

Comment transporter mieux et au moindre coût ?

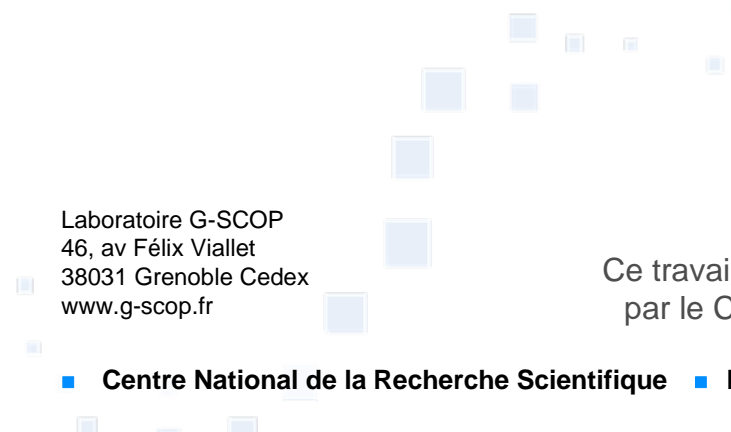
Van-Dat.Cung@grenoble-inp.fr

Pôle Optimisation et Systèmes de Production

D.C. Recherche Opérationnelle pour les S.P.

Céline Cholez (PACTE-CRISTO)

Iragaël Joly (GAËL)



Laboratoire G-SCOP
46, av Félix Viallet
38031 Grenoble Cedex
www.g-scop.fr

Ce travail est financé en partie par un BQR INPG et
par le Cluster de Recherche Rhône-Alpes GOSPI



Cluster gosci

Partie I

- Complexité du système de transport
- Enjeux de la logistique de transport

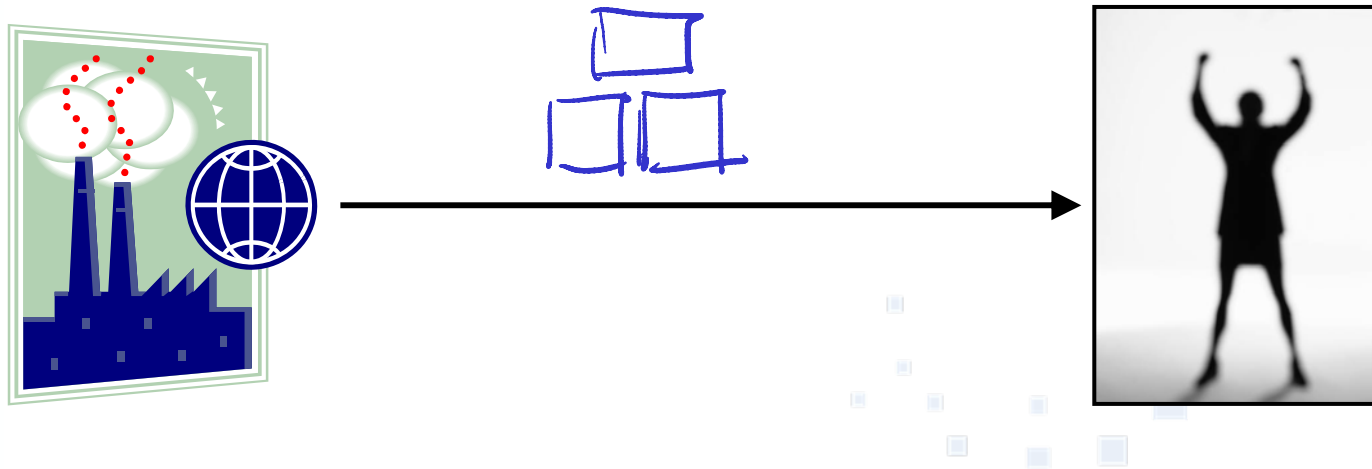
Partie II

- Conception de réseau de service optimisé
- Un problème de transport de Fret en exemple

Deux sujets d'actualité pour conclure

- Dimension environnementale du transport
- Dernier KM et la logistique urbaine

- Produit (nature, volume, poids, valeur)
- Origine-Destination
- Qualité de service (Fréquence, délai, fenêtre de temps, etc.)



- Routier (citerne, plateau, semi...), vélos
- Ferroviaire, tram
- Maritime, fluvial
- Aérien
- Pipeline



Evolution de la part modale en t/km pour le trafic intérieur (France)

	Route	Rail	Fluvial	Total
1860	37,5	37,5	25	100
1900	14,7	65,7	19,6	100
1920	10,8	72,4	16,8	100
1940	23,5	64,0	11,6	100
1960	34,5	58,5	6,9	100
1980	51,1	43,5	5,3	100
2000	69,6	27,4	3	100
2004	80	12	2	94

	Intra-UE	Extra-UE
Mer	30,7 %	70,8 %
Route	40,9 %	7,9 %
Rail	4,7 %	4,2 %
Fluvial	12,5 %	2,9 %
Pipeline	8,1 %	10,9 %
Air	0,3 %	0,3 %
Autre	2,9 %	3,0 %
Total	100 %	100 %

	Intra-UE	Extra-UE
Mer	22,8 %	41,4 %
Route	57,8 %	22,6 %
Rail	3,9 %	2,2 %
Fluvial	0,9 %	0,8 %
Pipeline	0,8 %	1,4 %
Air	3,9 %	24,1 %
Autre	10,0 %	7,6 %
Total	100 %	100 %

	Route	Rail	Fluvial
1998	73,6	19,7	6,7
2002	76,1	17,6	6,3
2006	77	17,5	5,5

- Routier : nette dominance pour sa flexibilité et adaptabilité, moins de rupture de charge que les autres modes.
- Ferroviaire : saturation sur les sillons les plus pertinents.
- Maritime : pour les pondéreux et les longues distances, mais saturation et défaillances des ports.
- Fluvial : un mode réservé aux pondéreux de faible rotation.
- Aérien : un coût qui reste élevé et saturation des aéroports.

- Routier : + 1,8% / an (vs + 3,5%)
 - Rail : + 1,2 % / an (vs -1,2%)
 - Fluvial : + 0,5 % / an (vs -2%)
 - Aérien : +1,7% / an (vs + 4,4%)
-
- Et une hausse de 50% de la demande de transport à l'horizon 2030

Les acteurs économiques

- Fournisseur=expéditeur / Client=destinataire

Qui transporte ?

- Moi=Compte propre / Prestataire=Compte d'autrui
- Existence d'une cascade de prestataires

Leurs objectifs: coûts, délais, qualité de service.

Leur décision: mise en place d'un réseau logistique de transport (de services).

Les acteurs politiques

L'Etat, les conseils régionaux, les conseils généraux, les mairies, les collectivités... et les individus.

Leurs objectifs: aménagement du territoire et des villes, création d'emplois, améliorer l'environnement, etc.

Leurs décisions: infrastructures du réseau physique de transport, la localisation des centres économiques et la régulation des flux de véhicules.

Acteurs Niv. décision	Economiques	Politiques
Stratégique	<i>Localisation</i> des usines, plateformes logistique et magasins	<i>Localisation</i> des centres économiques. <i>Conception du réseau</i> physique de transport.
Tactique	<i>Conception du réseaux</i> logistique de transport (flux de marchandises et de véhicules)	Aménagement du mobilier urbain pour le fret
Opérationnel	<i>Plannings et tournées</i> de véhicules et des personnels	<i>Régulation des flux</i> des véhicules (itinéraires, horaires)

- Une forte présence de l'Etat comme législateur et comme opérateur.
- Un grand nombre de toutes petites entreprises... et une concentration du secteur
→ dualisme du marché.
- Une surcapacité endémique du secteur.
- Une forte segmentation de l'offre.

Groupe SNCF	27
Groupe La Poste	23
Intégrateurs (UPS, Fedex, etc.)	10
Danzas	5
Mory	5
Gefco (PSA)	5
Dubois	5
Divers	20
Total	100

Répartition des effectifs salariés et non salariés par classe de taille dans le TRM en 2000

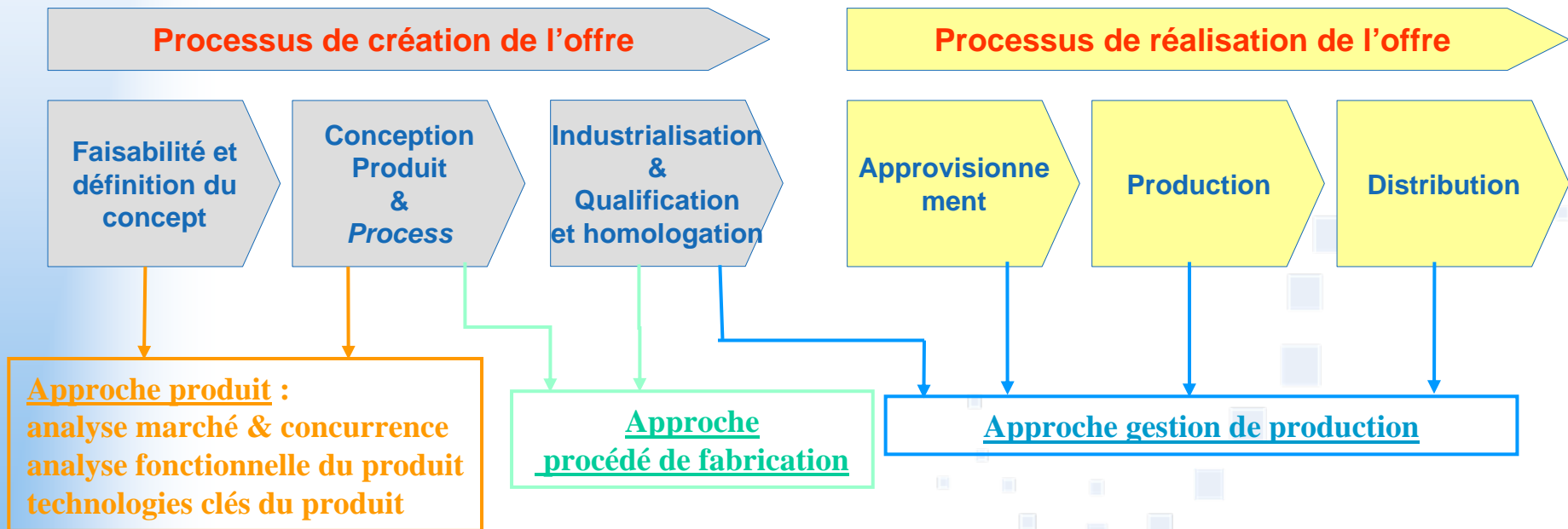
	0 à 5 salariés	6 salariés+	Total
Nb. d'entreprises	34 040	8 826	42 866
Effectif non salarié	25 617	2 403	28 020
Effectif salarié	40 295	243 726	284 021
Pologne (nb. ent.)	86 169	3 560	89 729
R. Tchèque (nb. ent)	21 392	2 311	23 703

- 50% des entreprises du TRM sont encore unipersonnelles.
- Potentiel de création d'entreprises et d'emplois.
- Mais aussi très concurrentiel.

Enjeux de la logistique de transport

Sa place dans une chaîne logistique

Au-delà de la gestion du transport, cette logistique inclut l'entreposage, la manutention, l'emballage, le conditionnement des produits et les fonctions support affectées à ces activités (personnel, matériel, locaux, etc.), voire la logistique des retours.



- Lié à des changements économiques structurels
 - Un **système de production en flux tendus, massifs et diversifiés.**
 - Le **développement de la grande distribution.**
- Marqué par le développement de sites logistiques pour la massification des flux.
- Impact à double effet sur le transport routier de fret (*distances et quantités*)
- Externalisation, surtout de l'activité transport.
- Des chaînes de plus en plus intégrées et complexes grâce aux systèmes d'information.

Des coûts à hauteur de 10% du CA des entreprises, mais de grandes disparités (*taille d'entreprise, degré d'intégration, organisation, secteur d'activité, type de produits*)

Répartition moyenne des composantes du coût logistique global en %

Transport approvisionnement	25
Transport distribution	25
Entreposage matières premières	5
Logistique interne amont	7
Entreposage en cours de production	5
Logistique interne aval	10
Entreposage produits finis	9
Frais financiers stocks	8
Traitement administratifs	6

Coût logistique global par secteur d'activité *en % du CA net*

Automobile et aéronautique	6,6
Grande distribution et commerce	8,2
Agro-alimentaire	8,7
BTP	9,3
Produits de grande consommation (fabrication)	11,6
Pharmacie, chimie et cosmétologie	14,6
Autres	10,5

Source Aslog – Enquête 2005-2006

Place croissante dans l'économie nationale

- Poids économique
 - 1,5 million pers. (800000 emplois logistiques, 700000 en transport de marchandise) (env. 4,5% de la pop. active 2006)
 - 149 milliards € de production de la branche « transport », soit 4,5% de la production totale
 - Le transport représente 10% à 15% du prix de vente final des produits et des services
- Impact sur l'aménagement du territoire
 - Concentration géographique en zone logistique
 - Massification des flux sur certains axes, en particulier autour des grandes aires métropolitaines
 - Interdépendance avec l'infrastructure et le fonctionnement du système de transport

Hausse des coûts logistiques tirée par le transport

- De 8% à 10% du CA net entre 2002 et 2006.
- Explicable par :
 - La **mondialisation des marchés** allongeant les chemins logistiques
 - Les **délocalisations industrielles** réduisant les prix de revient industriels
 - **L'augmentation du prix des carburants** du transport
- Exemples: pot de yaourt 9115km, jean (1,5xtour de la Terre) et plateau repas japonais (4 foisxtour de la Terre).

Elle permet la création de valeur pour les entreprises en associant la qualité du transport (soin, respects des délais, time-to-market réduit) dans la qualité du produit.

Exemple de Zara :

- 64 pays, 100 magasins en France.
- Réussite économique liée à l'intégration et réactivité de sa chaîne logistique.
- Renouvellement des articles en magasins tous les 15 jours (moy. du marché = 2 mois).
- Du siège social en Espagne, les articles sont expédiés en 48h. Les invendus retournent au siège pour un nouveau pays.
- Doublement du CA du groupe en 4 ans, dans un contexte concurrentiel et sans délocalisation.

Changements induits par la logistique

- Les caractéristiques de la demande de transport
- L'évolution de la répartition modale vers le routier

Une volonté de réduire les coûts de stockage

- Directs: possession, exploitation, immobilisation de capital, dévalorisation du stock (obsolescence, usure).
- Indirects: rigidité introduite par les stocks face aux besoins d'adaptation (stocks amonts sur le système de production) et assurance contre les défauts de production (stocks aval; nécessité pour le « zéro défaut »).

Arbitrage coûts de stockage-coûts de transport

- Concerne les stocks amont, tampons, aval : Stock centralisé plutôt que réseau de stocks pour un même taux de service.
- Sans conséquence sur le volume de demande de transport, mais...
- ...Modifie les caractéristiques de la demande (taille réduite des envois, fréquence accrue de livraisons, exigence de vitesse majorée, respect des délais et de la marchandise, flexibilité)

Economies d'échelle et coûts de stockage

- Parmi les déterminants de la taille optimale des entrepôts:
- Baisse du coût unitaire de l'activité d'entreposage:
 - Coûts fixes et coûts unitaires décroissants
 - Maintien du taux de service en réduisant le stock , mais en le centralisant

Economies d'échelle et coûts de transport

- Parmi les déterminants de la taille optimale des chargements :
- Baisse des coûts de transport avec la hausse du volume
 - en passant à un autre mode de transport ou à des véhicules plus adaptés aux forts tonnages (avec effet de seuil et loi de rendements décroissants)
 - ⇒ Massification des flux

Au total: l'arbitrage coûts de stockage vs. coûts de transport conduit à

- réduction du nombre d'entrepôts et accroissement de leur taille
- augmentation des distances de transport
- avec les coûts de transport actuels, le gain sur l'entreposage est en partie compensé par l'augmentation des coûts de transport

Un phénomène de concentration à deux échelles: dans l'entreprise et au niveau régional

- regroupement des entrepôts en zones logistiques plus grandes et moins nombreuses
- dont les facteurs sont:
 - accessibilité aux infrastructures,
 - disponibilité des terrains,
 - disponibilité de la main-d'œuvre, etc.

Leader de la livraison à domicile de produits surgelés

- 1er semestre 2008:
1 million de clients;
3,6 millions de commandes,
panier moyen 45,8€HT;
CA/client 158€;
part de marché 36%
- 1000 références cataloguées,
- *livrables en 72h*
- 34 agences de télévente, 950 télévendeurs

4 plateformes logistiques



4 plate-formes, chacune en 2 parties:

- réception des produits fournisseurs / palette ; stock
- préparation des commandes
- Le nombre de palettes > à la sortie mais autant de camions !

4 plate-formes, source d'économie:

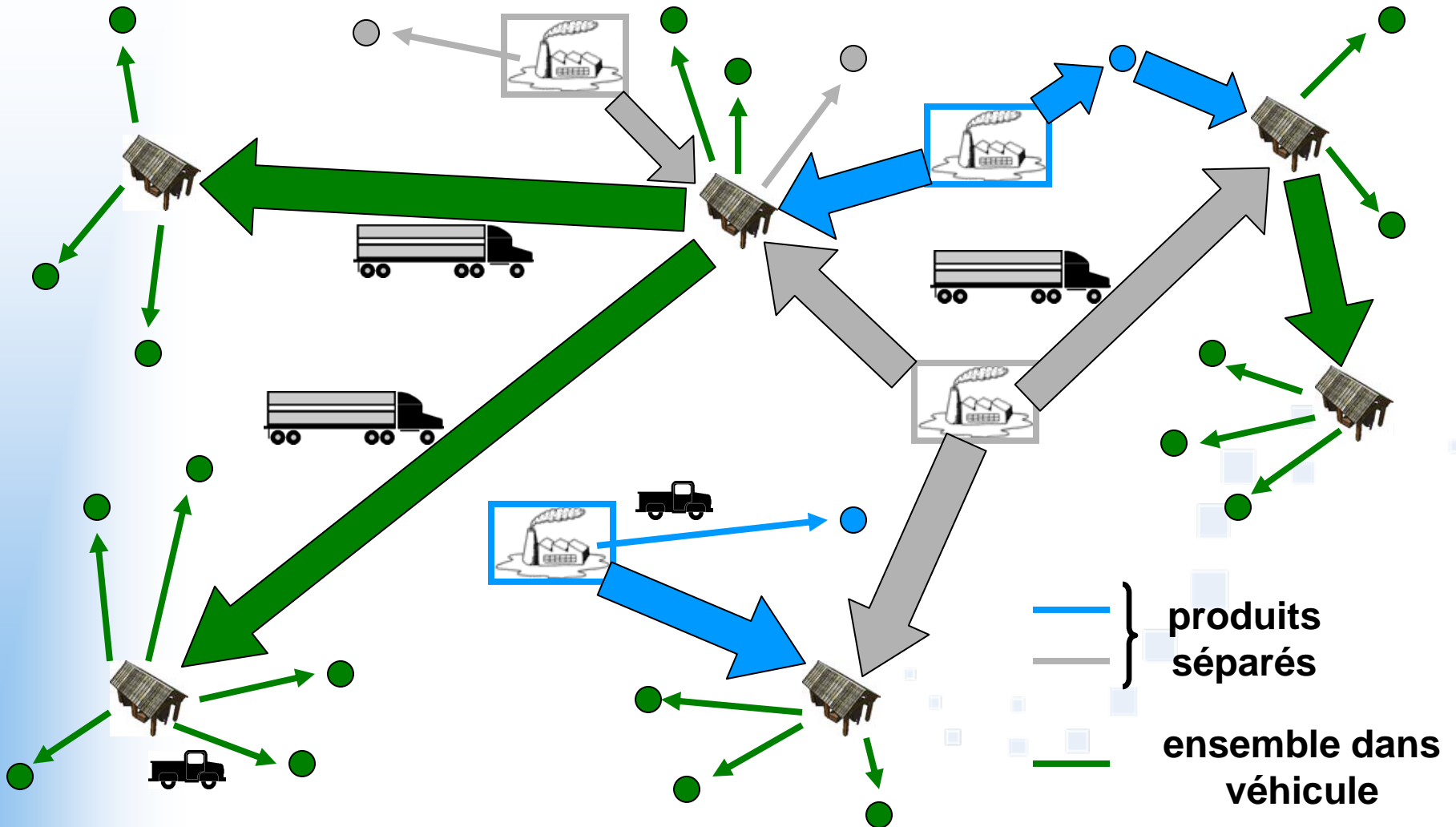
- économie d'échelle (organisationnelle par spécialisation)
- pouvoir de négociation (fournisseurs)

Flux tendus et roulement de trésorerie

Organisation optimale des tournées à partir des 130 agences de livraisons

- 1100 livreurs (6 à 25 /agence), 50 à 100 km autour de l'agence

Une structure de réseau de service avec consolidation [Fournier 2008]



- Conception de réseau de service optimisé
- Un problème de transport de Fret en exemple

Avec un regard d'aide à la décision et l'évaluation des performances.



Rationaliser les politiques et les systèmes de transport

- **Niveau stratégique:** Conception du réseau physique (investissements lourds à long terme).
- **Niveau tactique:** Conception du **réseau de services** (à moyen terme)
- **Niveau opérationnel:** Engagement et gestion des ressources (court terme: dépendant du temps de service)

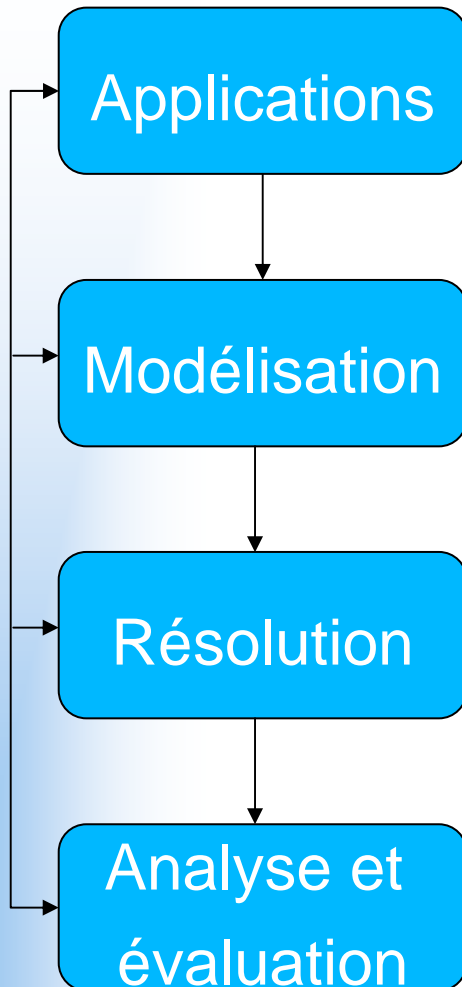
- **3 visions**

- l'**autorité de régulation** (règles législatives, politique générale, investissements lourds)
- les **transporteurs** (itinéraires sur un réseau physique, arrêts, équipements, fréquences et horaires)
- les **clients** (point à point, offre de service, fréquences et horaires, tarif)

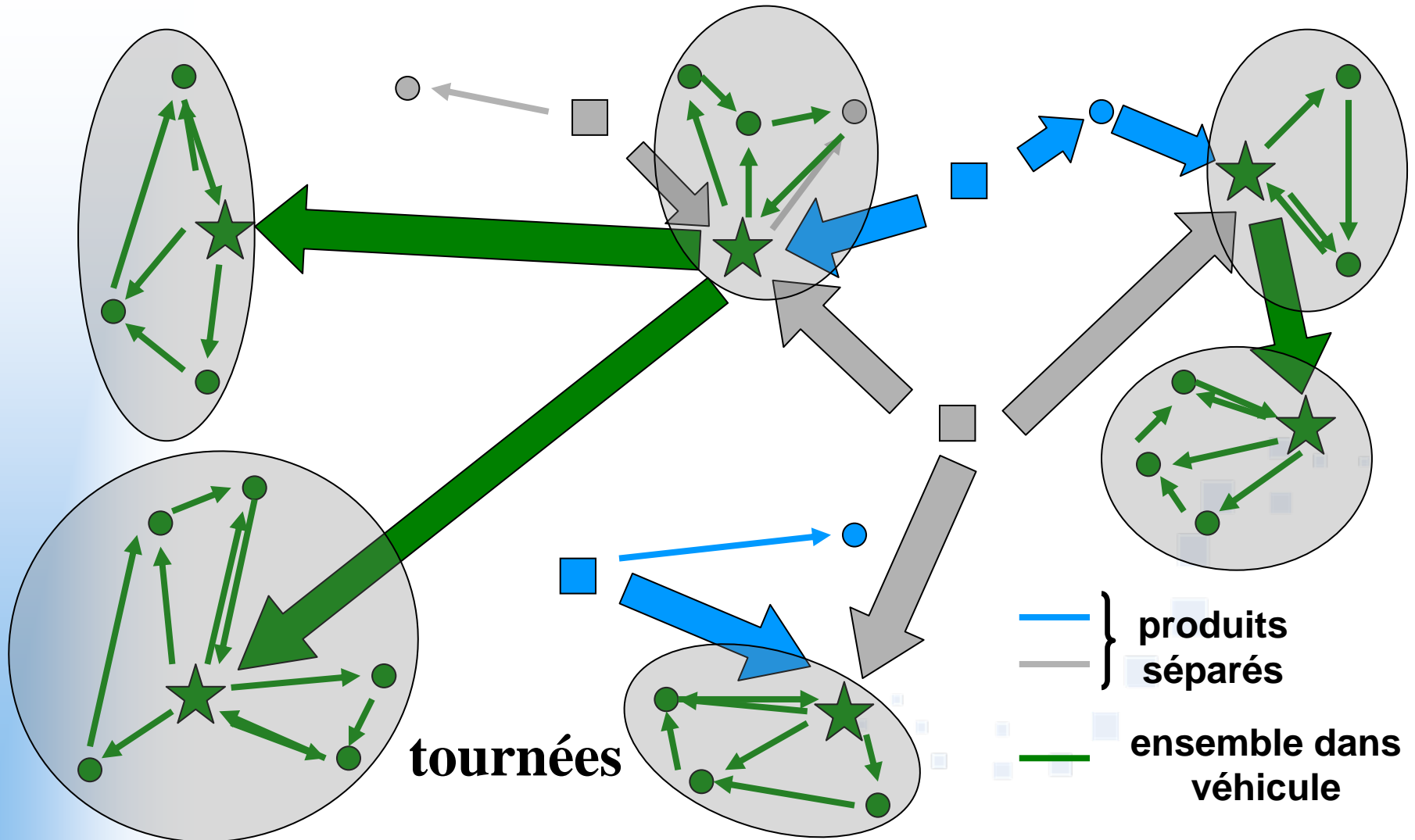
- **2 types de service**

- **personnalisé**/« taxi » → gestion de flotte, pas de planification de réseau de service.
- **avec consolidation**: groupage/dégroupage, services réguliers
 - ++ économie d'échelle pour le transporteur et les clients
 - moins de flexibilité et fiabilité pour les clients, opérations supp. pour le transporteur aux plateformes de consolidation (hubs)
 - Planification pour optimiser les opérations supplémentaires et offrir un bon niveau de qualité de service.

- **Demands**
 - Produit, quantité, niveau de priorité
 - Origine, destination
 - Qualité de service, opérations aux hubs
- **Décisions: choix des itinéraires et des services**
 - Routage des demandes/flots de marchandises (itinéraires, volumes, etc)
 - Sélection de services (coûts fixes et variables, capacités, types de véhicule, opérations aux hubs, qualité de service, etc.)
 - Interactions entre ces décisions
- **Objectifs: optimiser les coûts et la qualité de service**



- Transport, production, stocks, personnels, conception, etc. dans les domaines comme le manufacturier, l'énergie, l'informatique, l'hospitalier, la nanotechnologie, etc.)
- Programmes mathématiques (linéaires ou non)
- Théorie des graphes, objets combinatoires
- Systèmes à événements discrets (Rx Petri, Files d'attentes)
- Analyse de complexité du problème et des algorithmes
- Méthodes exactes/approchées (cf. acétate 16)
- Tests, benchmarking par rapport aux instances connues de la littérature
- Simulations, analyse en moyenne et en distribution
- Tests sur le terrain



- Objectifs différents
 - Flots de marchandises
 - Modèles en conception de réseaux (MND)
 - Flots de véhicules
 - Modèles en tournées de véhicules (VRP)
 - Planification des véhicules
 - Horaires
 - Fréquences de passage
- Programmes mathématiques (MIP)

OPTIMISER

FONCTION OBJECTIF

SOUS CONTRAINTES

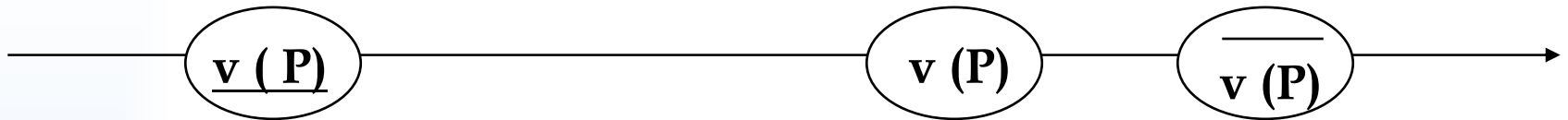
**FLOTS DE
MARCHANDISES**

**FLOTS DE
VÉHICULES**

CONTRAINTES LIANTES

**CONTRAINTES
SPÉCIFIQUES**

[Intervalle de recherche]



Méthodes exactes

- **Relaxations** (linéaire, combinatoire, lagrangienne, SemieDéfinie Positive)
- **Énumération implicite** (Branch-and-X, Programmation Dynamique, A*, D&C)
- Solveurs (CPLEX, XPRESS-MP, etc.)
- Programmation par contraintes (PPC)

++ Optimalité des solutions

-- Complexité algorithmique exponentielle

Méthodes approchées

- **Heuristiques spécifiques** (Epsilon-approximation)
- **Métaheuristiques (SA, TS, GA)**
- PPC

++ Complexité algorithmique rapide, problèmes industriels

-- Sans garantie sur la qualité des solutions trouvées

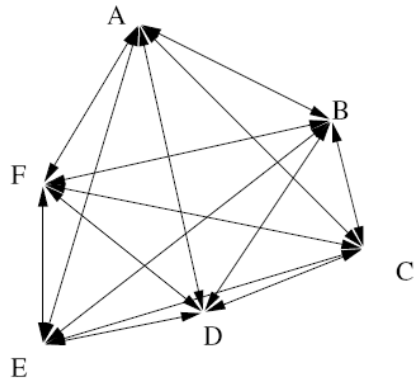
Parallélisme (sur grilles): +vite/grand/robuste/efficace

- Contexte et problème
- Méthodes de résolution
- Résultats



- Problème posé par un Transporteur
- Transporteur
 - Planification semestrielle: les demandes hebdomadaires sont estimées et constantes sur le semestre, « splittable »
 - Possibilité d'opérations de transbordement, mais collectée et livrée dans la même période
 - Disponibilité d'une flotte hétérogène de véhicules (réduite)
 - Contraintes de maintenance de la flotte, de taille des véhicules, de durée de transport de chaque véhicule (équilibre de charge et d'amortissement)
- Objectifs:
 - Construire une solution opérationnelle maximisant son profit (Revenus – Coûts)
 - Réduire le nombre de déplacements à vide
 - La flotte actuelle est-elle adaptée ?
 - Quelle serait la flotte idéale pour maximiser le profit ?

Graphe $G(V, E) =$ Réseau de transport



Ensemble des demandes K

Quantité	Origine	Destination
	E	F
	F	A
	D	A
	F	E
	C	D
	F	B
	D	C
	A	C
	F	C
	B	C

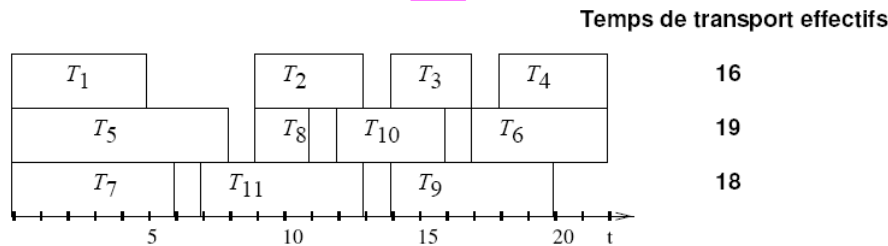
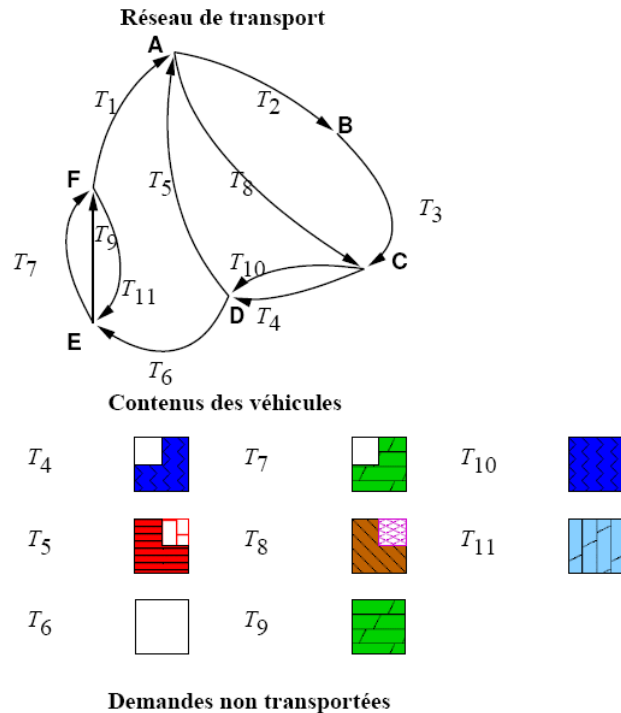
Types de véhicules

Capacité	$quota_{min}^l$	$quota_{max}^l$
----------	-----------------	-----------------

	15	20
--	----	----

	15	20
--	----	----

- Graphe complet de transport
- Demandes origine-destination sur une semaine
- Caractéristiques de la flotte



- Réseau de transport Eulérien
- Demande
 - Insatisfaite, satisfaite partiellement ou totalement
 - Collectée et livrée dans la même période
 - Par plusieurs véhicules (transbordement)
 - Itinéraire de chaque fraction d'une demande
- Plannings des véhicules
 - Itinéraire + horaires
 - Durée de transport bornées {15, 16, ..., 20}
- Rem: $T1+T5 \rightarrow T2+T8$

Sans Transbordement (ST)

CONCEPTION DES RESEAUX DE TRANSPORT

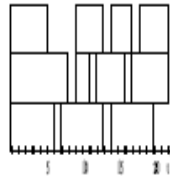
- Problème de flot de coût max
- ou
- Problème de conception de réseaux (MND)



CONSTRUCTION DES CYCLES EULERIENS

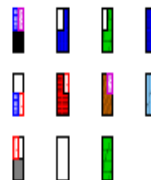
PLANIFICATION DES LIAISONS DE TRANSPORT

- Problème de décision en ordonnancement



OPTIMISATION DU FLOT DE MARCHANDISES

- Problème de flot de coût max



Avec Transbordements (AT)

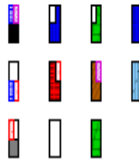
CONCEPTION DES RESEAUX DE TRANSPORT

- Problème de flot de coût max
- ou
- Problème de conception de réseaux (MND)



OPTIMISATION DU FLOT DE MARCHANDISES

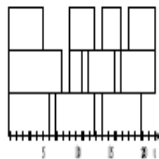
- Problème de multi-flot de coût max



CONSTRUCTION DES CYCLES EULERIENS

PLANIFICATION DES LIAISONS DE TRANSPORT

- Problème de décision en ordonnancement



Problème 1: moins d'une dizaine de clients

- La solution sans transbordement atteint 95% du profit actuel, mais avec un véhicule de moins.
- La méthode avec transbordement a autant de véhicules que la solution actuelle. Les véhicules sont légèrement sous utilisés.

Problème 2: une trentaine de clients

- Nos solutions multiplient le profit de la solution actuelle par 17.
- La méthode sans transbordement permet de réduire la flotte de 5 véhicules et les véhicules utilisés à plus de 90% du temps contre 75% actuellement.

Problème 3: plus d'une centaine de clients

- La méthode sans transbordement fournit une solution qui multiplie le profit actuel par 1,4.
- La réduction du nombre de véhicules est considérable, il serait divisé d'un facteur 3,6.

- Système de transport complexe (multi-acteurs, multi-objectifs).
- Evolution importante de la logistique de transport avec la mondialisation et le coût du carburant.
- Existence de méthodes d'optimisation et de simulation pour une aide à la décision et l'évaluation de la performance.

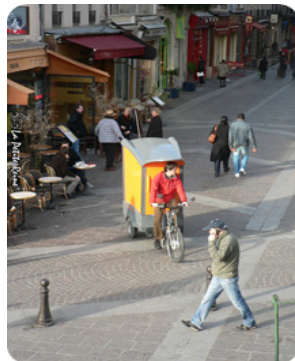
Dimension environnementale du transport

- Comment réduire le mode Routier au profit des autres ?
- Les gaz de serre peuvent-ils être vus comme un coût à travers la taxe carbone ?
- Quid des autres impacts: eau, bruits, etc.



Dernier KM et la logistique urbaine

- Explosion avec l'e-Commerce
- Part du transport amont=5% de la valeur du bien, la part aval en LAD=30%.
- Problèmes politiques (nuisances, zone d'activités) et logistique (zones de décharge, horaires, tournées de livraison en ville, absence des clients)
- Opérateurs collectifs: exemples de La Rochelle et de Monaco.
- Opérateur privé: La Petite Reine (Paris, Dijon, Bordeaux, Genève, Rouen, Londres), City Cargo (Amsterdam).



→ Projet en soumission sur la « **Supply Chain Durable** » dans le Cluster Recherche de la région Rhône-Alpes GOSPI.

- “Le yaourt aux fraises est gourmand en pétrole” [Libération 16 mars 2006, Wuppertal et Certu].
- G. Blauwens, P. De Baere & E. van de Voorde, “Transport Economics (3rd Ed.)”, 2008.
- D. Hensher & D. Button, “Hanbook of transport modelling”, 2006.
- Ortuzar J.D. and Willumsen L.G. « Modelling Transport ».
- A. Fremont “ Les transports en France”, La Documentation Française, 2008.
- E. Quinet, “Principes d’Economie des Transports”, 1998.
- Notes de synthèse du SESP N°168, « Transport et Logistique Durables », 2008.

- Nicolas Teypaz. « Contribution à la résolution de problèmes de transport en commun et de fret: modélisations et algorithmes ». *Thèse de Doctorat Grenoble-INP*. Février 2008.
- Sylvain Fournier. « Mathematical tools for difficult Vehicle Routing Problems ». *Thèse de Doctorat Grenoble-INP*. Octobre 2008.
- « Optimisation combinatoire 3: applications ». Ed. Vangelis Th. Paschos. *Hermes*. 2006.
 - T.G. Crainic & F. Semet. « Chapitre 2. Recherche Opérationnelle et transport de marchandises ».
 - T.G. Crainic & M. Florian. « Chapitre 3. Modèles d'optimisation pour la planification des systèmes de transport ».
 - V.-D. Cung, B. Le cun & C. Roucairol. « Chapitre 6. Optimisation combinatoire parallèle ».
 - A. Quillot. « Chapitres 9 & 10 : Les problèmes de synthèse de réseaux: fondements et méthodes, modèles et applications ».

- T.L. Magnanti & R.T. Wong. « Network design and transportation planning : Models and algorithms ». *Transportation Science*, 18(1):1–55, 1986.
- R.K. Ahuja, T.L. Magnanti & J.B. Orlin. « Network flows: Theory, Algorithms, and Applications ». Prentice Hall, 1993.
- M.S. Bazaraa, J.J. Jarvis & H.D. Sherali. « Linear Programming and Network Flows. 3rd Edition ». *Wiley*, 2005.
- G. Laporte, M. Gendreau, J.-Y. Potvin & F. Semet. « Classical and Modern Heuristics for the vehicle routing problem ». *International Transaction in Operational Research*, vol. 7, pp. 285-300, 2000.
- Y. Collette & P. Siarry. « Optimisation multiobjectif ». *Eyrolles*, 2002.