradictoires que chaque groupe peut avoir :
 - Équipe de vente : créez de nombreux entrepôts et effectuez de petites expéditions fréquentes aux clients.
 - Équipe d'exploitation (production) — produire des produits dans un seul endroit pour maximiser les économies d'échelle.
 - Équipe des opérations (entrepôt) : minimiser les emplacements d'entreposage pour réduire les coûts fixes et de gestion.
 - Équipe logistique (transport) : acheminer les expéditions importantes par des modes de transport moins coûteux.
 - Équipe financière — dispose de faibles niveaux de stocks et d'opérations nécessitant le moins d'investissement dans les entrepôts et les sites de production, et supporte les coûts les plus bas liés à la logistique.
2. Pour collecter et valider les données de toutes ces différentes parties de l'organisation, et pour estimer les données pour les nouveaux emplacements potentiels et les chemins de flux de produits
3. Pour mettre réellement en œuvre les résultats, car les changements dans une chaîne d'approvisionnement peuvent également provoquer un état de perturbation temporaire

Modèle de base : le problème du centre de gravité

Le problème de localisation d'installation le plus simple est le problème du centre de gravité (COG). Dans le domaine de la logistique, un problème de centre de gravité est généralement défini comme la sélection de l'emplacement d'une installation de manière à minimiser la distance moyenne pondérée par rapport à tous les points de demande.

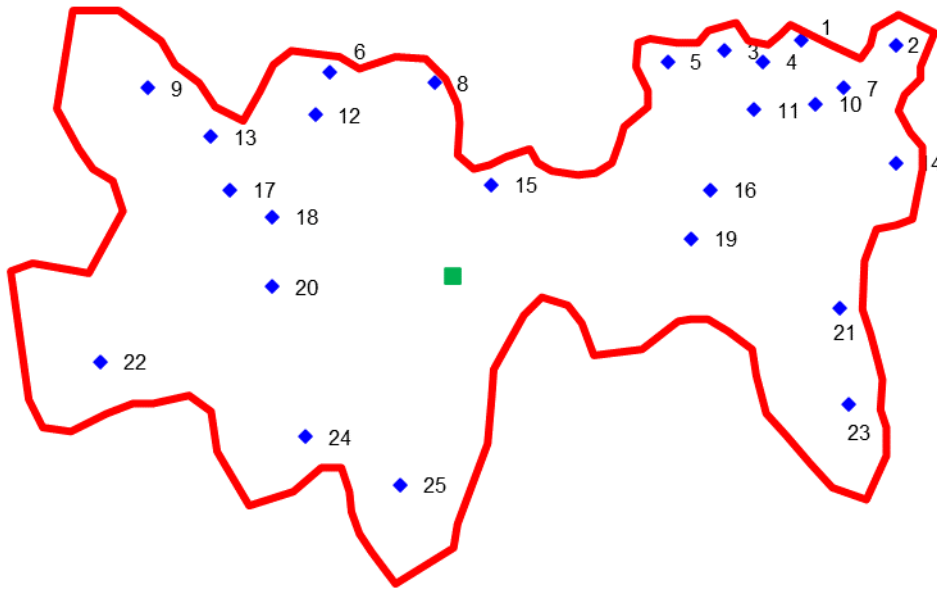
Une solution de centre de gravité suggère que les installations sont situées au centre (le « centre de gravité ») d'un ensemble de points de demande (ou dans certains cas, pour les entreprises ayant de nombreux fournisseurs, au centre des points d'approvisionnement).

Les modèles de centre de gravité sont, par définition, clairs et non ambigus.

Problème 1 : Centrage de la moyenne pondérée en physique

Les citoyens de Logistica doivent choisir un emplacement pour leur capitale.

Ils choisissent l'emplacement de leur capitale en tenant compte des frontières, puis en sélectionnant l'emplacement qui centre géographiquement le pays.



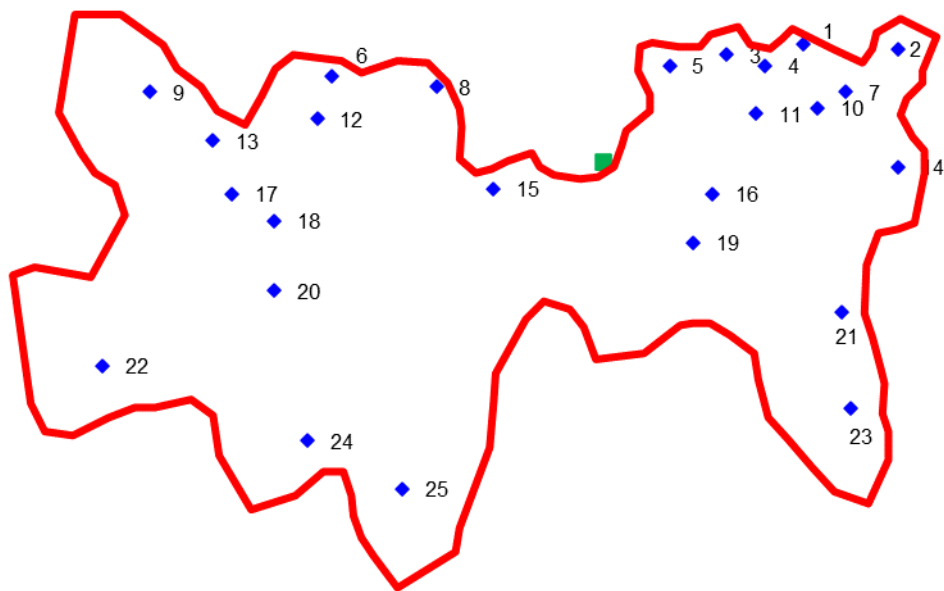
Ville	Population	Distance jusqu'à la capitale (en miles)
	1 1'655'000	588
	2 2'300'000	707
	3 601'000	489
	4 1'385'000	527
	5 1'230'000	415
	6 665'000	318
	7 664'000	615
	8 885'000	250
	9 1'116'000	503
	10 636'000	569
	11 1'200'000	484
	12 148'000	288
	13 854'000	395
	14 1'473'000	658
	15 615'000	130
	16 1'145'000	389
	17 627'000	343
	18 542'000	273
	19 379'000	348
	20 964'000	263
	21 546'000	560
	22 706'000	522
	23 727'000	596
	24 669'000	298
	25 931'000	280
Pondéré Moyenne Distance :		471

Ils décident ensuite de localiser la capitale en se basant sur une moyenne pondérée des emplacements des villes déjà dispersées dans le pays. Ce problème de centre de gravité physique peut être résolu avec une simple équation fermée trouvant les coordonnées de la capitale de Logistica :

$$LON_{cap} = \frac{\sum_c p_c LON_c}{\sum_c p_c} \quad LAT_{cap} = \frac{\sum_c p_c LAT_c}{\sum_c p_c}$$

LON représente la longitude d'une ville, LAT représente sa latitude, p représente la population d'une ville, c est l'ensemble des villes.

La population est utilisée comme facteur de pondération. Dans les problèmes de réseau, la demande des clients est le facteur de pondération le plus courant.



Bien que cela soit utile pour un calcul de physique, les planificateurs se rendent vite compte que le calcul du centre de gravité ne s'avérerait pas pratique.

Ville	Population	Distance jusqu'à la capitale (en miles)
	1 1'655'000	327
	2 2'300'000	452
	3 601'000	226
	4 1'385'000	265
	5 1'230'000	157
	6 665'000	409
	7 664'000	363
	8 885'000	260
	9 1'116'000	662
	10 636'000	318
	11 1'200'000	229
	12 148'000	418
	13 854'000	566
	14 1'473'000	428
	15 615'000	162
	16 1'145'000	164
	17 627'000	540
	18 542'000	482
	19 379'000	167
	20 964'000	504
	21 546'000	395
	22 706'000	770
	23 727'000	479
	24 669'000	558
	25 931'000	511
Pondéré Moyenne Distance :		388

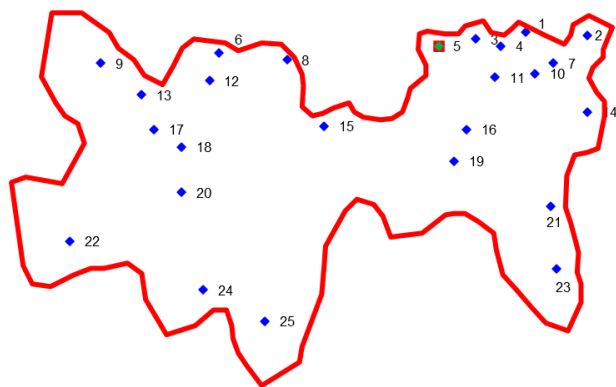
Pour trouver le centre de gravité, les principes de la physique s'appliqueraient naturellement à la distance au carré. La formule ne minimise pas la distance moyenne pondérée par rapport à chaque ville. Au lieu de cela, la formule minimise la demande multipliée par la distance au carré. Cependant, pour les praticiens de la chaîne d'approvisionnement du monde réel, cette définition n'a pas nécessairement de sens.

En résumé, les calculs du centre de gravité physique ne doivent pas être utilisés pour les raisons suivantes :

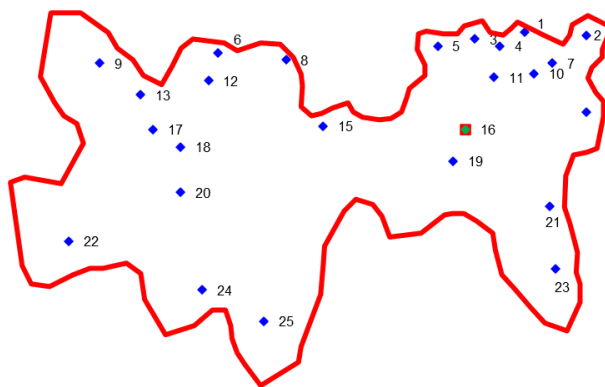
- Cela ne minimise pas la distance moyenne pondérée.
- Cela pourrait pointer n'importe où dans l'espace.
- Il n'atterrira presque jamais dans un endroit qui exploite l'infrastructure existante.
- La méthode ne peut pas tirer parti des distances routières réelles (elle doit s'appuyer sur des estimations en ligne droite basées sur la latitude et la longitude).
- Elle ne peut pas être étendue pour inclure des facteurs tels que les coûts, les capacités, les différents types d'installations, les différents produits, les multiples niveaux d'installations (pôle et étoile, fournisseurs, entrepôts, détaillants, etc.) ou d'autres considérations pratiques.

Problème 2 : Centre de gravité pratique

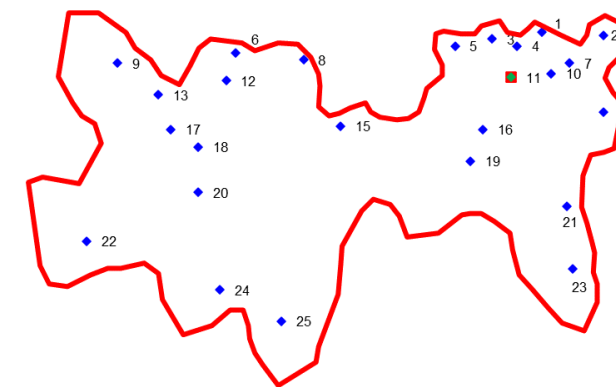
Essayez de trouver une approche pour minimiser la distance moyenne parcourue



Ville 5



Ville 16



Ville 11

	Centre de gravité	Ville 5	Ville 16	Ville 11
Distance moyenne pondérée	388	380	378	370
% dans un rayon de 100 miles	0%	8%	7%	17%
% dans un rayon de 200 miles	15%	32%	29%	39%
% dans un rayon de 300 miles	33%	39%	48%	58%

- La solution du centre de gravité physique n'a pas obtenu de très bons résultats sur les statistiques clés permettant d'évaluer les emplacements potentiels. Elle avait une distance moyenne plus élevée et comptait très peu de citoyens dans un rayon de 100, 200 ou 300 miles (car l'objectif du centre de gravité physique ne minimise pas la distance moyenne ou le pourcentage de clients proches de la capitale).
- Il peut y avoir des compromis à faire (par exemple, il peut être important qu'une grande partie de la population puisse facilement se rendre dans la capitale, même si la distance moyenne est un peu plus longue).

Étant donné que les planificateurs choisissent une seule ville comme capitale, ils peuvent facilement calculer les statistiques clés pour les 25 villes.

	Centre de gravité	Ville 4	Ville 10	Ville 15	Ville 20	Ville 22
Distance moyenne pondérée	388	381	399	428	585	800
% dans un rayon de 100 miles	0%	24%	24%	3%	7%	3%
% dans un rayon de 200 miles	15%	48%	49%	7%	12%	3%
% dans un rayon de 300 miles	33%	56%	58%	12%	23%	10%

Un problème plus réaliste sélectionne l'emplacement le plus central parmi une liste de candidats possibles, s'il reste du temps pour énumérer toutes les solutions comme l'ont fait les planificateurs de Logistica. Cette formulation plus réaliste et pratique du problème est mieux résolue avec des techniques de programmation linéaire et en nombres entiers.

Approche à distance

Objectif : sélectionner de manière optimale l'emplacement ou les emplacements des installations « P » en tenant compte uniquement de la distance.

Étude de cas sur le commerce de détail : Al's Athletics

(Watson et al., 2013)

Objectif : sélectionner les entrepôts « P » optimaux à partir d'une liste d'options prédéterminée

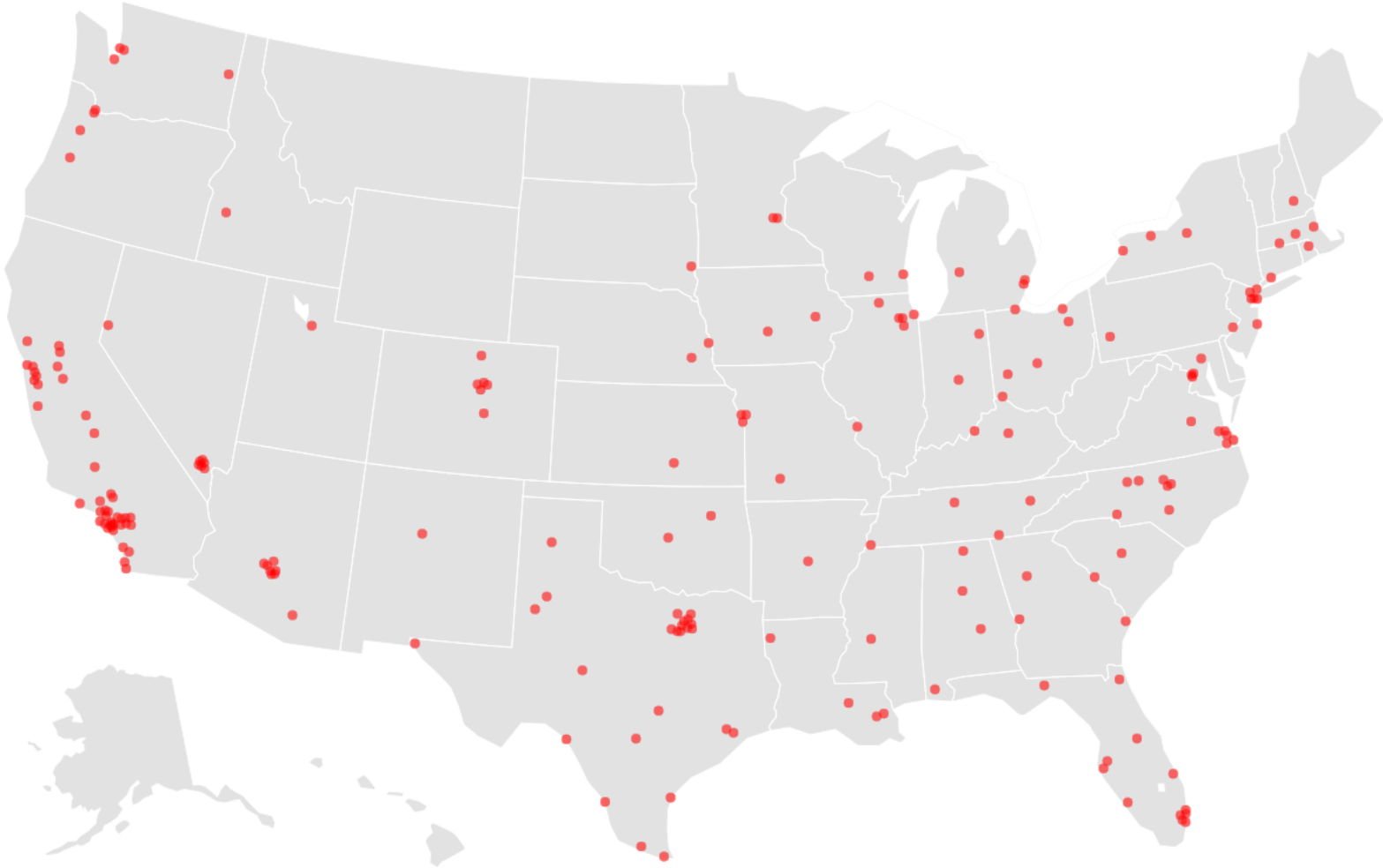
Définition formelle du problème de localisation des installations « P » : « Étant donné un ensemble d'emplacements de clients et leur demande, trouvez le meilleur nombre P d'installations (usines ou entrepôts) qui minimisent la distance totale pondérée entre l'installation et le client, en supposant que chaque installation peut satisfaire la totalité de la demande du client et que toute la demande est toujours satisfaite. »

Clients

Lors de la modélisation d'une chaîne d'approvisionnement, le client fait référence au lieu de livraison final de nos produits. Nous nous intéressons uniquement au point de livraison final pertinent pour la chaîne d'approvisionnement que nous analysons. Le lieu du client peut représenter :

- Dans une chaîne d'approvisionnement de détail, chacun des emplacements du magasin (comme dans l'étude de cas d'Al)

- S'il existe une entreprise de fabrication qui vend à des détaillants ou à des grossistes, les clients pourraient être les entrepôts du détaillant ou du grossiste.
- Si l'entreprise de fabrication livre à d'autres entreprises de fabrication, les clients seront les autres sites de fabrication.
- Si la chaîne d'approvisionnement d'une entreprise dispose déjà d'un ensemble fixe et immuable d'entrepôts avec un ensemble fixe de clients qu'ils servent, ces entrepôts sont les points clients.
- Si la chaîne d'approvisionnement d'une entreprise dessert le secteur de la construction de maisons, le client peut représenter le chantier sur lequel l'entreprise doit fournir le produit
- Si la chaîne d'approvisionnement d'une entreprise exporte un produit et qu'elle n'est pas responsable une fois que le produit a quitté le pays, le client peut être le port de sortie.



Demande

La demande est utilisée pour déterminer l'importance relative de chaque client.

Il convient de spécifier une unité de mesure appropriée qui applique correctement les coûts et capacités de fabrication et de logistique associés.

Les unités de mesure courantes comprennent :

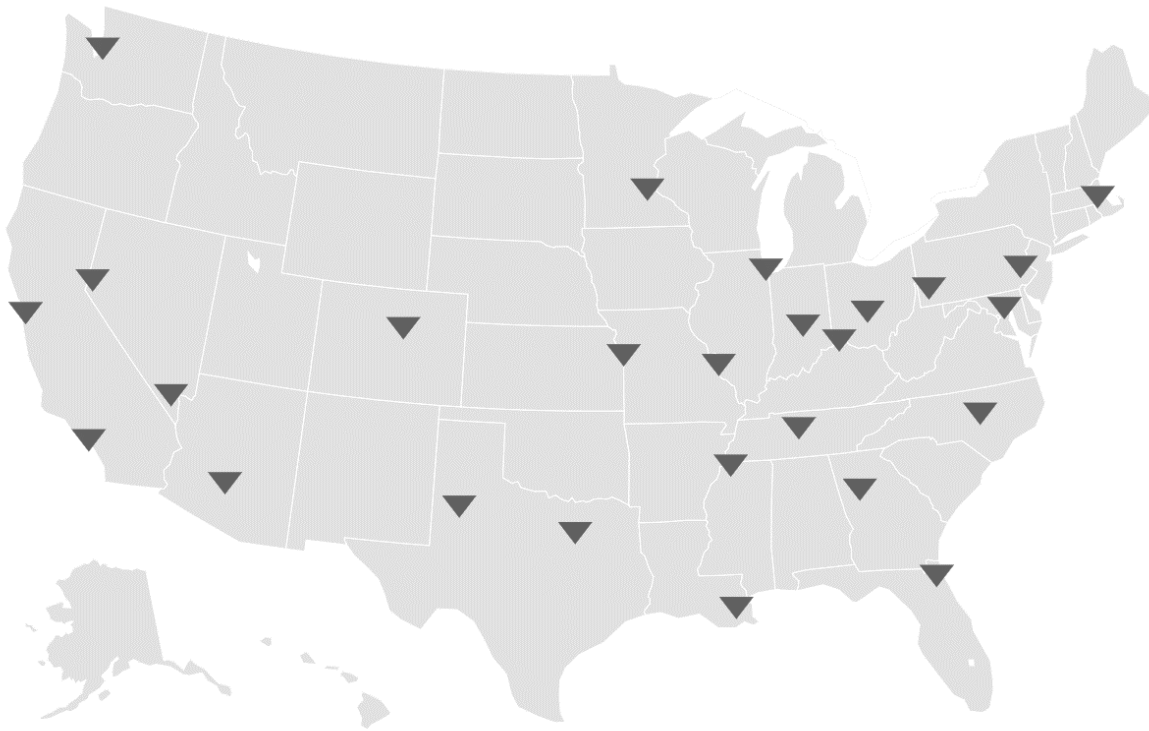
- Poids total
- Nombre total de palettes
- Cube total (espace physique occupé par le produit)
- Nombre total de camions chargés
- Nombre total de cas

La sélection du poids par AI est probablement l'unité de mesure la plus courante dans la conception de réseaux en raison du fait que la plupart des coûts de transport sont basés sur le poids.

Horizon temporel pour l'analyse de la demande : les études de conception de réseau typiques utilisent une année entière de demande ; l'examen d'une année entière d'activité au sein d'une chaîne d'approvisionnement garantit que tous les pics et creux des habitudes d'achat de vos clients sont pris en compte dans votre analyse

Définition du problème : « Trouver le meilleur nombre P d'installations (entrepôts) qui minimisent la distance totale pondérée entre l'installation et le client, en supposant que chaque installation peut satisfaire la totalité de la demande du client et que toute la demande est satisfaite. »

- La mesure du « meilleur » est que nous minimisons la distance pondérée par rapport aux clients
- Les installations sont sélectionnées à partir d'un ensemble d'emplacements prédéfinis



- Liste des 25 emplacements les plus fréquemment choisis pour les entrepôts
- Matrice avec la distance entre chaque établissement et chaque client (distance routière)

Dans l'exemple de Logistica, nous avons vu qu'il était relativement facile de trouver le meilleur point. Nous avons simplement répertorié toutes les combinaisons possibles et choisi la meilleure.

Pour le problème d'AI, 26 choix sont possibles. Cependant, la complication réside dans le nombre de combinaisons potentielles que nous devons considérer pour prouver cela

Potentiel total des installations Numéro choisi	25 Combinaisons totales
2	300
3	2300
4	12650
5	53130
6	177100
7	480700
8	1081575
9	2042975
10	3268760

Potentiel total des installations Numéro choisi	250 Combinaisons totales
2	31125
3	2573000
4	158882750
5	7817031300
6	319195444750
7	11126241217000
8	337959576966375
9	9087357513984750
10	219005316087033000

Le nombre de combinaisons explose à mesure que de nouvelles possibilités sont envisagées. Des techniques de programmation linéaire et en nombres entiers sont nécessaires pour trier ces combinaisons de manière systématique afin de trouver la meilleure réponse.

Index:

- Ensemble de clients à servir : $j = \text{New York, Chicago, ...}, J$
- Demande de chaque client d_j
- Ensemble d'installations potentielles parmi lesquelles nous pouvons choisir : $i = \text{entrepôt 1, entrepôt 2, ...}, I$
- Distance entre l'installation i et le client j : $\text{dist}_{i,j}$

Objectif: Minimiser la distance moyenne pondérée entre les entrepôts et les magasins.

Contraintes :

- Toutes les demandes doivent être satisfaites
- Le nombre d'installations doit être limité à P

Décisions :

- L'entrepôt est-il à l'emplacement que j'ai sélectionné ? (Si oui, $X_i = 1$, sinon, 0)
- L'établissement i dessert-il le client j ? (Si oui, $Y_{ij} = 1$, sinon, 0)

La fonction objective détermine si une solution est meilleure qu'une autre. Elle minimise la distance totale pondérée entre les entrepôts et les clients :

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} dist_{i,j} d_j Y_{i,j}$$

Contraintes :

1. Chaque client doit être pleinement servi :

$$\sum_{i \in I} Y_{i,j} = 1 \quad \forall j \in J$$

2. Exactement P installations doivent être situées :

$$\sum_{i \in I} X_i = P$$

3. Si un entrepôt sert un client, alors cet entrepôt doit être considéré comme « sélectionné » :

$$Y_{i,j} \leq X_i \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

4. X et Y doivent être 0 ou 1 :

$$Y_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$X_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I$$

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \text{dist}_{i,j} d_j Y_{i,j}$$

$$\sum_{i \in I} Y_{i,j} = 1 \quad \forall j \in J$$

$$\sum_{i \in I} X_i = P$$

$$Y_{i,j} \leq X_i \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$Y_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$X_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I,$$

Le problème peut être résolu pour n'importe quel ensemble de données.

Il existe de nombreuses combinaisons différentes d'entrepôts potentiels. Ce qui rend le nombre de combinaisons difficile à déterminer est qu'il n'existe pas de techniques fiables et efficaces pour trouver la solution optimale lorsque vous avez des variables binaires qui prennent soit zéro, soit un.

Problème NP-difficile : il n'existe aucun algorithme connu garantissant la résolution des problèmes de manière optimale absolue dans un délai raisonnable à mesure que la taille du modèle augmente

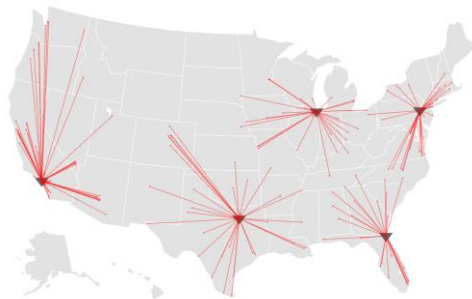
La valeur optimale pour P est inconnue. Plusieurs scénarios avec différentes valeurs pour P sont exécutés et les résultats sont comparés



P = 1



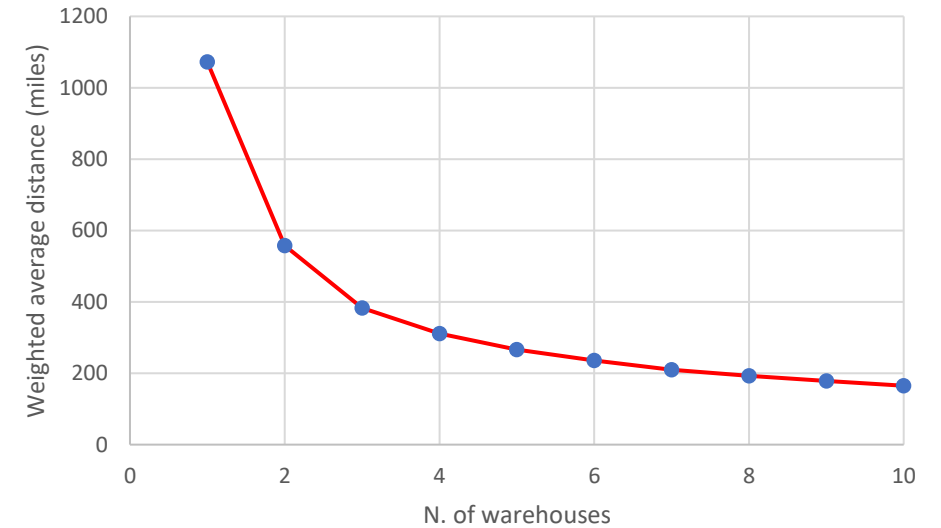
P = 2



P = 5



P = 10



- L' ajout d'installations supplémentaires entraîne des rendements décroissants
- La distance moyenne pondérée est un bon résumé du niveau de service

Pourcentage de la demande satisfaite dans certaines bandes ou plages de distance :

Bande de distance (miles)				
N. d'entrepôts	100	400	800	3200
1	1	4	30	65
2	12	23	39	26
3	18	38	35	9
4	31	38	24	7
5	36	38	23	3
6	41	36	22	1
7	45	39	17	1
8	47	38	15	0
9	49	38	13	0
10	51	40	9	0

- Les solutions s'améliorent dans chaque bande de distance
- Ces mesures ne doivent pas nécessairement être améliorées car elles ne font pas partie de l'objectif
- Ces bandes de distance sont étroitement corrélées à l'amélioration de la distance moyenne
- Il est important d'exécuter plusieurs scénarios pour comprendre les compromis et comprendre la valeur marginale de l'ajout d'installations.

Modélisation du niveau de service

Niveau de service peut signifier :

- Minimiser la distance moyenne
- Maximiser le pourcentage de clients à une certaine distance

Autres mesures du niveau de service pas d'entrées dans un modèle de conception de réseau précis :

- Taux de remplissage : pourcentage de commandes exécutées à partir du stock
- Commandes en retard : le retard de l'expédition (quand un client commande un produit, quand l'entreprise promet une livraison et si cette livraison a effectivement lieu à temps)

Étude de cas : Chen produits de beauté

(Watson et al., 2013)

Objectif : ajouter deux sites de production répartis dans toute la Chine, garantissant ainsi que ces sites supplémentaires offrent le meilleur service à la clientèle existante de Chen.

Les niveaux de service dans la conception des réseaux sont généralement mesurés par le temps de transit ou la distance. Cependant, la collecte de données sur les temps de transit pour toutes les voies existantes et potentielles n'est pas toujours une tâche facile pour les entreprises. Par conséquent, les analystes de conception de réseau utilisent généralement une distance équivalente au temps de transit.

Le nombre de kilomètres pouvant être parcourus en une journée serait limité :

- Les camions de livraison roulent à une vitesse moyenne de seulement 50 km/h
- Les conducteurs ne peuvent travailler que huit heures par jour au maximum
- une journée : 400 km
- souhaité sur deux jours correspond à une distance de 800 km entre les usines sortantes et les entrepôts des distributeurs.



Scénarios :

- Réseau tel quel
- Objectif 1 : minimiser la distance moyenne (offrir le meilleur service possible aux clients qui achètent le plus)
- Objectif 2 : maximiser la demande dans un rayon de 800 km (service en 2 jours)

	Réseau tel quel	Objectif 1	Objectif 2
Distance moyenne (km)	1603	588	654
% de demande dans un délai de 2 jours	18	78	80

Offrir le meilleur service aux clients les plus exigeants a peu ou pas d'effet sur la capacité à maximiser le service sur les marchés dans un rayon de 800 km, et par conséquent ces emplacements sont idéaux pour l'expansion nécessaire.

Fonction objective qui maximise la quantité de demande avec une certaine distance :

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (\text{dist}_{i,j} > \text{HighServiceDist? } 0: 1) d_j Y_{i,j}$$

Si la distance entre les deux points est supérieure au paramètre de service, l'expression prend la valeur 0, sinon 1.

- Cela guide l'objectif de rechercher autant de combinaisons que possible dans lesquelles la demande se situe dans les 800 km
- Aucune indication n'est fournie sur la manière d'affecter des clients en dehors de HighServiceDist , donc une sélection aléatoire sera effectuée. Par conséquent, une contrainte est nécessaire pour indiquer au moteur de résolution que même si un client ne peut pas être affecté à une installation dans le cadre de la restriction HighServiceDist , il doit être affecté à une installation raisonnablement proche :

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \text{dist}_{i,j} d_j Y_{i,j} < \text{AvgServiceDist} \sum_{j \in J} d_j$$

La constante AvgServiceDist représente la plus grande distance moyenne d'attribution de demande client qui sera tolérée.

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (\text{dist}_{i,j} > \text{HighServiceDist? } 0:1) d_j Y_{i,j}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \text{dist}_{i,j} d_j Y_{i,j} < \text{AvgServiceDist} \sum_{j \in J} d_j$$

$$\sum_{i \in I} Y_{i,j} = 1 \quad \forall j \in J$$

$$\sum_{i \in I} X_i = P$$

$$Y_{i,j} \leq X_i \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$Y_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$X_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I$$

Le moteur MIP peut encore attribuer quelques points de demande parasites à des installations de service déraisonnablement éloignées, tout en maintenant une distance de service moyenne raisonnable sur l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement (pour des points de demande assez petits).

Pour résoudre ce problème, il est courant d'appliquer des contraintes qui limitent la distance de service maximale (le client j ne peut pas être affecté à l'installation i si la distance entre i et j est supérieure à la valeur constante MaximumDist)

$$Y_{i,j} \leq (\text{dist}_{i,j} > \text{MaximumDist? } 0:1) \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

MaximumDist doit être supérieur à AvgServiceDist :

- Distance de service élevée = 800 km
- Distance de service moyenne = 1 000 km
- Distance maximale = 1200km

Modèle 1:

- Fonction objective qui maximise la quantité de demande avec une certaine distance (High ServiceDist)
- Contrainte pour la plus grande distance moyenne d'attribution de la demande client qui sera tolérée (AvgServiceDist)



- 75 % de la demande vers une installation dans un rayon de 800 km
 - Distance d'entretien moyenne ne dépassant pas 1 000 km
 - Il serait peut-être possible de trouver une solution capable de répondre à plus de 75 % de la demande avec un service élevé, mais seulement en sacrifiant la distance d'entretien moyenne et en l'autorisant à aller au-delà de 950 km (en fait, au-delà de 1 000 km).
 - Il serait également possible de parvenir à une solution permettant d'atteindre une distance de service moyenne inférieure à 950 km, mais seulement en permettant de satisfaire plus de 25 % de la demande grâce à une distance de service faible.
- Si une solution possède cette propriété d'objectifs multiples, selon laquelle on ne peut pas améliorer un objectif sans dégrader l'autre, elle peut être qualifiée d'optimale de Pareto.

Modèle 2:

- Fonction objective qui minimise la distance moyenne d'entretien (AvgServiceDist)
- Contrainte pour la quantité de demande satisfaite avec un service élevé (High ServiceDist)



- Une distance d'entretien moyenne de 950 km
- 75% de la demande avec un centre de service à moins de 800 km

Modèle 1

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (dist_{i,j} > HighServiceDist? 0: 1) d_j Y_{i,j}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} dist_{i,j} d_j Y_{i,j} < AvgServiceDist \sum_{j \in J} d_j$$

$$Y_{i,j} \leq (dist_{i,j} > MaximumDist? 0: 1) \forall i \in I \forall j \in J$$

$$\sum_{i \in I} Y_{i,j} = 1 \forall j \in J$$

$$\sum_{i \in I} X_i = P$$

$$Y_{i,j} \leq X_i \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$Y_{i,j} \in \{0,1\} \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$X_i \in \{0,1\} \forall i \in I$$

Modèle 2

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} dist_{i,j} d_j Y_{i,j}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (dist_{i,j} > HighServiceDist? 0: 1) d_j Y_{i,j} \geq \text{HighServiceDemand}$$

↓

Cette valeur pour cette
contrainte peut être
déterminée à partir du
résultat du premier modèle.

Considérer le niveau de service comme une simple partie de l'optimisation globale de leur réseau , c'est ne plus être l'objectif global du solveur mais une contrainte au sein du modèle plus large.

Un modélisateur de l'équipe de Chen pense qu'il serait préférable pour l'entreprise que la solution garantisse que tous les clients puissent être servis dans un délai d'un jour ou dans un rayon de 400 km. Après une analyse rapide de leurs données, il est clair que cette contrainte entraînera une infaisabilité de leur modèle.

Localisation du distributeur	Distance de la centrale potentielle la plus proche
Ville 1	1076
Ville 2	694
Ville 3	669
Ville 4	62
Ville 5	536
Ville 6	521
Ville 7	514
Ville 8	511
Ville 9	505
Ville 10	499
Ville 11	476
Ville 12	464
Ville 13	464
Ville 14	456
Ville 15	444
Ville 16	433
Ville 17	427



Le mieux que Chen puisse garantir avec son ensemble actuel d'emplacements d'usines potentiels est un transport en trois jours maximum pour tous les clients. Par conséquent, le solveur doit sélectionner des usines dans des endroits où tous les distributeurs ne sont pas à plus de 1 200 km. Cependant, après l'application de cette contrainte, l'exécution du modèle n'a abouti à aucune solution réalisable.

Lorsque des solutions irréalisables sont déterminées, la manière la plus courante d'identifier leur cause est de tester des itérations en donnant au modèle un peu plus de liberté dans ses décisions jusqu'à ce qu'une solution réalisable soit possible :

Contrainte de distance maximale	Solution réalisable
1200km (contrainte d'origine)	Non
2000km	Oui
1800km	Non
1600km	Oui

L'infaisabilité se produit lorsque le modèle doit sélectionner des emplacements d'usine qui permettent de desservir tous les clients dans un rayon de 1 600 km ou moins. Sur la base de la découverte précédente selon laquelle tous les clients sont situés à moins de 1 076 km d'au moins une usine potentielle, c'est la combinaison des contraintes qui est à l'origine de l'infaisabilité.

Augmenter le nombre maximum de plantes pouvant être sélectionnées à quatre unités conduit à une solution réalisable, confirmant que c'est la combinaison du nombre de plantes et de la restriction de distance qui est à l'origine du problème.

Pour gérer l'infaisabilité :

- Les contraintes sont souvent modifiées pour n'intégrer qu'une partie de la population du modèle. Dans l'exemple, le modèle peut être modifié pour contraindre le niveau de service résultant de sorte qu'au moins 75 % des clients se trouvent dans un rayon de 1 200 km.
- Des sous-groupes de clients sont créés en fonction de leur importance. Cela peut donner lieu à des désignations de niveau 1, de niveau 2, etc., appliquées à chacun. Le modélisateur peut ensuite soit appliquer différents niveaux de contraintes à chacun, soit appliquer des contraintes à certains sous-groupes uniquement. Dans l'exemple, Chen's peut vouloir s'assurer que ses clients de niveau 1 se trouvent uniquement dans un rayon de 1 200 km, mais le modèle n'impose aucune restriction quant à l'entretien des autres emplacements.

Analyse de sensibilité

Les modèles de conception de réseau peuvent faire des hypothèses sur la demande future, les coûts de transport et les coûts de main-d'œuvre. Il est important de tester la robustesse de toutes les solutions (analyse de sensibilité). En testant les changements dans les variables clés telles que la demande, les coûts de transport et les coûts de main-d'œuvre, un modélisateur s'assure qu'une hypothèse formulée dans une entrée de modèle ne modifie pas radicalement les économies et les recommandations de réseau résultantes dans la solution.

Modélisation des niveaux de service en tant qu'objectifs du modèle :

- Minimiser la distance moyenne : Sélectionne la structure de réseau optimale afin de minimiser la distance pondérée parcourue ou, en termes simples, demande au modèle de répondre aux niveaux de demande les plus élevés sur les distances les plus courtes.
- Maximiser le pourcentage de clients ou de demande dans un certain rayon : Maximise les clients ou la demande servis dans un rayon maximum de x ou, en termes simples, demande au modèle de maximiser le nombre de clients ou le pourcentage de demande qui peuvent être servis dans un rayon déterminé comme étant un niveau de service acceptable.

Modélisation des niveaux de service en tant que contraintes :

- Contraintes de distance moyenne maximale : aide à guider le modèle pour renvoyer des solutions avec des affectations raisonnables pour les clients qui ne peuvent pas être atteints dans un territoire de service prédéfini.
- Contraintes de distance maximale : force le modèle à servir tous les clients dans un rayon spécifié.
- Contraintes de distance maximale par sous-ensembles de clients : adapte la contrainte de distance maximale précédente à un sous-ensemble spécifique de clients au sein du modèle.

Modèles de conception de réseau prenant en compte la capacité

Les entrepôts ont trois fonctions principales : recevoir, expédier les produits et stocker les produits :

- La capacité d'expédition et de réception dépend du nombre d'équipes que vous gérez, du nombre de personnes ou de ressources (comme des préparateurs de commandes automatisés) dont vous disposez, du type d'équipement dont vous disposez et de l'espace que vous consacrez à ces fonctions.
- La capacité de stockage est mesurée en fonction de l'espace physique dont vous disposez et de la quantité de marchandises se trouvant dans l'entrepôt à un moment donné. Cependant, cette mesure n'est pas facile à réaliser.

Un taux d'utilisation de la capacité d'un entrepôt supérieur à 100 % ne contrevient pas à une règle mathématique. D'un point de vue commercial, cela signifie plutôt que l'entrepôt est très occupé.

La capacité de production est généralement plus simple à mesurer que la capacité d'entreposage. Et elle est généralement plus coûteuse à ajouter. Elle peut être définie en déterminant la quantité de produits pouvant être fabriqués au cours de l'année pour un nombre donné de postes.

- Si la contrainte de capacité de l'entrepôt est réelle, le coût du nouvel espace d'entreposage doit être pris en compte :
 - Pour les espaces tiers, l'ajout de capacité peut simplement entraîner des coûts variables supplémentaires.
 - Si vos systèmes d'entrepôt sont relativement simples et manuels, l'ajout d'espace peut ne poser aucun problème (par exemple en ajoutant des racks aux plafonds).
 - Pour un entrepôt à grande vitesse et hautement automatisé, des investissements en capital plus importants sont nécessaires
- Si la contrainte de l'entrepôt n'est pas liée à l'espace, mais à sa capacité à traiter les expéditions entrantes et sortantes, l'augmentation de la capacité peut nécessiter des équipes supplémentaires, des portes de quai supplémentaires ou davantage d'automatisation.
- Pour les usines, l'extension de capacité se présente généralement sous trois formes :
 - Ajout de main d'œuvre. Une main d'œuvre supplémentaire peut permettre de produire davantage.
 - Ajout de quarts de travail. Lorsque vous ajoutez des quarts de travail, des coûts fixes et variables supplémentaires sont générés.
 - Ajout d'équipement. Cela peut inclure n'importe quoi, depuis l'investissement dans l'équipement existant pour le rendre plus rapide, jusqu'à l'ajout de lignes de production, en passant par la construction d'une usine entièrement nouvelle.

Avec une capacité d'usine et d'entrepôt, la période de capacité doit être prise en compte (modèles annuels ou à long terme

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \text{dist}_{i,j} d_j Y_{i,j}$$

$$\sum_{i \in I} Y_{i,j} = 1 \quad \forall j \in J$$

$$\sum_{i \in I} X_i = P$$

$$\sum_{j \in J} \text{vol}_{i,j} Y_{i,j} \leq \text{cap}_i X_i \quad \forall i \in I$$

$$Y_{i,j} \leq X_i \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

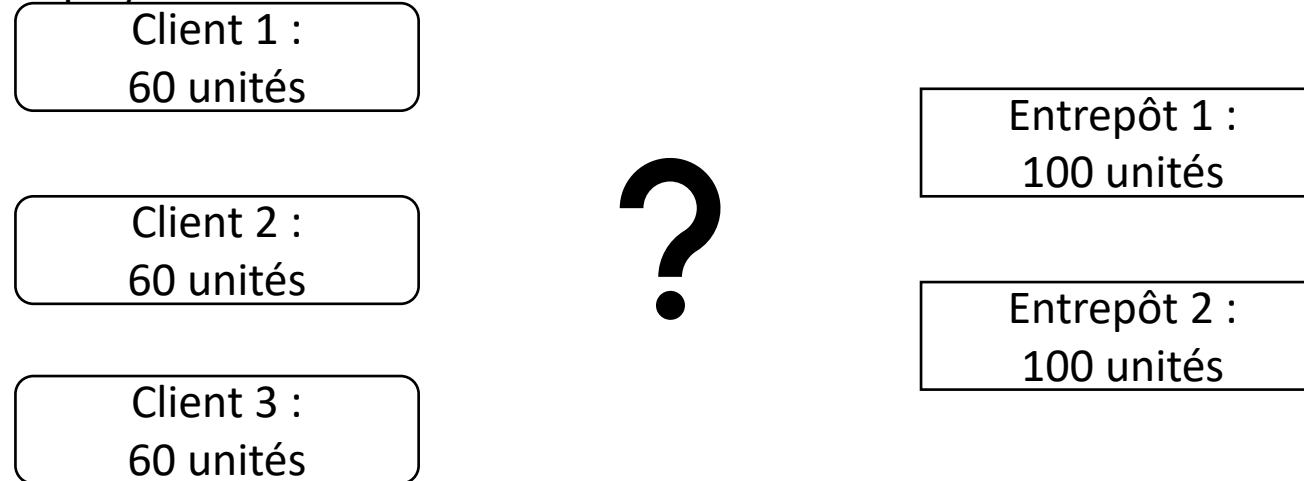
$$Y_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$X_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I$$

- cap_i est la capacité de l'entrepôt/usine i :
 - Dans un entrepôt : capacité de stockage, capacité de débit totale ou capacité à traiter les expéditions entrantes ou sortantes.
 - Dans une usine : temps total disponible en temps normal et heures supplémentaires, tonnes ou unités totales qui peuvent être produites, ou quantité maximale d'un produit que vous pouvez produire.
- $\text{vol}_{i,j}$ est :
 - le volume effectif de la demande pour le client j étant affecté à l'entrepôt i
 - la quantité de capacité d'une usine qui est consommée par la demande de ce client
- Elle garantit qu'un entrepôt ne se verra jamais attribuer une demande supérieure à celle qu'il peut gérer. Si la capacité de l'entrepôt n'est pas infinie, cette contrainte garantit également que si un client est affecté à un entrepôt, cet entrepôt doit être ouvert.

Il est à nouveau possible de créer un modèle tel qu'il soit impossible à résoudre :

- La demande est supérieure à la contrainte de capacité
- La contrainte sur le nombre de sites entre en conflit avec la contrainte de capacité
- La capacité requise des clients individuels est importante par rapport à la capacité globale (la capacité est attribuée en gros morceaux), et vous obligez toute la demande de chaque client à être satisfaite à partir d'un seul emplacement (source unique) :

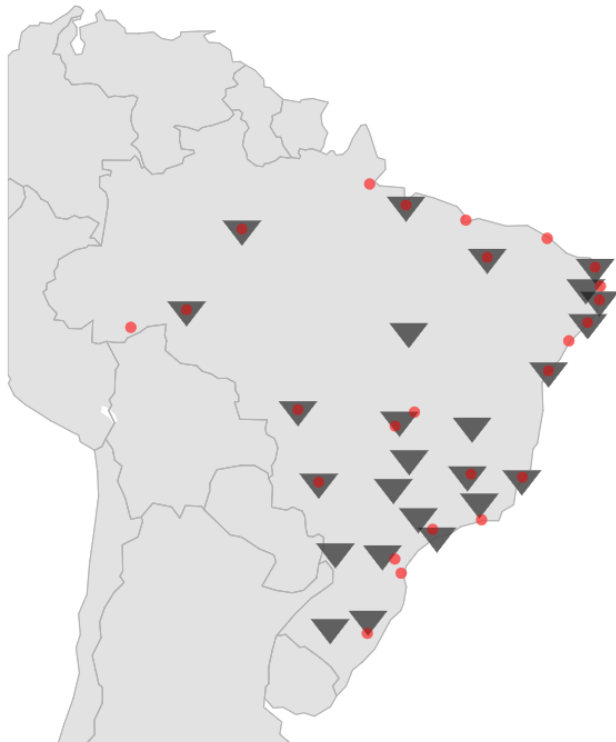


Problème du sac à dos : il s'agit d'allouer des ressources discrètes de manière à maximiser la valeur totale, tout en restant en dessous d'une limite totale de capacité. Il peut être difficile à résoudre.

Lorsque des contraintes de capacité sont mises en place, un problème de type « sac à dos » peut être intégré par inadvertance dans le modèle de réseau. Si la capacité est mesurée en gros morceaux, un problème de type « sac à dos » est intégré dans un problème déjà difficile. Cela entraîne trois problèmes :

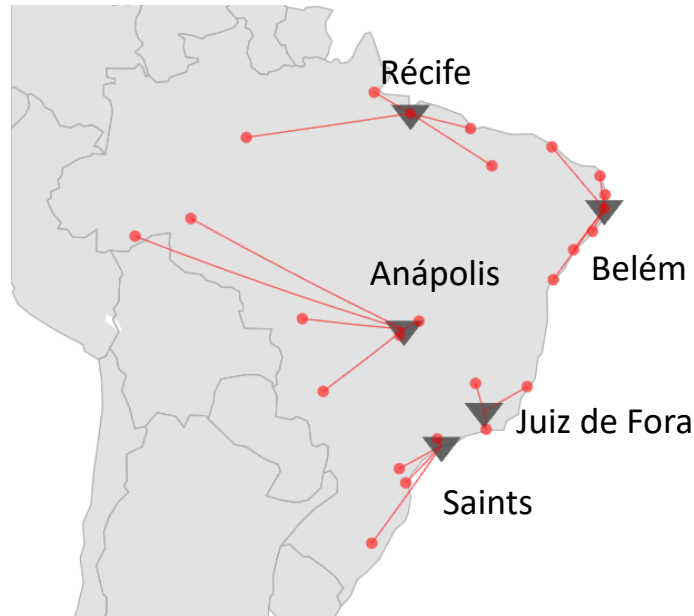
- Le problème est irréalisable et d'une manière qui n'est pas claire (la capacité totale est plus que suffisante pour la demande, mais en raison de la manière dont la demande est groupée, elle ne rentre pas entièrement dans la capacité).
- La solution semble mauvaise. L'optimisation renvoie une solution qui ne semble pas intuitive. Les clients ne sont pas affectés à l'entrepôt le plus proche et peuvent être affectés à des entrepôts assez éloignés.
- Les durées d'exécution sont très longues.

Étude de cas : distributeur au Brésil
(Watson et al., 2013)



- 25 régions clientes
- Chaque région a une demande différente
- La demande totale est d'environ 100 millions d'unités

Sans contraintes de capacité :



Entrepôt	Débit
Saints	41545912
Juiz de Fore	23930340
Récife	17936334
Anápolis	7986478
Belém	7265529

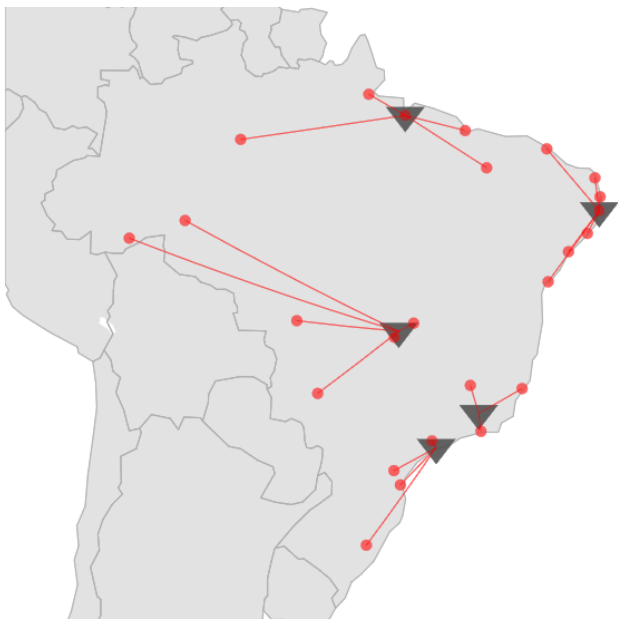
Les clients de la côte sud-est représentent la majorité de la demande et le fait de placer des entrepôts à proximité d'eux est un facteur majeur pour minimiser la distance pondérée parcourue pour toutes les livraisons.

Modèle 1 : le modèle est obligé d' utiliser les mêmes cinq entrepôts sélectionnés précédemment et la capacité de chaque entrepôt est fixée à un cinquième du débit total du modèle. Aucune solution réalisable n'existe :

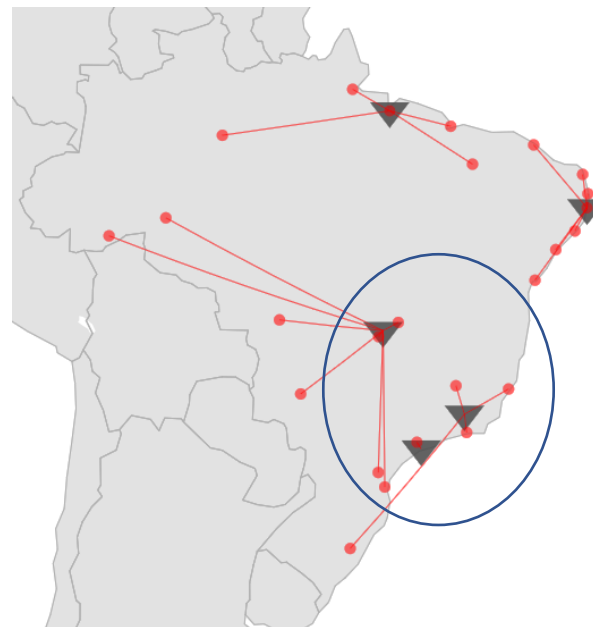
- La contrainte de capacité de 20 millions d'unités ajoutée à chaque entrepôt vise à forcer chaque entrepôt à contenir presque exactement cette quantité sans espace supplémentaire à utiliser ailleurs, car notre flux total de marchandises est d'environ 99 millions d'unités. Par conséquent, aucun entrepôt ne disposera de plus d'un million d'unités supplémentaires dans la solution finale.
- Un client ne peut recevoir un produit que d'un seul entrepôt

Par conséquent, si la demande des clients ne peut pas être répartie de manière égale dans des groupes de 20 millions d'unités, ce problème devient alors irréalisable.

Modèle 2 : le modèle est obligé d' utiliser les mêmes cinq entrepôts sélectionnés précédemment et la capacité de chaque entrepôt est fixée à 30 millions d'unités



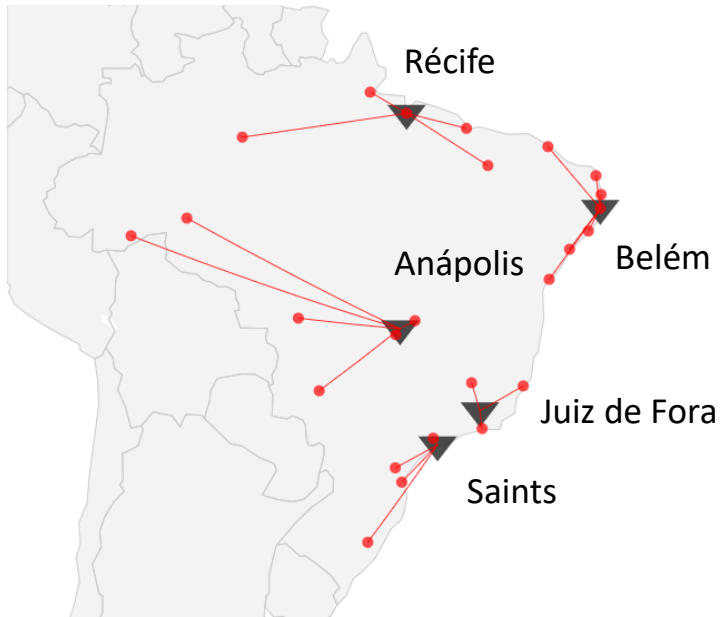
Modèle sans contraintes de capacité
Distance moyenne des clients : 326 km



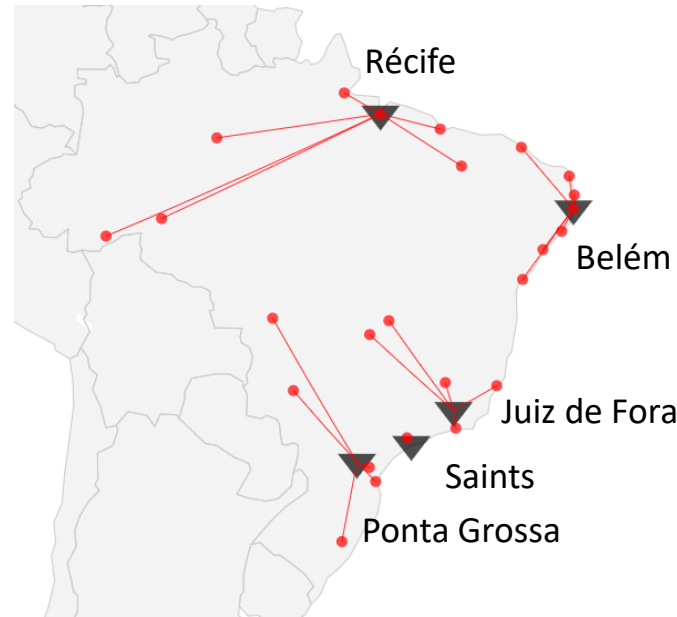
Modèle 2
Distance moyenne des clients : 412 km

Entrepôt	Débit	Capacité de production de 30 millions d'unités
Saints	41545912	29029226
Juiz de Fore	23930340	28842504
Récife	17936334	17936334
Anápolis	7986478	15591000
Belém	7265529	7264529

Modèle 3 : le modèle peut sélectionner cinq entrepôts et la capacité de chaque entrepôt est fixée à 30 millions d'unités



Modèle sans contraintes de capacité
Distance moyenne des clients : 326 km



Modèle 3
Distance moyenne des clients : 341 km

Entrepôt	Débit	Les 5 meilleurs avec un débit de capacité
Saints	41545912	29029226
Juiz de Fore	23930340	29042104
Récife	17936334	17936334
Ponta Grossa	-	-
Anápolis	7986478	14712066
Belém	7265529	7946863

- Lorsque l'on ajoute des contraintes à un modèle, la solution ne s'améliorera jamais. Et si la contrainte est suffisamment importante, les résultats de l'objectif peuvent être bien pires.
- Bien que les contraintes garantissent des résultats moins bons, elles sont parfois nécessaires pour produire des résultats réalisables. La clé de leur utilisation dans la modélisation est de garantir que seules les contraintes significatives qui n'exercent pas de pression inutile sur le modèle ou, pire encore, ne nous conduisent pas à un problème avec une solution irréalisable sont appliquées.
- Les contraintes de capacité ne modifient pas nécessairement l'emplacement des installations, mais elles ont pour effet de modifier l'affectation de l'entrepôt aux clients.

Coût du transport aller

Le transport constitue souvent le coût le plus important dans une étude de conception de réseau.

Un changement dans le nombre et l'emplacement des installations a souvent plus d'impact sur les coûts de transport que sur tout autre coût de la chaîne d'approvisionnement.

- Coût de transport sortant : coût d'expédition sortant d'une installation
- Coût du transport entrant : coût pour faire entrer le produit dans l'installation, d'une usine à un entrepôt, avant qu'il ne soit acheminé vers un client

Objectif : localiser un nombre donné d'établissements en minimisant le coût de transport et non la distance moyenne.

Dans de nombreux cas, la solution changera lorsque les coûts de transport seront ajoutés au modèle :

- Coûts minimaux de transport. Lorsqu'un camion complet est expédié, des frais minimaux sont souvent facturés indépendamment de la distance
- Différences régionales dans les coûts de transport. Les tarifs de transport ne sont pas symétriques en raison du déséquilibre entre l'offre et la demande. En ajoutant ces types de coûts de transport à l'analyse, l'optimisation peut permettre de localiser les installations dans des zones où les tarifs sont plus favorables.
- Différents profils d'expédition des clients : dans un même réseau, certains clients peuvent toujours commander un camion entier de produits à la fois, tandis que d'autres peuvent n'en commander qu'un demi-camion. Dans ces cas, l'optimisation a pour objectif de sélectionner des sites plus proches des clients qui commandent des demi-camions, plus chers.

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} trans_{i,j} d_j Y_{i,j}$$

$$\sum_{i \in I} Y_{i,j} = 1 \quad \forall j \in J$$

$$\sum_{i \in I} X_i = P$$

$$Y_{i,j} \leq X_i \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$Y_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$X_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I$$

- Objectif : minimiser les coûts totaux de transport depuis les installations (usines ou entrepôts) jusqu'aux clients
- La matrice $trans_{i,j}$ représente le coût d'envoi d'une unité de demande de l'installation i au client j
- La demande est exprimée au total (généralement annuelle) et non expédition par expédition.
- Les coûts de transport sont exprimés en termes de coût unitaire. Autrement dit, nous multiplions les coûts de transport par les unités de demande et non par les expéditions.
- Un coût de transport pour chaque source et destination possibles doit être renseigné, et pas seulement pour les expéditions source et destination utilisées dans le passé.

La demande est exprimée au total et non expédition par expédition, sinon :

- Le modèle devient difficile à manier, car si nous modélisons chaque expédition, nous devons créer un modèle avec potentiellement des centaines de milliers de points d'expédition au lieu de plusieurs centaines de points clients.
- Un modèle plus précis n'a pas été créé, car le modèle est exécuté pour les années futures (aucune prévision fiable ne peut être effectuée)

Coût de transport par unité :

Dans les rapports de transport standard ou les devis des transporteurs, les tarifs exprimés sous forme de coût par chargement, de coût par palette ou de coût par colis relèvent du même problème que celui mentionné ci-dessus. Les structures tarifaires de transport standard doivent être converties en un simple coût par unité. Ces structures sont déterminées par différents modes de transport :

- Chargement commercial ou chargement complet (TL ou FTL). Une entreprise loue un camion entier pour se rendre d'un endroit à un autre. L'entreprise est facturée pour l'utilisation du camion entier.
 - L'entreprise de transport gère la provenance du camion avant la livraison ou sa destination après.
 - Les tarifs sont généralement structurés soit sous forme de forfait d'un point à un autre, soit sous forme de coût par mile ou kilomètre. Les tarifs facturés peuvent varier en fonction du lieu de départ et d'arrivée de l'expédition.
 - Si le transporteur facture un coût par distance, il peut parfois ajouter un tarif fixe et imposer un tarif minimum pour éviter des coûts très bas pour les déplacements courts. Le contrat du transporteur peut également inclure un supplément carburant distinct.
 - Chacun de ces camions aura une capacité généralement mesurée en poids total, en volume total ou en nombre total de palettes.

- Colis . Le mode colis ressemble beaucoup au LTL mais avec des tailles d'envoi encore plus petites.
 - Une entreprise est généralement facturée en fonction de la source, de la destination et du poids du colis.
 - Pour les colis ou les envois plus lourds, ce mode de transport peut s'avérer assez coûteux. Cependant, pour les petits colis, il peut s'avérer bien moins cher que l'expédition par LTL.
- Océan. Le transport maritime est similaire au transport par camion, mais les produits d'une entreprise se déplacent dans des conteneurs à travers l'océan entre les villes portuaires.
 - Les tarifs maritimes sont généralement indiqués comme le coût d'un seul conteneur d'un endroit à un autre.
 - Les coûts peuvent être de port à port ou de porte à porte (où le transport par camion ou par train vers le premier port et depuis le dernier port est inclus dans le tarif).
- Rail. Le transport ferroviaire permet de déplacer les produits d'une entreprise d'une gare à une autre.
 - Les tarifs ferroviaires sont généralement exprimés en termes de coût d'un wagon pour aller d'un point à un autre.
 - Comme pour le transport maritime, ces tarifs peuvent être valables entre deux gares ferroviaires ou de porte à porte.
- Intermodal.
 - Ces tarifs sont généralement exprimés sous forme de tarifs porte-à-porte, car l'entreprise de transport gère l'intégralité du déménagement depuis le point d'origine jusqu'à la destination finale.
 - Ce type de transport peut être très économique pour les déménagements intercontinentaux.

- Multistop . Le mode multistop est similaire au déplacement d'un camion, mais implique plusieurs arrêts.
 - Une entreprise doit livrer plusieurs envois. Cependant, ces envois ne sont pas tous suffisamment volumineux pour utiliser un TL complet pour chacun d'eux. Mais ensemble, ils sont également trop volumineux pour un envoi LTL. Dans le transport à arrêts multiples, un camion récupère le chargement d'une entreprise dans une installation, puis effectue des livraisons vers plusieurs destinations. Contrairement au LTL, le camion est dédié uniquement aux chargements de cette entreprise.
 - Les tarifs sont généralement exprimés en termes de coût par mile ou kilomètre avec un supplément d'arrêt. Les frais d'arrêt peuvent être supprimés pour le premier arrêt et augmentent généralement avec le nombre d'arrêts effectués sur un même trajet.
 - Souvent, une entreprise de transport imposera une limite au nombre d'arrêts qu'un seul camion peut effectuer. Il peut également y avoir des restrictions sur les kilomètres « hors route » qu'un seul camion peut parcourir au cours d'un même itinéraire. La distance hors route est une mesure de la distance à laquelle l'itinéraire s'écarte d'un itinéraire direct de la source à la destination finale.
 - Le coût du mode multi-arrêts se situe entre TL et LTL ci-dessus.

Plus le volume expédié est important en une seule fois, moins les coûts de transport sont élevés. Autrement dit, si la même quantité totale est expédiée, le coût du LTL sera inférieur à celui du colis, celui du TL inférieur à celui du LTL et celui du rail inférieur à celui du TL.

Formule de base pour convertir les coûts en un coût par unité :

$$trans_{i,j} = \frac{load_{i,j}}{avg_{i,j}}$$

- $trans_{i,j}$ est le coût pour aller du point i au point j pour satisfaire toute la demande au point j qui est satisfaite par les expéditions du point i
- la charge i,j est le coût du déplacement de la charge du point i au point j
- $avg_{i,j}$ est la taille moyenne de la charge. Pour estimer $avg_{i,j}$ (les unités de mesure sont en livres) :
 - Pour les colis et les LTL, le coût par chargement dépend de la taille de l'envoi.
 - Pour le transport TL (et le transport ferroviaire, intermodal, maritime, privé/dédié, qui sont calculés comme le transport TL), la taille moyenne correspond au volume réellement expédié.

Estimation du coût de la charge TL :

Origine	Destination	Poids de l'expédition (lb)	Distance (milles)	TL \$/mile	Charge minimale	Coût lié à la distance	Coût de chargement TL	Coût de transport par lb
Chicago	Dallas	38000	967	1,80	400	1741	1741	0,046
Chicago	Indianapolis	27000	183	1.8	400	329	400	0,015
Atlanta	Miami	40000	663	2,00	375	1326	1326	0,033
Atlanta	Chattanooga	30000	118	2,00	375	236	375	0,013

Estimation de la taille moyenne d'une expédition :

Origine	Destination	Nombre total de camions chargés	Poids total expédié (lb)	Poids moyen (lb)
Tulsa	Houston	26	832858	32033
Tulsa	Albuquerque	35	1246175	35605
Tulsa	Saint-Louis	54	1084508	38602

Exercice potentiel à l'examen

Il est nécessaire de connaître le tarif de chaque source vers chaque destination. Cependant, cette information n'est peut-être pas disponible, car :

- De nouvelles voies doivent être modélisées
- Les tarifs négociés disponibles pour les voies existantes peuvent ne pas être appliqués aux nouvelles voies
- Les caractéristiques des données disponibles ne sont pas adaptées
- Il n'y a pas de temps pour collecter des données

Les frais d'expédition doivent être estimés en :

- En utilisant un simple coût par mile ou par kilomètre basé sur les tarifs moyens disponibles aujourd'hui
- En utilisant des tarifs non négociés et en extrapolant, ces tarifs seront probablement plus élevés que ceux payés aujourd'hui. Par conséquent, les coûts des voies de sortie pour les voies actuelles peuvent être pris et réduits (ou augmentés) d'un pourcentage uniforme afin que le coût total des voies corresponde au coût total des données historiques. Ensuite, cette réduction (ou augmentation) globale en pourcentage peut être appliquée à tous les tarifs des nouvelles données pour les nouveaux scénarios.
- En utilisant des références sectorielles de haut niveau, il s'agit du coût moyen par tonne-mille à l'échelle du secteur, publié par diverses sources indépendantes. Ces tarifs sont généralement exprimés comme le coût moyen pour déplacer une tonne d'un article sur un mile.
- Utilisation de l'analyse de régression. Une régression simple trace la distance de l'expédition en fonction de son coût, puis une formule de régression permettant de déterminer un coût en fonction de la distance parcourue par l'expédition peut être élaborée.

Exemple de calcul d'un taux moyen pour un échantillon de données

Numéro d'expédition	Origine	Destination	Poids de	Coût du fret (\$)	\$/mille	Moyenne \$/mile	Écart type \$/mile	Coeff. de variation
1	Atlanta	Tolède	39800	1286	1,94	1,91	0,05	3%
2	Atlanta	Colomb	33503	1043	1,84			
3	Atlanta	Lima	38138	1149	1,96			
4	Atlanta	Youngstown	30500	1376	1,86			
5	Atlanta	Canton	34313	890	1,93			
6	Atlanta	Raleigh	32175	625	1,59	1,68	0,08	5%
7	Atlanta	Charlotte	37409	417	1,70			
8	Atlanta	Wilmington	34305	730	1,76			
9	Atlanta	Ville d'Elizabeth	36695	996	1,73			
10	Atlanta	Mont Rocheux	39253	742	1,60			
Statistiques globales						1,79	0,14	8%

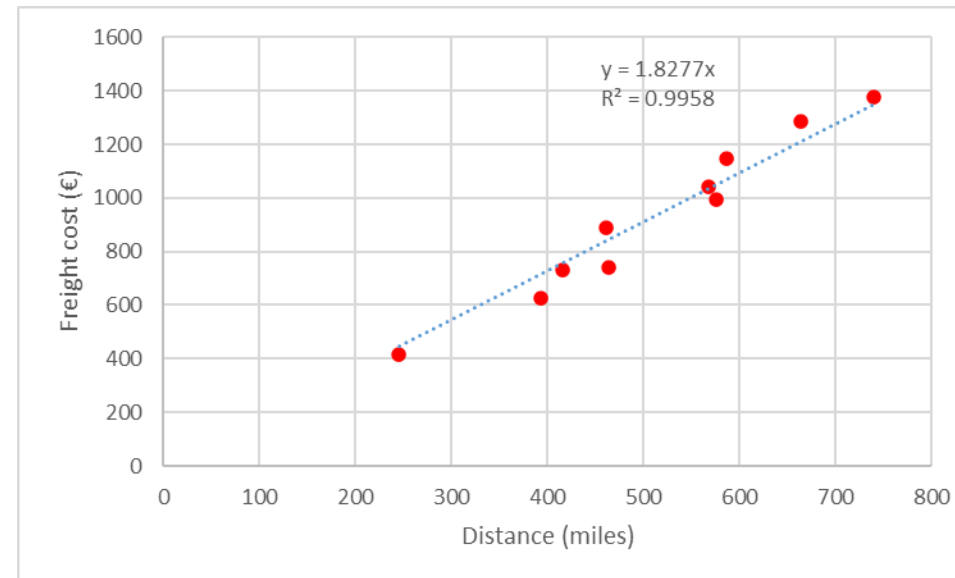
Pour tester si la moyenne est une bonne mesure, on estime l'écart type et le coefficient de variation (Std Dev / Average). L'écart type donne une mesure absolue de la variabilité et le coefficient de variation normalise les mesures et l'exprime en pourcentage.

La régression peut être utile pour aider à déterminer un bon coût à utiliser pour les sources et les destinations où aucune activité d'expédition ou aucun tarif actuel n'est disponible.

Numéro d'expédition	Origine	Destination	Poids de	Coût du fret (\$)
1	Atlanta	Tolède	39800	1286
2	Atlanta	Colomb	33503	1043
3	Atlanta	Lima	38138	1149
4	Atlanta	Youngstown	30500	1376
5	Atlanta	Canton	34313	890
6	Atlanta	Raleigh	32175	625
7	Atlanta	Charlotte	37409	417
8	Atlanta	Wilmington	34305	730
9	Atlanta	Ville d'Elizabeth	36695	996
10	Atlanta	Mont Rocheux	39253	742

Exercice potentiel à l'examen

- La distance pour chaque expédition (ou voie) est calculée.
- Les expéditions sont représentées sur un graphique avec les frais de transport et la distance
- Une analyse de régression est effectuée (à l'aide des fonctionnalités d'Excel) en considérant l' ensemble des voies



Exercice potentiel à l'examen

Une analyse plus détaillée peut être réalisée en étendant le même type d'analyse à plusieurs origines et destinations pour créer une matrice tarifaire, montrant les tarifs par kilomètre à un niveau spatial plus détaillé.

Avec le transport multi-arrêts , l'entrepôt final peut envoyer un camion qui effectue plusieurs arrêts dans différents magasins sur le même itinéraire. Les coûts de transport ne sont donc plus un simple tarif point à point. Les tarifs de transport dépendent des magasins situés sur quel itinéraire.

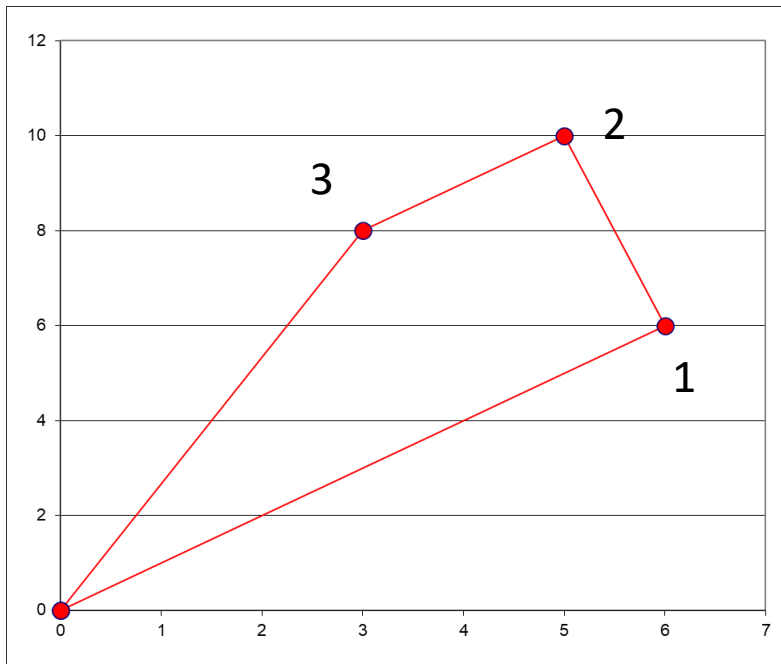
Principes de base d'une approche multi-arrêts robuste :

- Pire des cas : les coûts des itinéraires à arrêts multiples se situent quelque part entre ceux des déplacements TL et ceux des déplacements LTL.
- Un facteur d'échelle, obtenu à partir de la comparaison des coûts équivalents du tarif point à point avec le coût de l'itinéraire, peut être utilisé pour ajuster les coûts.

Exemples :

Un itinéraire à arrêts multiples depuis un entrepôt vers trois magasins, avec une distance de déplacement en ligne droite et des coûts directement proportionnels à la distance.

L'entrepôt est au point (0,0) et les camions doivent tous commencer et terminer ici.

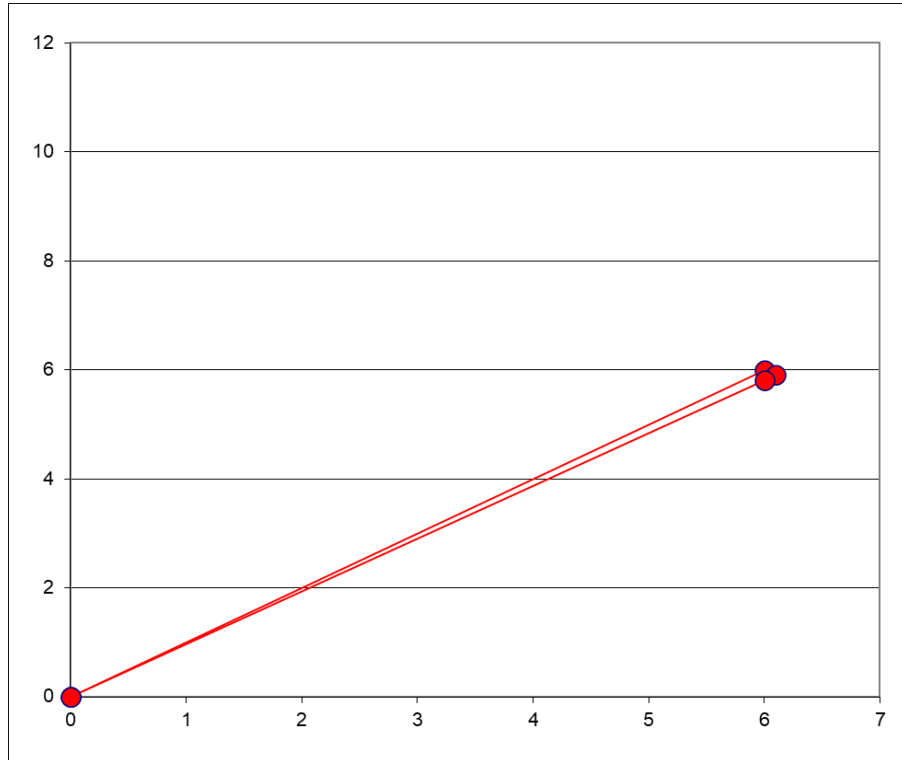


Distance entre deux points :

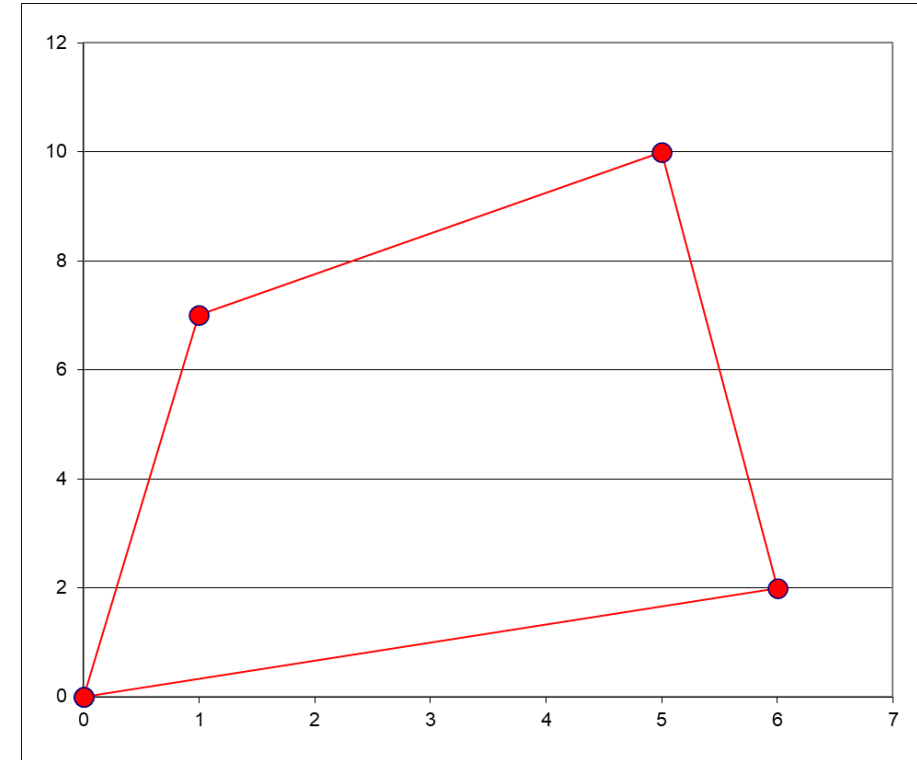
$$dist = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

- La distance totale du parcours est de 23,98
- Cependant, dans la formulation de la conception du réseau, la distance entre l'entrepôt directement et chacun de ces points séparément est prise en compte :
 - La formule pour calculer la distance du dépôt à chaque client.
 - Chaque valeur est multipliée par deux pour le trajet retour
 - Les trois distances sont additionnées.
 - Cela donne une distance totale de 56,42
- Pour faire une comparaison équitable de l'itinéraire à arrêts multiples avec le 56.42 :
 - Un itinéraire à arrêts multiples est adopté pour effectuer des livraisons plus fréquentes. Ainsi, dans ce cas, chaque itinéraire fournit un tiers des besoins totaux de chaque client. Par conséquent, parcourir l'itinéraire à arrêts multiples trois fois permet d'effectuer une comparaison équitable avec les distances de livraison directe par camion complet (56,42). Effectuer l'itinéraire trois fois donne une distance totale de 71,94.
 - La totalité des besoins peut être livrée à chaque magasin avec un seul chargement de camion (distance totale de 56,42). Ou trois livraisons sur des itinéraires à arrêts multiples peuvent être effectuées (distance totale de 71,94).
 - Il est logique que la distance du trajet soit plus longue pour le multistop dans ce cas (l'avantage de livraisons plus fréquentes a un coût supplémentaire).

Le facteur 1,28 varie également en fonction de la structure des itinéraires. Si les magasins sont tous éloignés de l'entrepôt, mais proches les uns des autres, le facteur peut être beaucoup plus faible.

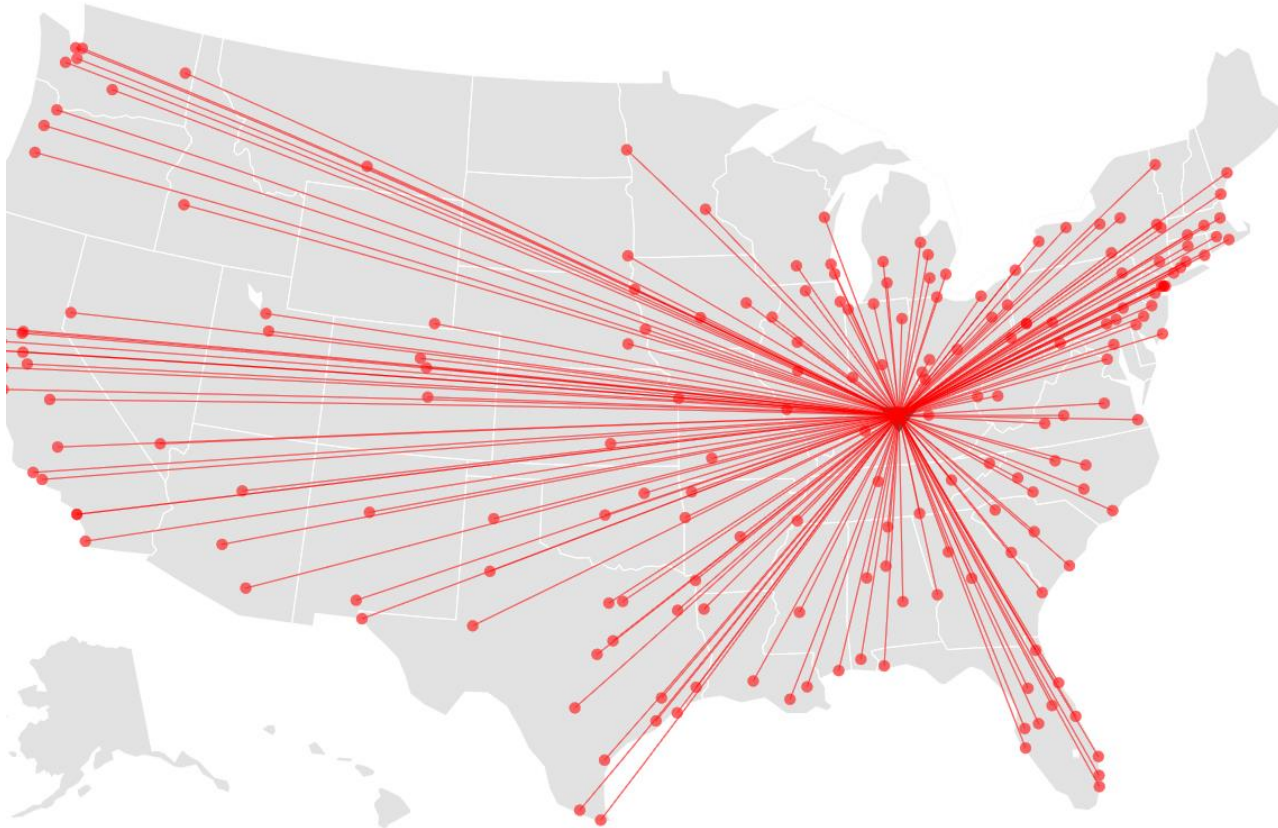


- la distance totale aller-retour est de 50,6
- parcourir le parcours trois fois est 51,3
- le facteur est 1,01



- la distance totale aller-retour est de 49,2
- parcourir le parcours trois fois est de 79,4
- le facteur est 1,64

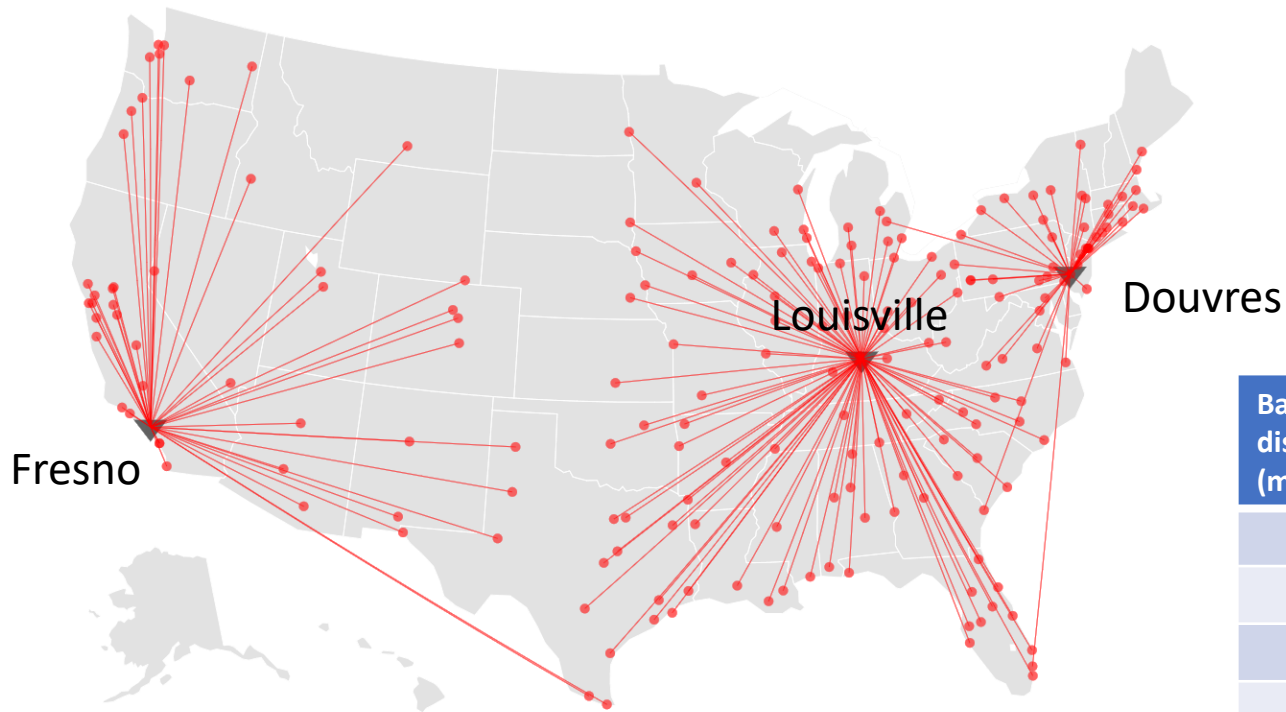
Étude de cas : distributeur aux États-Unis
(Watson et al., 2013)



- Le coût actuel de cette chaîne d'approvisionnement est de 16,6 millions de dollars
- La distance moyenne jusqu'aux clients est d'environ 975 miles

Bande de distance (miles)	Forfaits totaux	% du total	% cumulé
300	259000	8	8
600	919000	28	36
900	949000	28	65
5000	1135000	35	100

Cette entreprise souhaite déterminer si elle peut réduire ses coûts en ouvrant deux entrepôts supplémentaires.



- Le coût total diminue à 15,2 millions de dollars
- La distance moyenne est tombée à environ 430 miles

Bande de distance (miles)	Forfaits totaux		% du total	
	Réseau actuel	3 entrepôts	Réseau actuel	3 entrepôts
300	259000	1347000	8	41
600	919000	1088000	28	33
900	949000	476000	29	15
5000	1135000	351000	35	11

Cette entreprise souhaite maintenant évaluer la valeur marginale d'un quatrième entrepôt. Elle a déterminé que si elle pouvait réaliser des économies supplémentaires de près de 1,4 million de dollars, cela pourrait valoir la peine d'être sérieusement envisagé.



- Les coûts diminuent à environ 15 millions de dollars, ce qui ne représente qu'une économie de 200 000 dollars par rapport à leur précédente solution à 3 entrepôts (une réduction d'environ 1 %).
- Cette différence de 200 000 \$ indique le seuil du coût fixe (si le coût fixe de l'installation supplémentaire est inférieur à 200 000 \$, il serait toujours avantageux d'ouvrir la quatrième installation).

Coûts fixes et variables des installations

- Les coûts fixes sont des coûts engagés chaque année (ou chaque mois), indépendamment du volume traité dans l'installation (par exemple, la construction du site, l'agrandissement du site, l'ajout d'équipements au site, comme des lignes ou des équipements supplémentaires dans les usines, des rayonnages supplémentaires ou l'automatisation dans les entrepôts, le paiement des taxes ou la dotation en personnel du site).
 - Les coûts variables sont ceux qui dépendent du nombre réel d'unités fabriquées dans une installation ou qui transitent par une installation.
-
- Si tous les coûts d'une installation sont modélisés comme fixes, alors l'optimisation a intérêt à minimiser le nombre d'installations qu'elle ouvre et, lorsqu'une installation est ouverte, elle se concentrera sur la maximisation de la quantité de produits qui y transitent.
 - Si tous les coûts d'une installation sont modélisés comme variables, alors l'optimisation a intérêt à utiliser les installations ayant le coût variable le plus bas et n'a aucun intérêt à éviter d'ajouter des installations supplémentaires.
-
- Les coûts fixes peuvent être considérés comme une fonction en escalier (plusieurs coûts fixes à ajouter, en fonction de la quantité de produit qui circule ou est fabriquée dans l'usine).
 - Les coûts variables dépendent de la taille de l'installation ou des économies d'échelle. Autrement dit, à mesure que l'installation s'agrandit, le coût par unité peut diminuer. Cela peut être pris en compte avec les tailles d'échelon avec un coût variable inférieur pour chaque taille d'échelon.

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (trans_{i,j} + facVar_i) d_j Y_{i,j} + \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} facFix_{i,w} X_{i,w}$$

$$1. \sum_{i \in I} Y_{i,j} = 1 \quad \forall j \in J$$

$$5. \sum_{j \in J} vol_{i,j} Y_{i,j} \leq \sum_{w \in W} cap_{i,w} X_{i,w} \quad \forall i \in I$$

$$2. \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} X_{i,w} \geq P_{min}$$

$$6. Y_{i,j} \leq \sum_{w \in W} X_{i,w} = 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$3. \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} X_{i,w} \leq P_{max}$$

$$7. Y_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$4. \sum_{w \in W} X_{i,w} \leq 1 \quad \forall i \in I$$

$$8. X_{i,w} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall w \in W$$

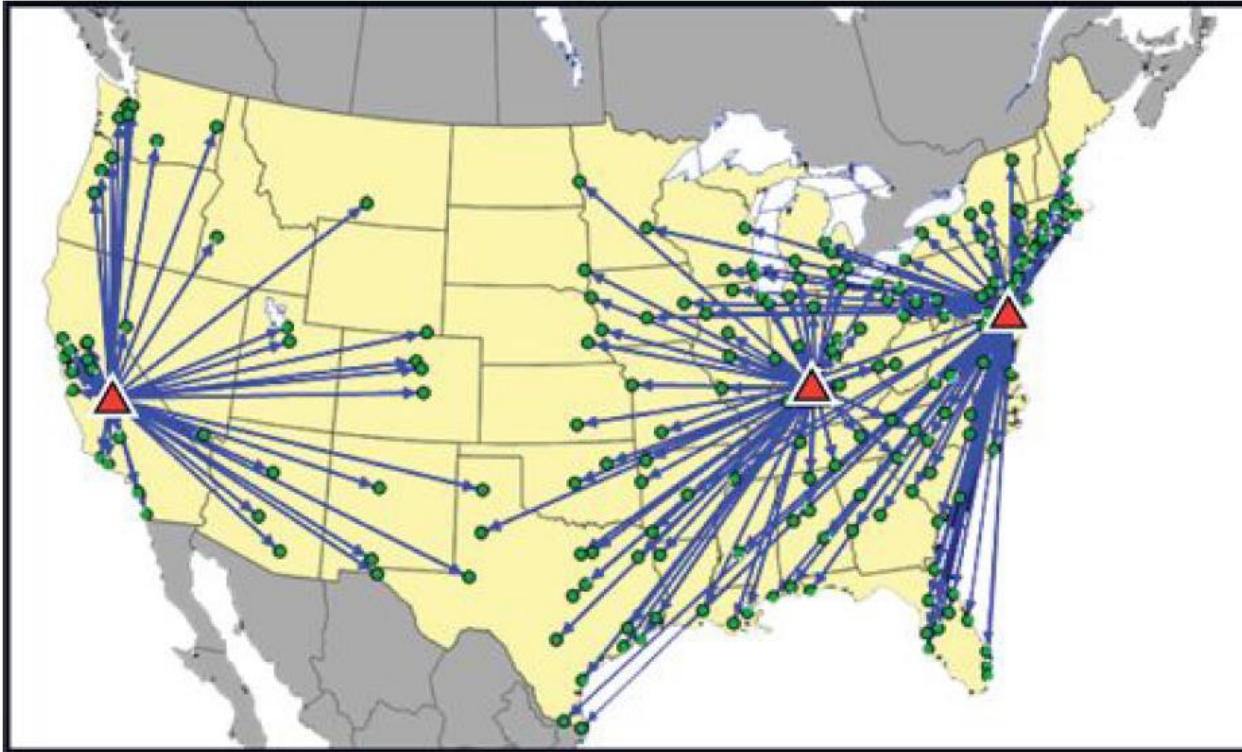
- L'ensemble W représente l'ensemble des options d'installation. Chaque option représente une décision de dimensionnement différente pour le même emplacement physique (par exemple, W représente le choix de construire un petit, moyen ou grand entrepôt sur chaque site potentiel). Cet ensemble d'options permet de modéliser les changements de coûts fixes et variables pour chaque option.
- La décision d'ouvrir ou non un établissement a été généralisée pour inclure le choix de l'option d'établissement. La variable $X_{i,w}$ sera fixée à 1 si et seulement si l'établissement i est ouvert avec l'option w .
- La contrainte 4 garantit que plusieurs options d'installation pour chaque installation ouverte ne sont pas sélectionnées.
- fixes ($facFix$) et variables ($facVar$) de l'installation sont ajoutés à la fonction objective. L'optimisation prendra donc en compte tous les coûts. L'optimisation ne voudra supporter un coût fixe que si elle a absolument besoin de la capacité ou si les économies réalisées sur les coûts variables ou de transport en valent la peine.
- La contrainte 5 exprime les limites de la capacité d'une installation.
- Le modèle permet au moteur de résolution de déterminer le nombre d'établissements à ouvrir. Les contraintes 2 et 3 limitent le nombre total d'établissements ouverts à une valeur comprise entre P_{min} et P_{max} (sans les coûts fixes des établissements, le modèle n'aurait eu aucune raison d'ouvrir simplement tous les établissements).

Étude de cas : distributeur aux États-Unis

(Watson et al., 2013)

Des coûts variables sont ajoutés au modèle :

- Établissement de Louisville : 2,75 \$ par colis
- Nouveaux emplacements : 2,50 \$ par forfait



- Les trois emplacements sont les mêmes, mais les territoires ont changé
- La fonction objective prend en compte à la fois les coûts de transport et les coûts variables. Elle ne tient pas compte de la distance par rapport au client. Ainsi, lorsque le coût variable est différent d'un endroit à l'autre, la décision peut changer et cela peut avoir un impact sur le modèle.
- Le modèle déplacera davantage de volume vers les entrepôts à faible coût. Lorsque l'optimisation décide de déplacer davantage de volume vers ces emplacements à faible coût, les coûts de transport augmenteront, mais le résultat global sera un coût plus faible.

Pour estimer les coûts variables, les éléments suivants doivent être pris en compte :

- Coûts de la main d'oeuvre
- Coûts des services publics. Plus les produits qui circulent dans une installation sont nombreux, plus l'installation utilise de ressources (par exemple, l'électricité et l'eau)
- Coûts des matériaux

Il est plus simple et plus clair de ventiler les coûts par activité principale pour aider à quantifier les coûts (par exemple, le rangement du produit, son stockage et sa collecte et son expédition aux clients).

Lorsqu'il existe de nombreux sites différents et qu'il est difficile de ventiler les coûts variables, une analyse de régression peut être utilisée :

- Le coût total du site est la variable dépendante
- Le débit total du site est la variable indépendante. D'autres variables indépendantes peuvent être ajoutées (par exemple, le type de produit ou le type d'installation).
- La pente de la ligne fournit des informations sur le coût variable
- L'ordonnée à l'origine de la régression peut donner un aperçu du coût fixe global par établissement.

Pour estimer le coût fixe :

- Lorsqu'un scénario est exécuté avec une installation de plus autorisée qu'un autre scénario, la différence de coût est le seuil de coût fixe (par exemple, si un modèle revient avec une solution à quatre installations à un coût de 10,8 millions de dollars et que la solution à cinq installations est de 9,1 millions de dollars, alors le coût de l'entrepôt supplémentaire doit être inférieur à 1,7 million de dollars)

Raisons d'inclure les coûts fixes :

- Les coûts fixes varient considérablement d'un endroit à l'autre
- La capacité doit être prise en compte et les changements doivent être traités comme des coûts fixes.
- Les décisions d'investissement en capital doivent être prises pour agrandir ou améliorer les sites existants ou ouvrir de nouveaux sites (l'investissement doit être réalisé dans le même délai que les autres coûts)

Des informations sur les coûts fixes et variables sont nécessaires, mais les systèmes comptables contenant des données financières peuvent simplement rendre compte des coûts totaux :

- Considérez la liste détaillée des catégories de dépenses d'une entreprise pour une installation (dépenses que l'équipe comptable suit et sur lesquelles elle établit un rapport chaque mois)
- Le coût de chaque élément de la liste est classé en pourcentage fixe et pourcentage variable

Chaîne d'approvisionnement à trois niveaux

Jusqu'à présent, seule une chaîne d'approvisionnement à deux niveaux a été envisagée (une installation et les clients qu'elle dessert).

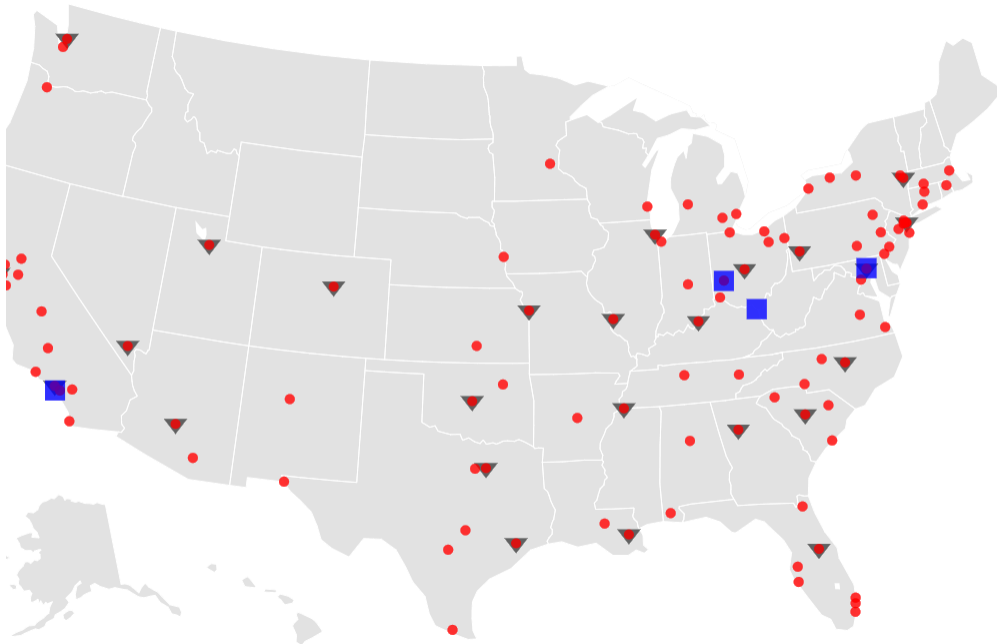
Exemples :

- Un ensemble d'usines ou de fournisseurs qui expédient vers des entrepôts, puis les entrepôts, à leur tour, expédient vers

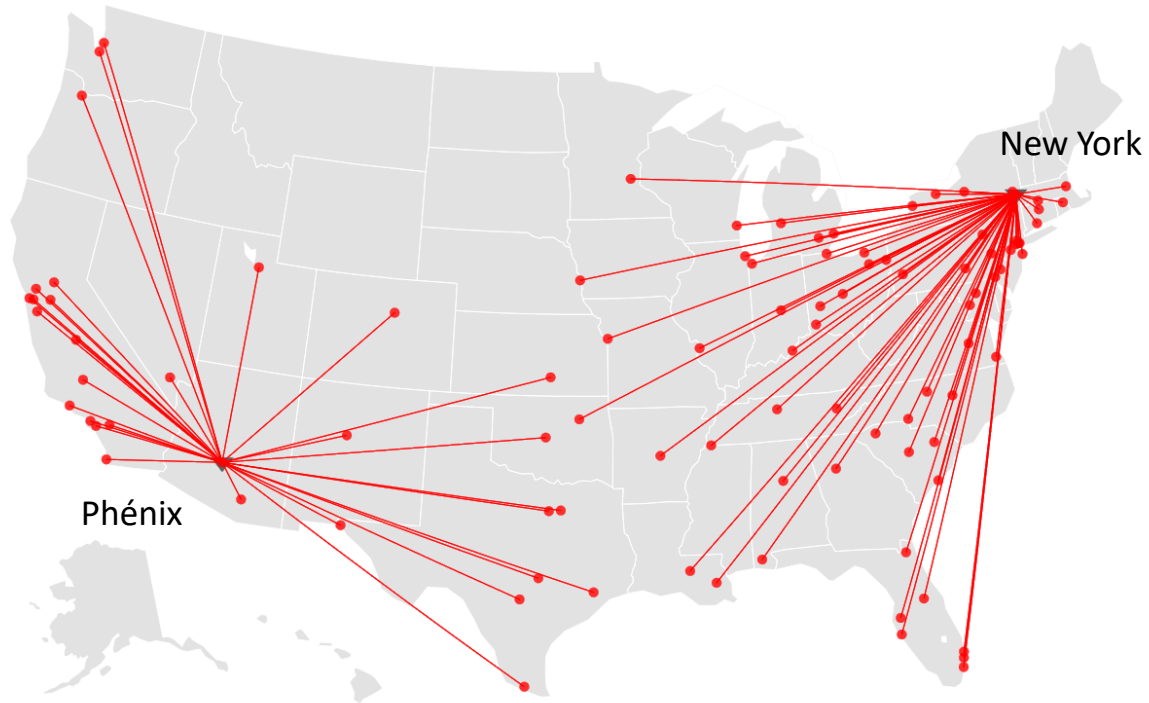
des clients.

Etude de cas: réseau aux Etats-Unis
(Watson et al, 2013)

Une chaîne d'approvisionnement dans laquelle un groupe de fournisseurs de matières premières expédie vers une usine, et l'usine expédie ensuite vers les clients.



- Chaque usine (marquée par un rectangle bleu) est spécialisée dans la fabrication d'une seule des quatre familles de produits.
- Les usines et les entrepôts sont conçus pour gérer les expéditions ferroviaires. Par conséquent, les expéditions des usines vers les entrepôts sont un mélange de transport par camion et par train. En direction des clients, les produits voyagent généralement par camions complets (mais pas toujours).
- Les expéditions d'une usine à un entrepôt coûtent 0,07 \$ par tonne-mille
- Les expéditions vers un client coûtent 0,12 \$ par tonne-mille
- Dans les deux cas, la structure tarifaire prévoit un tarif



Objectif : définir une nouvelle structure de réseau qui réduit les coûts actuels de la chaîne d'approvisionnement

Dans la chaîne d'approvisionnement actuelle :

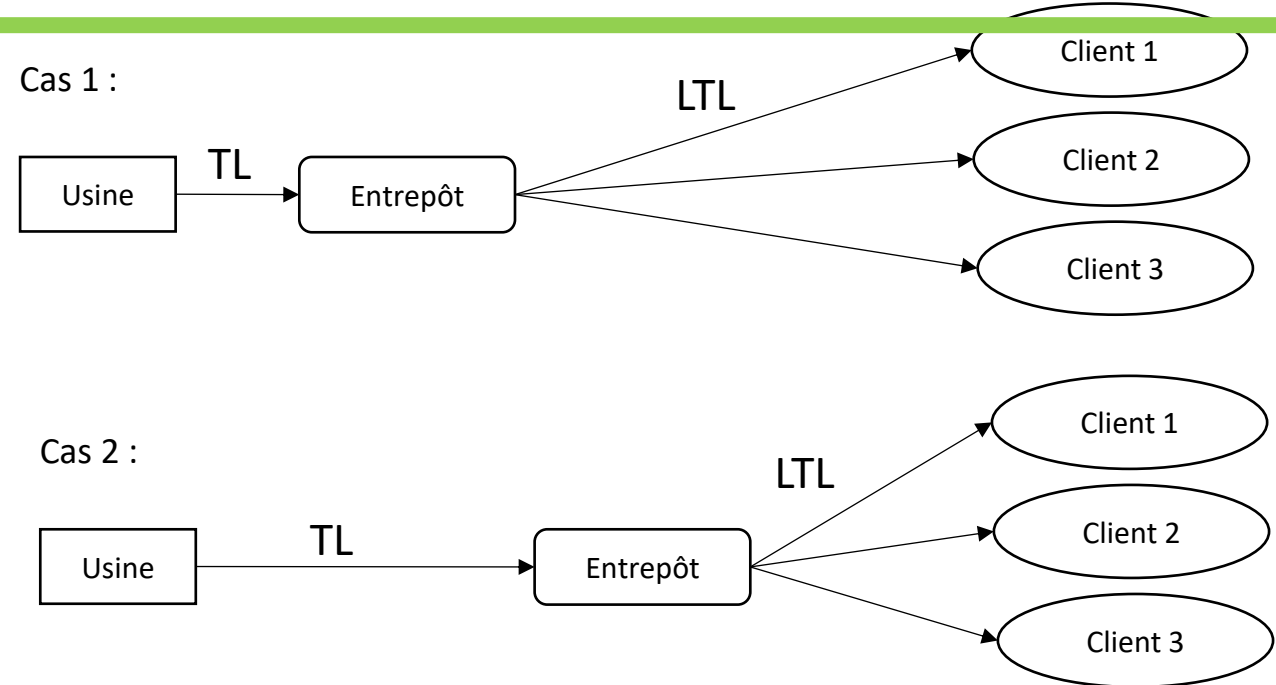
- Le marché est desservi par deux entrepôts
- Le coût du transport est de 254 millions de dollars par an :
 - 133 millions de dollars, c'est le coût pour acheminer les produits des usines aux entrepôts
 - 121 millions de dollars, c'est le coût pour faire parvenir le produit aux clients
- Seulement 21 % de la demande se situe dans un rayon de 200 miles de leurs entrepôts actuels et seulement 32 % de la demande se situe dans un rayon de 400 miles.

Localisation des entrepôts en fonction des emplacements fixes des usines et des clients afin de minimiser les coûts :

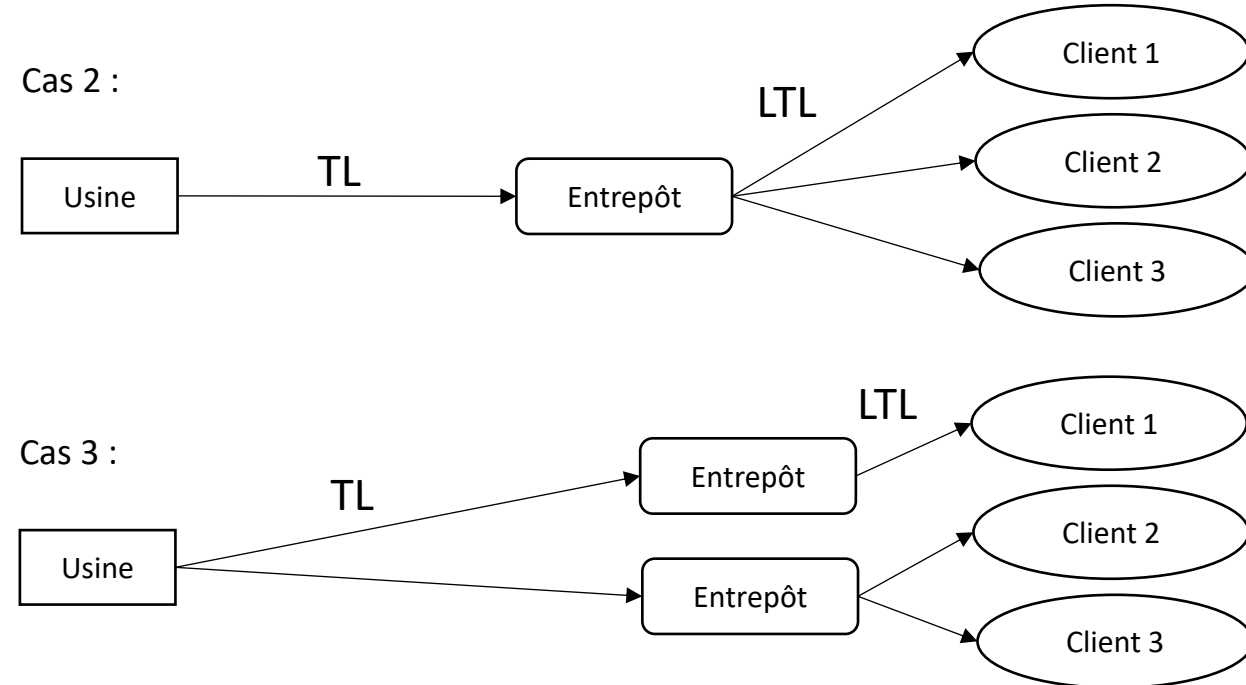
- Les plantes sont expédiées vers les entrepôts, puis les entrepôts sont expédiés vers les clients.
- Contrairement aux modèles précédents, l'emplacement des usines ou des points d'approvisionnement existants aura également un impact sur l'emplacement optimal des installations. Le modèle précédent avait tendance à implanter les installations à proximité des clients afin de réduire les coûts de transport. Désormais, la demande des clients et les points d'approvisionnement influencent tous deux l'emplacement de l'installation. L'objectif est de minimiser le coût des expéditions vers et depuis l'installation.
- La force relative de ces deux forces dépend grandement de la différence de coût relative entre les coûts entrants et sortants.

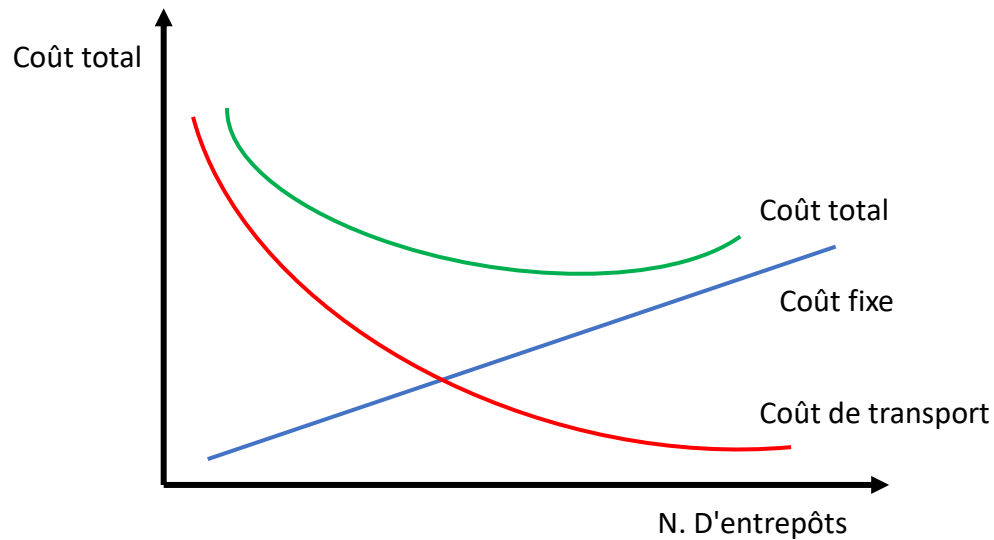
Exemple:

- Expéditions par camion complet (TL) d'une usine à l'entrepôt.
- L'entrepôt expédie des lots partiels (LTL) aux points clients.
- Dans le cas 1, l'usine expédie ses produits par TL sur une courte distance jusqu'à l'entrepôt. Dans le cas 2, l'entrepôt est beaucoup plus proche des clients.
- Le cas 2 présente le coût le plus bas (le coût total est minimisé en maximisant la distance sur TL et en minimisant la distance sur LTL)



- Dans le cas 3, un deuxième entrepôt est ajouté
- Les clients reçoivent toujours des expéditions de la même taille et l'usine dispose d'un volume suffisant pour pouvoir expédier des camions complets
- Le cas n°3 présente des coûts de transport inférieurs.
- Mais quelle chaîne d'approvisionnement a le coût le plus bas dépend du coût d'ajout du deuxième entrepôt.
- Si les économies de transport compensent le coût de l'entrepôt, le cas 3 présente le coût le plus bas ; sinon, le cas 2 est meilleur.





- Les coûts de transport diminuent à mesure que des entrepôts supplémentaires sont ajoutés.
- Ces entrepôts supplémentaires permettent également de se rapprocher des clients et de réduire les coûts de transport .
- Cependant, à mesure que des entrepôts sont ajoutés, le coût fixe total des entrepôts augmente.
- La meilleure solution en termes de coût se situe au point le plus bas de la courbe des coûts totaux.

Il s'agit d'une courbe assez courante, mais chaque cas sera différent. Dans l'exemple, le fait d'être plus proche des clients a permis de réduire le coût du transport, mais ce n'est pas toujours le cas :

- Une usine peut avoir besoin d'une grande quantité de matières premières lourdes pour son processus de production. Le produit fini qui en résulte est envoyé aux clients relativement petit et léger en comparaison. Le coût d'entrée peut donc être élevé par rapport au transport sortant, moins cher.
- Un détaillant peut expédier des camions complets d'un large assortiment de ses produits aux magasins, mais s'approvisionner pour chaque produit auprès d'un fournisseur distinct, ce qui nécessite de nombreuses petites expéditions dans son entrepôt.

$$\min \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} (\text{trans}PW_{l,i} + pVar_i)Z_{l,i} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (\text{trans}WC_{i,j} + whVar_i)d_j Y_{i,j} + \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} whFix_{i,w} X_{i,w}$$

$$1. \sum_{i \in I} Y_{i,j} = 1 \quad \forall j \in J$$

$$7. \sum_{l \in L} Z_{l,i} \leq pCap_l \quad \forall l \in L$$

$$2. \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} X_{i,w} \geq P_{min}$$

$$8. Y_{i,j} \leq \sum_{w \in W} X_{i,w} = 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$3. \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} X_{i,w} \leq P_{max}$$

$$9. Y_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$4. \sum_{w \in W} X_{i,w} \leq 1 \quad \forall i \in I$$

$$10. X_{i,w} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall w \in W$$

$$5. \sum_{j \in J} vol_{i,j} Y_{i,j} \leq \sum_{w \in W} cap_{i,w} X_{i,w} \quad \forall i \in I$$

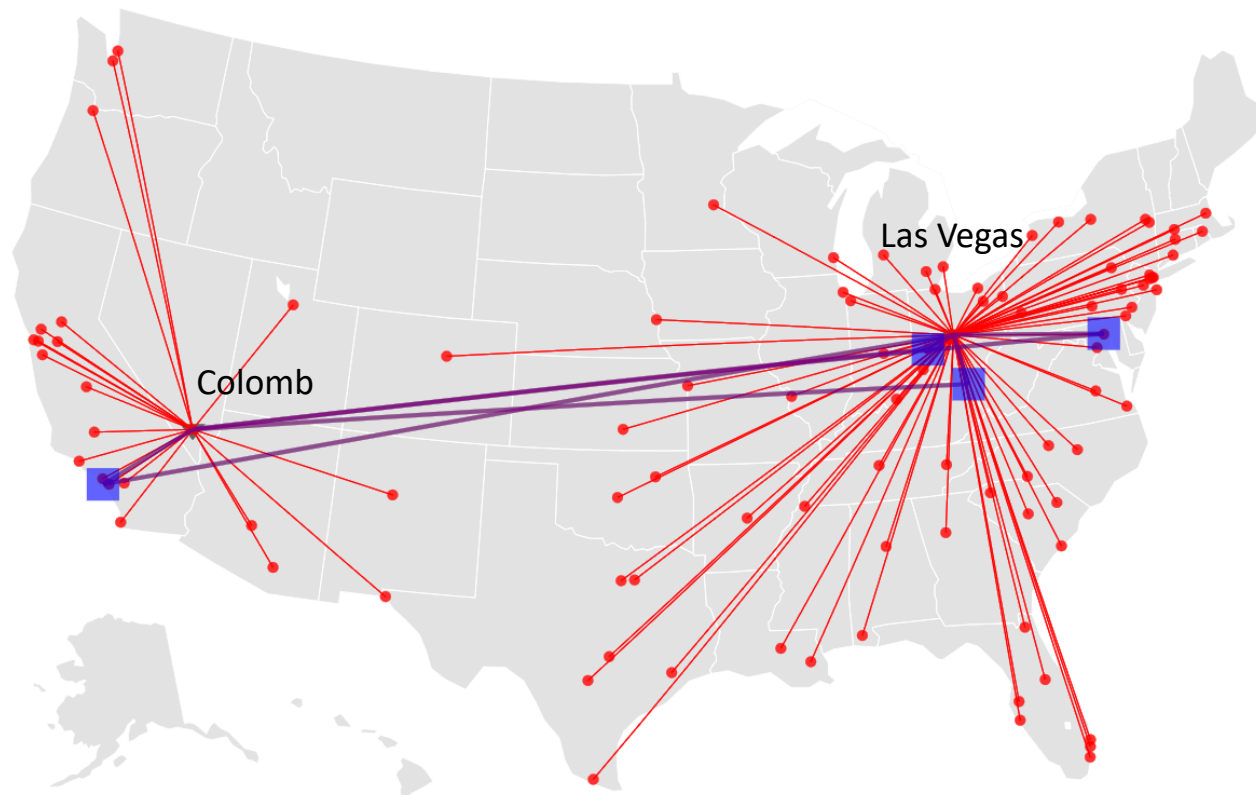
$$11. Z_{l,i} \geq 0 \quad \forall l \in L, \forall i \in I$$

$$6. \sum_{l \in L} Z_{l,i} = \sum_{j \in J} d_j Y_{i,j} \quad \forall i \in I$$

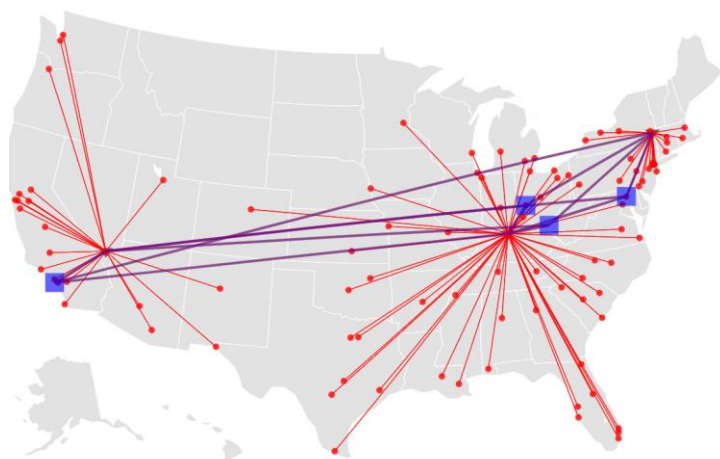
- $whVar$ sont les coûts variables de l'entrepôt, $pVar$ sont les coûts variables de l'usine, $transWC$ est le coût de transport de l'entrepôt au client, $transPW$ est le coût de transport de l'usine à l'entrepôt, $whCap$ est la capacité de l'entrepôt, $pCap$ est la capacité de l'usine et $whFix$ est le coût fixe de l'entrepôt
- La fonction objective se divise ici en trois sections distinctes. La première section calcule le coût total de production ou d'acquisition des biens et leur expédition vers l'entrepôt. La deuxième section calcule le coût total de manutention des biens dans les entrepôts et leur expédition aux clients. La troisième section calcule le coût fixe total d'ouverture des entrepôts (tant que le total correct est calculé, la fonction objective peut être organisée de la manière qui semble la plus lisible et la plus intuitive).
- La variable Z est le flux des usines vers les entrepôts.
- L'équation (6) représente les contraintes de « Conservation des flux » qui transmettent l'obligation d'expédier et de produire des clients aux usines ou aux fournisseurs. Le côté gauche additionne les expéditions entrantes sur toutes les voies usine-entrepôt qui se terminent à cet entrepôt, et le côté droit additionne les expéditions sortantes sur toutes les voies entrepôt-client qui proviennent de cet entrepôt. En définissant ces deux sommes comme égales l'une à l'autre, les entrepôts ne peuvent ni consommer ni produire de marchandises, mais simplement servir de conduits pour permettre des options d'expédition plus efficaces.

Dans l'étude de cas, les coûts de transport étaient de loin le coût dominant dans le réseau d'entrepôts, donc la fonction est définie pour minimiser uniquement ce domaine de coût spécifique.

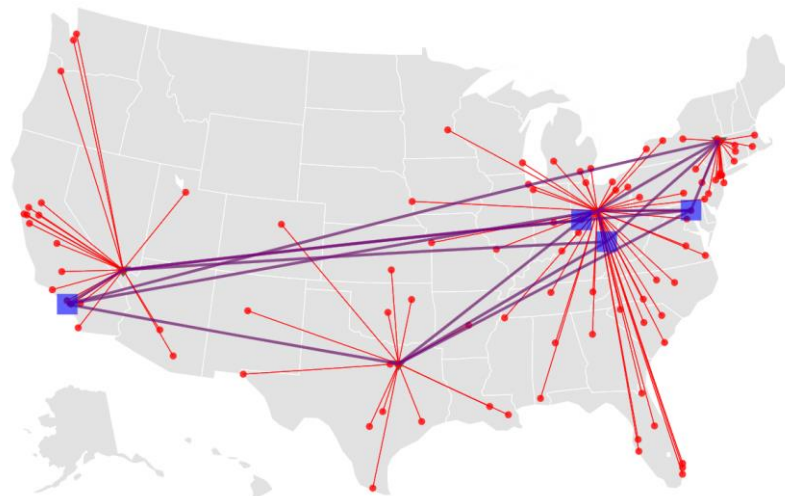
Le compromis se situe entre le coût entrant et le coût légèrement plus élevé du transport du produit vers les clients.



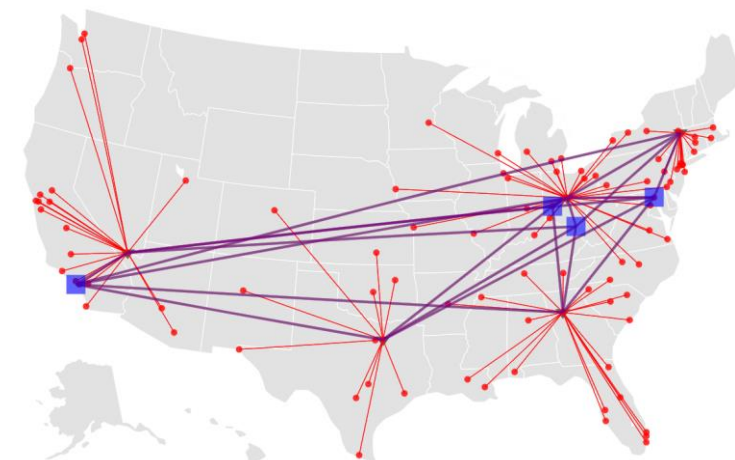
- Le modèle choisit de déplacer les deux entrepôts (le nouvel emplacement de l'entrepôt à l'est est à la fois plus proche des points clients et plus proche des autres usines)
- Le coût total du transport a diminué à 196 millions de dollars (par rapport au coût initial de 254 millions de dollars) :
 - Le coût de transport des produits des usines aux entrepôts est passé de 133 millions de dollars à 94 millions de dollars
 - Le coût des entrepôts aux clients est passé de 121 millions de dollars à 103 millions de dollars



Les 3 meilleures solutions d'entreposage



Les 4 meilleures solutions d'entreposage



Les 5 meilleures solutions d'entreposage

	Cas de base	Meilleur 2	Les 3 meilleurs	Les 4 meilleurs	Les 5 meilleurs
Coût total (en millions)	254	194	182	176	169
Coût de l'usine à l'entrepôt	133	94	102	107	109
De l'entrepôt au client	121	100	80	69	60
% de service dans un rayon de 400 miles	32	37	63	71	72

- Le simple déplacement des deux entrepôts vers des emplacements plus optimaux réduit considérablement les coûts de transport. L'ajout d'entrepôts supplémentaires ne fait que réduire encore davantage les coûts.
- En ce qui concerne les coûts fixes de l'entrepôt, en passant des trois meilleurs entrepôts aux quatre meilleurs, on estime que l'on économisera 6 millions de dollars. Par conséquent, si un nouvel entrepôt coûte plus de 6 millions de dollars, il ne serait pas judicieux d'ouvrir un quatrième entrepôt.
- Le taux d'économies diminue à chaque entrepôt ajouté au réseau (la valeur différentielle des entrepôts supplémentaires diminue)
- L'emplacement réel des entrepôts varie selon chaque solution. Pour convertir la meilleure solution à trois emplacements en la meilleure solution à quatre emplacements avec la simple addition d'un entrepôt :
 - Choisissez les trois meilleurs et ajoutez un quatrième entrepôt plus tard en fonction des trois emplacements d'origine fixés dans le modèle. Cela fournit une bonne solution uniquement pour les trois meilleurs, elle peut donc être utilisée si l'ajout du quatrième entrepôt n'est pas probable
 - Choisissez les trois meilleurs emplacements parmi les quatre meilleurs. Il peut être utilisé si l'ajout du quatrième entrepôt est quelque peu probable
 - toutefois bon de tester les deux cas et de voir si la différence de coût est significative.
- Les économies réalisées grâce à des entrepôts supplémentaires sont directement liées aux économies réalisées sur les coûts d'expédition de l'entrepôt au client.
- Le pourcentage de clients dans un rayon de 400 miles augmente à mesure que le nombre d'entrepôts au sein du réseau augmente

La validité des tarifs usine-entrepôt dépend du remplissage des wagons et des camions qui circulent sur ces voies. Cependant, si chaque usine expédie vers trop d'entrepôts, il devient plus difficile de remplir les wagons et les camions. Dans ce cas, la capacité de remplissage des wagons et des camions doit être testée en analysant le flux annuel de produits de chaque usine vers chaque entrepôt.

Par exemple:

- 13 000 000 livres de produits entrants de l'usine aux entrepôts / 52 semaines = 250 000 lb en mouvement par semaine
- 250 000 lb transférées vers un maximum de 5 entrepôts = Moyenne de 50 000 lb vers chaque entrepôt
- 50 000 lb > 45 000 lb de capacité des modes de transport ferroviaire et routier
- les wagons et les camions peuvent être remplis jusqu'à cinq emplacements d'entrepôt au total

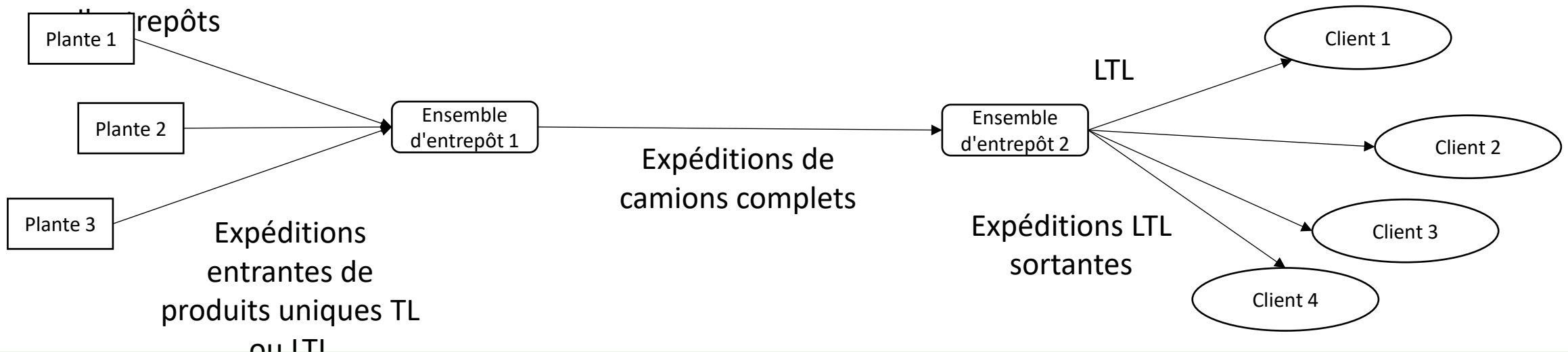
Pour localiser les usines en fonction de la provenance des matières premières :

- Une approche similaire aux études de localisation d'entrepôt est adoptée
- Le même compromis entre les coûts de transport entrant et sortant est étudié
- Cependant, une usine peut recevoir des niveaux plus élevés de produits entrants par rapport aux unités de produits finis expédiés (par exemple, deux tonnes de matières premières pourraient être importées pour chaque tonne de produits finis expédiés).
- Par conséquent, l'influence supplémentaire du nombre total de tonnes doit être prise en compte dans l'analyse.

La logique de modélisation à trois échelons s'applique également aux réseaux contenant plus de trois échelons.

Pour un réseau en étoile :

- Les distributeurs se spécialisent souvent dans la vente de produits provenant de milliers de petits fournisseurs regroupés
- Les étapes les plus coûteuses de la chaîne d'approvisionnement d'un distributeur sont, le plus souvent, la collecte de tous les produits auprès des nombreux fournisseurs, puis la livraison finale au client.
- Par conséquent, plusieurs niveaux d'entrepôts sont adoptés :
 - le premier ensemble d'entrepôts récupère les produits des vendeurs
 - le deuxième ensemble est responsable de la livraison finale aux clients
 - au milieu, l'entreprise peut déplacer efficacement des produits dans des camions complets entre des ensembles



Pour localiser l'ensemble d'entrepôts 1 :

- Un seul ou un petit nombre d'entrepôts centraux, lorsque les fournisseurs ont suffisamment de volume pour expédier en camion complet vers un ou plusieurs emplacements
- De nombreux entrepôts sont proches des fournisseurs et ces fournisseurs expédient ensuite de courtes expéditions LTL vers l'entrepôt le plus proche, lorsque les fournisseurs ne peuvent pas remplir un camion complet même en expédiant vers un seul endroit.

Pour localiser l'ensemble d'entrepôts 2 :

- De nombreux emplacements à proximité des clients, puisque la capacité de l'entreprise à transporter des produits en camions complets dans ces entrepôts permet de se concentrer sur un meilleur service et des distances d'expédition LTL certaines plus courtes vers les clients

Certaines entreprises ont besoin de plus de deux niveaux d'entrepôts. Par exemple, un grand détaillant qui vend des produits et les expédie directement aux clients d'une ville :

- Les lieux de consommation deviennent les maisons des gens et les commandes peuvent avoir plusieurs tailles :
 - Pour les articles volumineux, les entreprises utilisent généralement de petits camions effectuant plusieurs arrêts dans une petite zone géographique.
 - Pour les articles plus petits, ces entreprises peuvent utiliser des services de livraison de petits colis
- Dans les deux cas, l'objectif est de conserver le produit sur place et dans des camions pleins le plus longtemps possible afin de maîtriser les coûts. Cela nécessite des entrepôts locaux (troisième série). Ces emplacements sont censés recevoir les produits des entrepôts régionaux et alléger le coût élevé des petites expéditions vers les marchés les plus éloignés.
- Comme il peut être coûteux d'exploiter une chaîne d'entrepôts locaux entièrement approvisionnés, de nombreuses entreprises traitent en pratique ces entrepôts comme des quais de transbordement :
 - Les commandes arrivent tout au long de la journée pour des livraisons nécessaires le lendemain.
 - Après un certain délai, l'entrepôt régional commence à préparer les commandes pour les entrepôts locaux. Ces commandes sont chargées sur un camion complet.
 - Pendant la nuit, le camion se dirige vers l'entrepôt local.
 - Dès le matin, le produit est déplacé du camion de l'entrepôt régional vers les véhicules de livraison.
- Lorsque les entreprises expédient des petits colis et sont facturées au colis, une stratégie appelée « saut de zone » est adoptée. Les « zones » sautées sont les zones définies par les transporteurs de petits colis. Si le volume est suffisant, les camions peuvent être remplis de colis pour un marché local et conduits directement au centre de tri local du transporteur de colis. De cette façon, le produit est remis aux camions de livraison du transporteur de colis.

Les anciens réseaux en étoile disposaient de points d'approvisionnement fixes.

Plus de trois échelons sont nécessaires si l'on détermine simultanément l'emplacement optimal des usines et des entrepôts, ce qui entraîne des problèmes plus complexes.

Dans l'exemple du hub-and-spoke, le problème peut être divisé en deux problèmes :

- La première consiste à localiser l'entrepôt central à proximité des fournisseurs.
- Grâce à la possibilité d'expédier des chargements complets de camions à relativement faible coût depuis les entrepôts centraux vers les entrepôts régionaux, les entrepôts centraux peuvent être situés indépendamment des emplacements des clients.
- Parallèlement, la localisation des entrepôts régionaux ne dépend pas non plus des entrepôts centraux, mais uniquement de la localisation des clients.