



MINES PARISTECH

***Identification et tests de principes de mutualisation  
logistique dans la « supply chain » de la grande  
consommation pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>***

*Présentateur: Shenle Pan*

*Directeurs de thèse: Pr. Eric Ballot et Dr. Frédéric Fontane*

Centre de Gestion Scientifique  
Centre de CAO-Robotique  
Mines ParisTech



*Séminaire IDDRI-R2DS  
26 Mai 2010  
Science Po, Paris*



# Agenda

## 1. Introduction

- Le développement du transport des marchandises
- La problématique du développement durable
- Une nouvelle organisation logistique : la mutualisation

## 2. Critères d'évaluation du concept

- Environnemental : modélisation des émissions de CO<sub>2</sub> du transport
- Economique : modélisation des coûts logistiques

## 3. Deux études de cas dans la chaîne logistique de la grande distribution

- Mutualisation entre des fournisseurs à forts volumes
- Mutualisation entre des fournisseurs à petits volumes

## 4. Conclusions et perspectives

# Contexte : le développement du transport des marchandises

- **La croissance dépend de plus en plus de la logistique et du transport**
  - Une augmentation des échanges nationaux et internationaux
  - Une spécialisation des usines
  - Une tension des flux : le Juste-à-Temps
- **Croissance de la logistique – élasticité au PIB de 1,76 entre 1985 et 1999 (PREDIT 2008)**
- **La part du transport de marchandises par route est en forte croissance**
  - Croissance des flux mais faible report modal

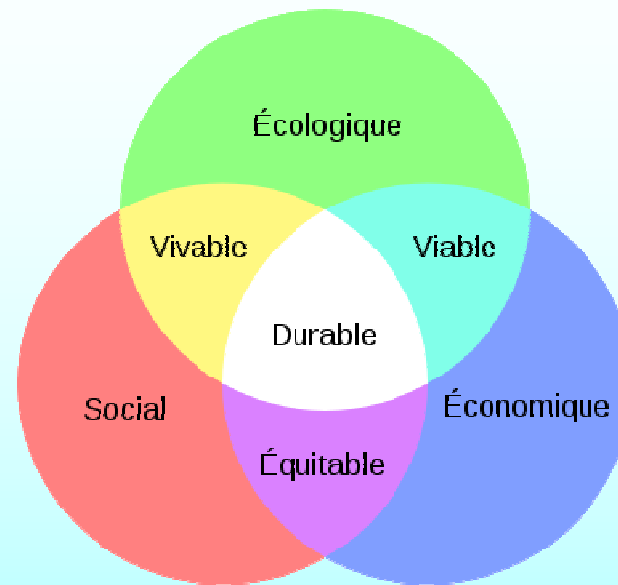
Transport intérieur (gt.km)	2002	2025
Transport routier	257	[343,382]
Transport ferroviaire	50	[48,71]
<b>Total</b>	<b>314</b>	<b>[419,442]</b>

(MEEDDAT 08)

## Contexte : le développement du transport des marchandises

- **Le camion a des atouts considérables dans l'organisation actuelle**
  - Faibles volumes
  - Peu de rupture de charge
  - Accès au client final
  - Coût
- **Mais aussi des inconvénients**
  - Congestion des infrastructures
  - Accès urbain
  - Bruit
  - **Le transport : principale source d'émissions de CO<sub>2</sub> en France**
    - **35% des émissions — voyageurs et marchandises (*Boissieu 07*)**
- **Le transport de marchandises par route est compétitif et flexible mais est fortement polluant !**

# Contexte : les enjeux liés au développement durable

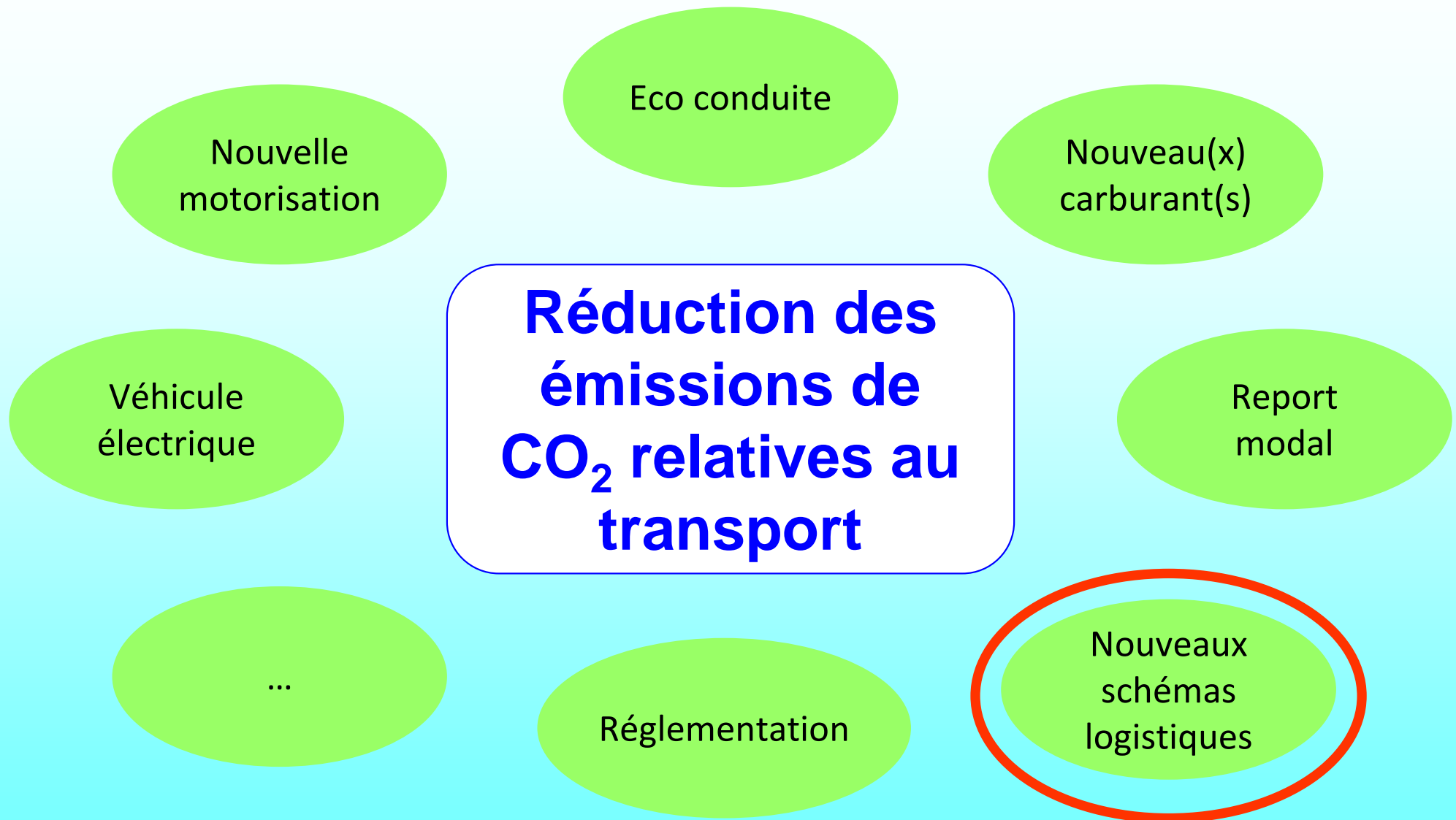


**Objectifs au niveau  
des émissions de  
GES (CO<sub>2</sub>)**

- Protocole de Kyoto : -20% à 2020 par rapport au niveau de 1990
- **Facteur 4 : -75% d'ici à 2050**

**Comment réduire les émissions de CO<sub>2</sub>  
liées au transport de marchandises ?**

# Contexte : les solutions contre les émissions liées au transport



# Une réponse possible mais limitée par la pratique : la consolidation de commandes

## La consolidation :

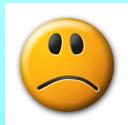
consiste à réunir plusieurs chargements en une expédition unique afin de réaliser des économies d'échelle sur le coût de transport

[Campbell, Laporte, Crainic, Daganzo, Hall, ...]

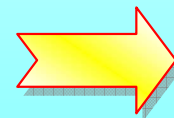
Mais cette démarche est limitée par des contraintes antagonistes et offre des résultats mitigés :

- Taux remplissage : 60% surface sol
- Taux km à vide : 25% des km parcourus
- Temps en route: 28% (dont environ 20% en chargement)

(McKinnon, 2003)



**Opérationnelle**  
**Opportuniste**  
**Fragmentaire**



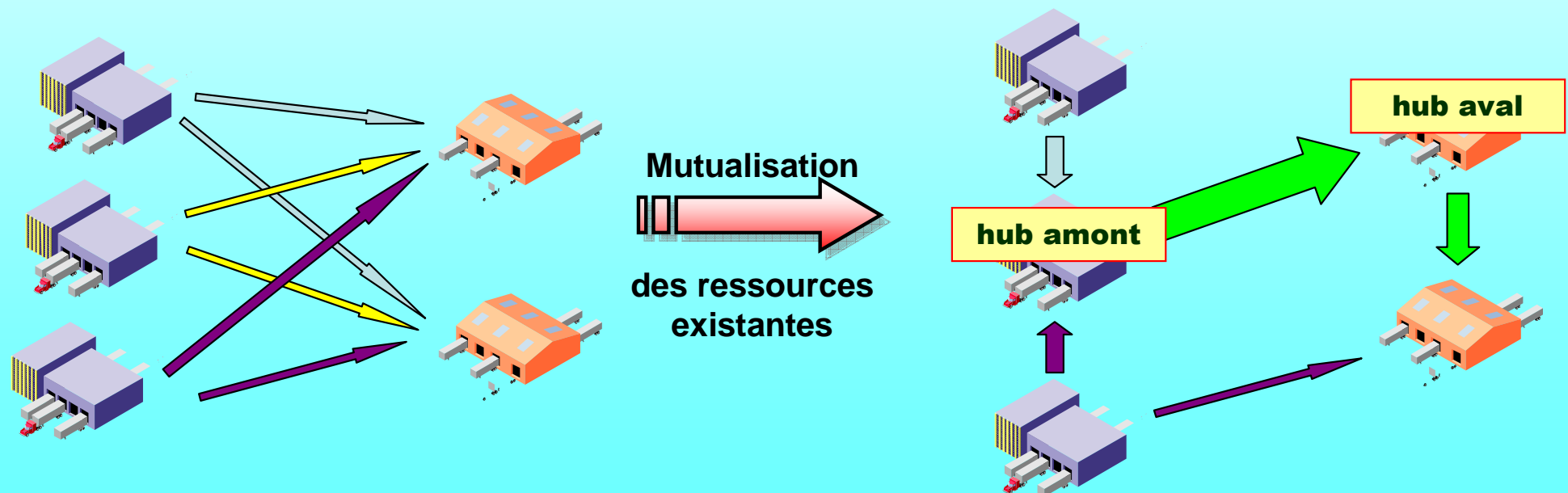
**À la recherche  
d'une nouvelle  
organisation  
logistique :**

**+ performante**  
**+ « verte »**

## La mutualisation des ressources logistiques

# La mutualisation logistique

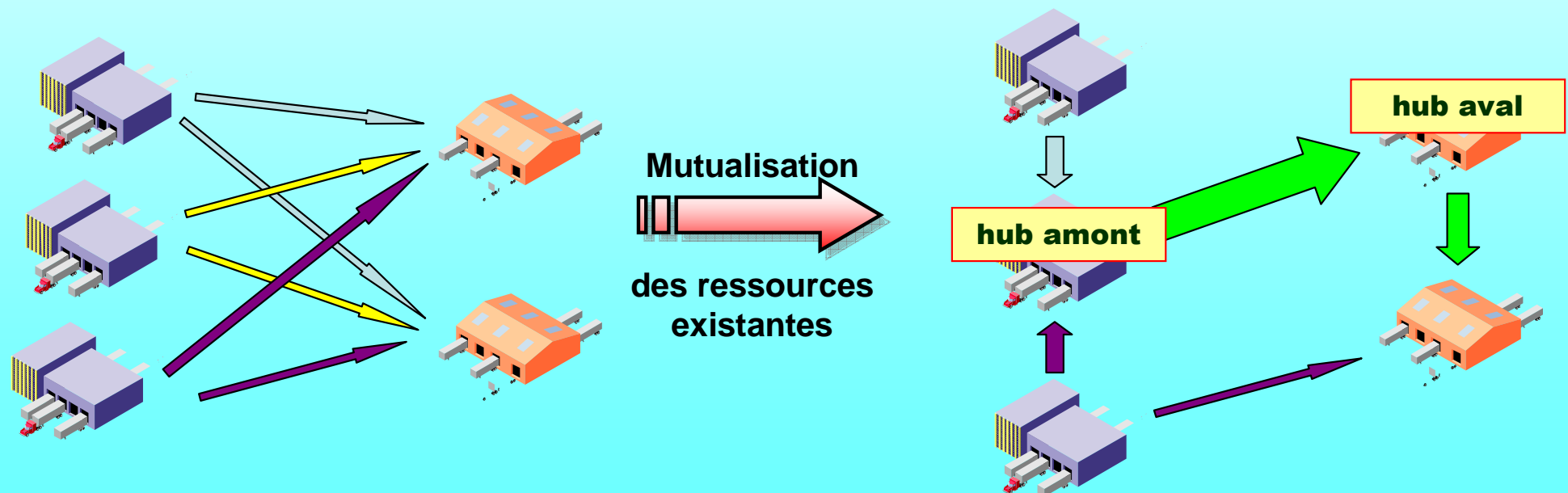
- Définition de la mutualisation en logistique
  - Partage de moyens et d'informations logistiques entre plusieurs donneurs d'ordres
  - Conception et exploitation coordonnées de schémas logistiques par plusieurs acteurs
- Illustration :



# Les différents niveaux de mutualisation

## Les principes de mise en œuvre :

- 1) mutualisation des entrepôts fournisseurs par famille produit (*ex: Liquides, Epicerie...*)
- 2) mutualisation des entrepôts fournisseurs par proximité géographique des expéditions
- 3) mutualisation des plateformes distributeurs par proximité géographique des livraisons
- 4) mutualisation des moyens de transport
- 5) mutualisation des schémas logistiques



Quels sont les critères pour évaluer la performance de schémas logistiques mutualisés ?

## Les ambitions de la mutualisation

- ➔ Améliorer l'efficacité de transport : **augmenter le taux d'utilisation des moyens de transport**
- ➔ Réduire l'empreinte environnementale : **réduire les émissions de CO<sub>2</sub> liées au transport**

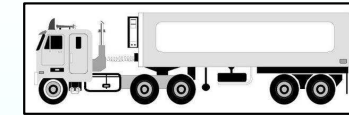
## Deux critères

### Environnement :

**Les émissions de CO<sub>2</sub>**

### Economie:

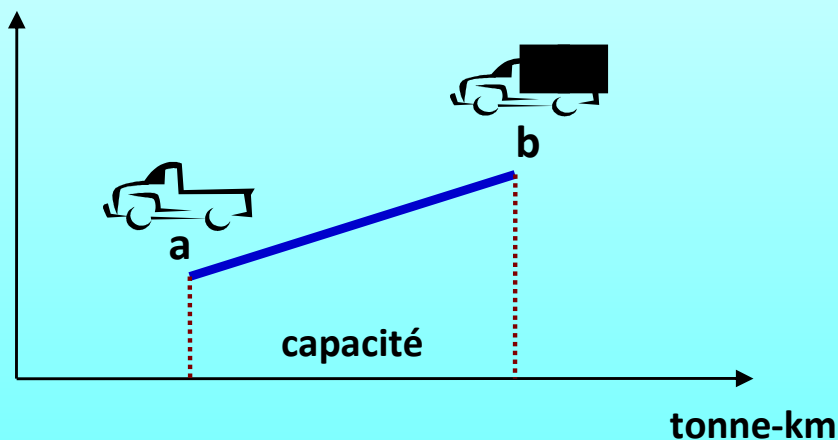
**Les coûts logistiques**

Critère environnemental : émissions de CO<sub>2</sub> du transportCalcul des émissions de CO<sub>2</sub> du transport routier

## Références:

- « COST 319: Methods of estimation of atmospheric emissions from transport » (Joumard, 1999)
- « Projet MEET: Methodology for calculating transport emissions and energy consumption » (Hickman et al., 1999)

**Méthodologie : paramétrer les émissions de polluant selon la consommation d'énergie de différentes motorisations**

émissions de CO<sub>2</sub>Principales hypothèses:

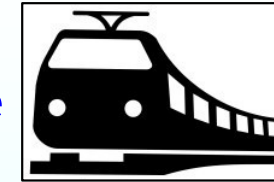
- ↪ camion semi-remorque (maxi charge 25 tonnes)
- ↪ vitesse moyenne 80 km/h
- ↪ pente de la route est négligée

Capacité = 33 pal/camion  
pente = 0.00982 kg / pal - km

émissions de CO<sub>2</sub> de camion

$$\varepsilon_{vide} = 0.772 \text{ kg / km}$$

$$\varepsilon_{pleine} = 1.096 \text{ kg / km}$$

Critère environnemental : émissions de CO<sub>2</sub> du transportCalcul des émissions de CO<sub>2</sub> du transport ferroviaire**Références:**

- « COST 319: Methods of estimation of atmospheric emissions from transport » (Joumard, 1999)
- « Projet MEET: Methodology for calculating transport emissions and energy consumption » (Hickman et al., 1999)
- « Projet MEET: Estimating emissions from railway traffic » (Jorgensen & Sorenson, 1998)
- « Bilan carbone » (ADEME, 2007)

**Emissions = consommation énergétique \* taux d'émission de la production d'énergie**

**Consommation énergétique:**

- ↪ train électrique
- ↪ train minimum de 13 wagons R20 (36 pal/wagon)
- ↪ distance entre arrêts 100 km

**Taux d'émission de la production d'énergie:**

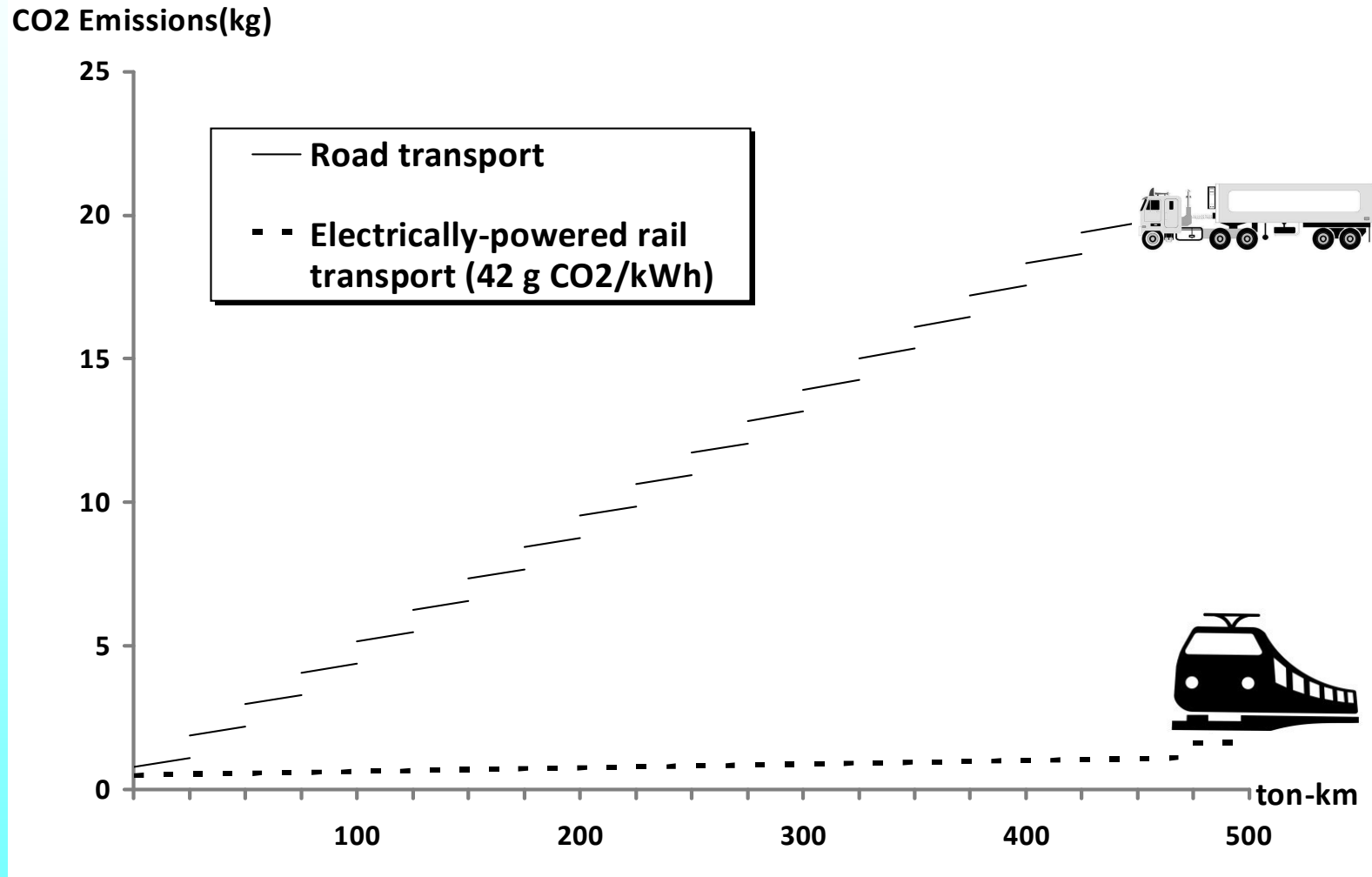
- ↪ électricité nucléaire
- ↪ 42 g CO<sub>2</sub>/kWh en France (ADEME, 2007)

émissions de CO<sub>2</sub> de train électrique (13 wagons)

$$\mathcal{E}_{vide} = 0.498 \text{ kg / km}$$

$$\mathcal{E}_{pleine} = 0.96 \text{ kg / km}$$

Critère environnemental : émissions de CO<sub>2</sub> du transport



### Critère économique : modélisation des coûts logistiques

#### **Coût de transport :**

- transport routier (€/pal-km) : issu d'une analyse des grilles tarifaires réelles communiquées par les partenaires de travail
- transport ferroviaire (€/wagon-km) : issu de la grille tarifaire SNCF 2007

#### **Coût de stockage :**

- temps passé à chaque point de stockage multiplié par le coût d'immobilisation du stock par unité de temps (Daganzo et al., 1984; Blumenfeld et al., 1985; )

#### **Coût de passage des flux par une plateforme :**

- Cross-docking ou stockage (€/palette)

#### **Coût de tournée d'un véhicule:**

- Arrêts de véhicule pour charger/décharger (€/stop)

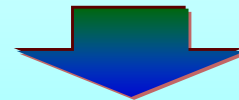
# Méthodologie

**Objectif : minimiser les émissions de CO<sub>2</sub> du transport**

**Par fonction d'émission :**

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_{vide} \cdot \left[ \frac{\text{Charge}}{\text{Capacité}} \right] + (\varepsilon_{pleine} - \varepsilon_{vide}) \cdot \frac{\text{Charge}}{\text{Capacité}}$$

*Nombre de moyens*
*Chargement*



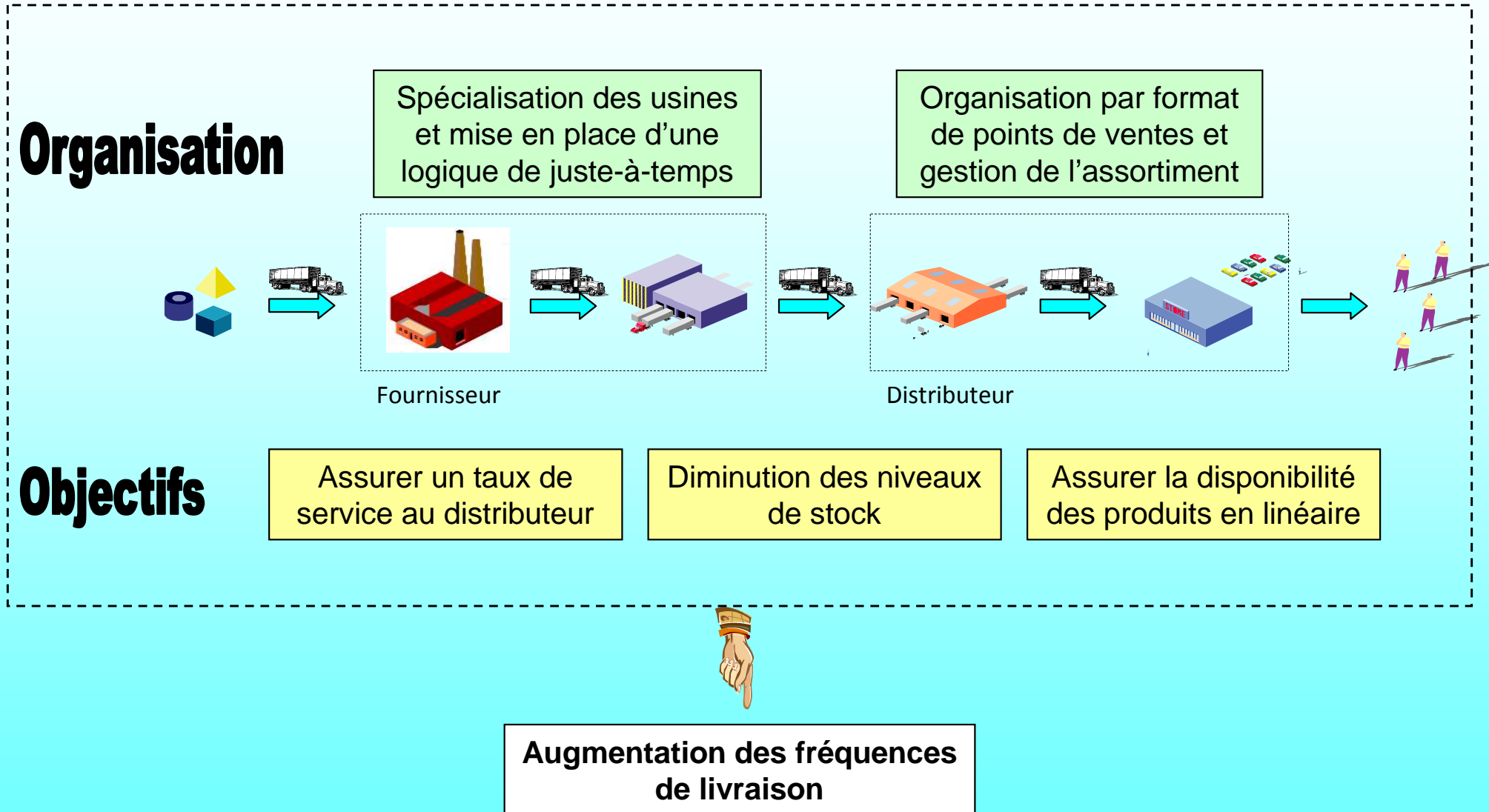
**Définition de schémas logistiques mutualisés**



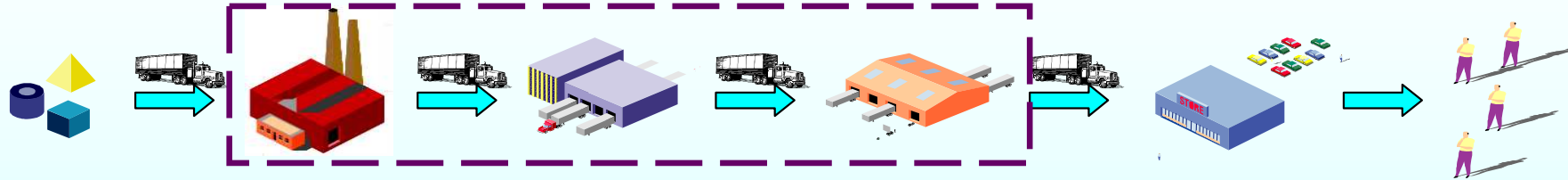
**Évaluer l'impact économique de la solution**

# Application à la chaîne logistique de la grande distribution au travers de deux études de cas

# La chaîne logistique de la grande distribution



## Cas 1 : la mutualisation des fournisseurs à forts volumes



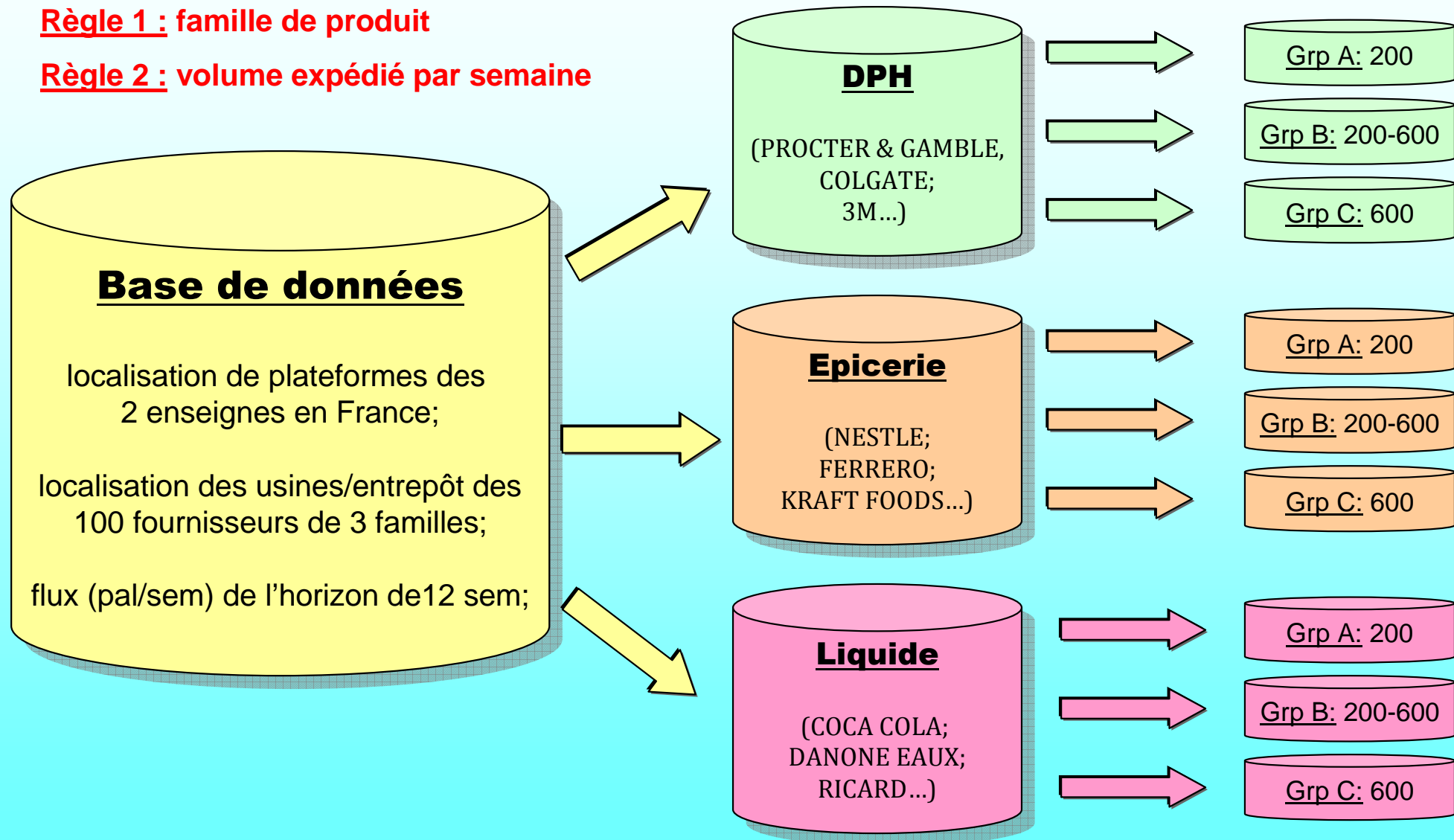
### Périmètre :

- 2 enseignes de la grande distribution française et leurs 100 premiers fournisseurs communs
- Alimentaire hors frais (3 familles: *DPH, Epicerie et Liquide*)
- Flux des usines / entrepôts fournisseurs vers les centres de distribution (PF) des enseignes
  - » Unité: palette/semaine/sous famille produit
  - » Période: 12 semaines

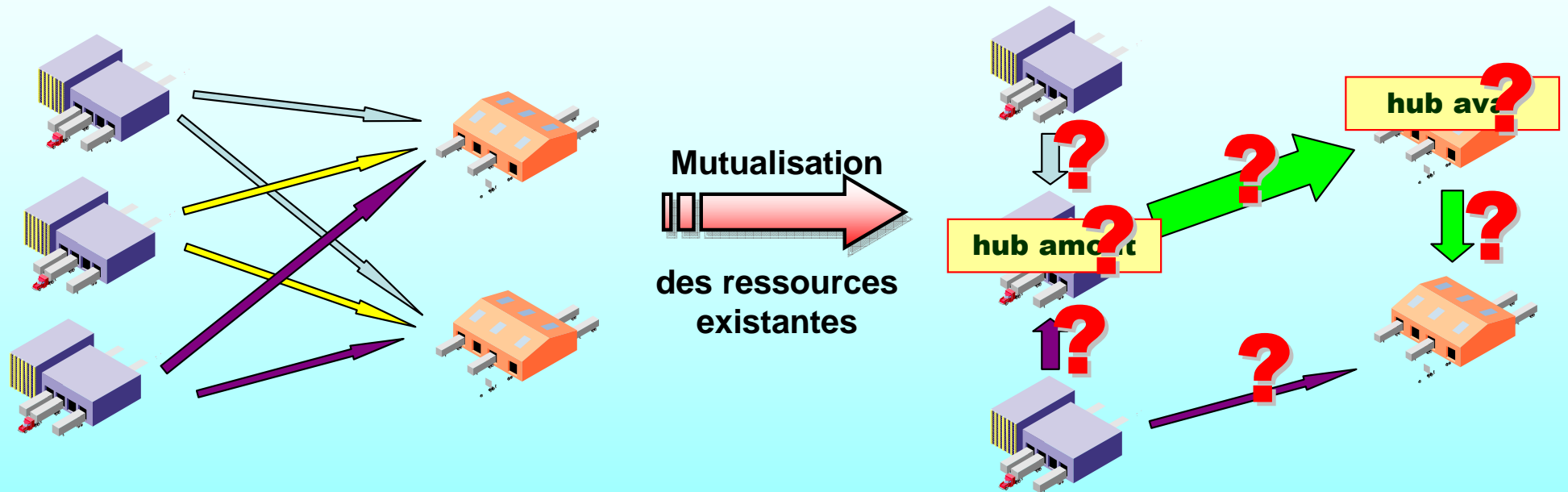


## Cas 1 : la mutualisation des fournisseurs à forts volumes

## Construction de la base de données

Règle 1 : famille de produitRègle 2 : volume expédié par semaine

# Cas 1 : la mutualisation des fournisseurs à forts volumes



## Cas 1 : la mutualisation des fournisseurs à forts volumes

# Modélisation via Recherche Opérationnelle

- a. **Fonction objectif** : minimiser les émissions de CO<sub>2</sub> du transport (par sem)  
(fonction d'émission est linéaire par morceaux (*NP-Difficile*))
- b. **Variables de décision** : les quantités expédiées, les arcs mobilisés et les points de mutualisation ouverts ou non
- c. **Principales contraintes et hypothèses** :
- Pas de réduction du niveau de service (fréquence)
  - Une usine ou un entrepôt livre un hub amont
  - Un centre de distribution est servi par un hub aval
  - Proximité de regroupement amont et aval  $\leq 100$  km
  - Les émissions des infrastructures ne sont pas prises en compte
  - Flux minimal par train  $\geq 468$  pal/sem (volume d'un demi train complet)

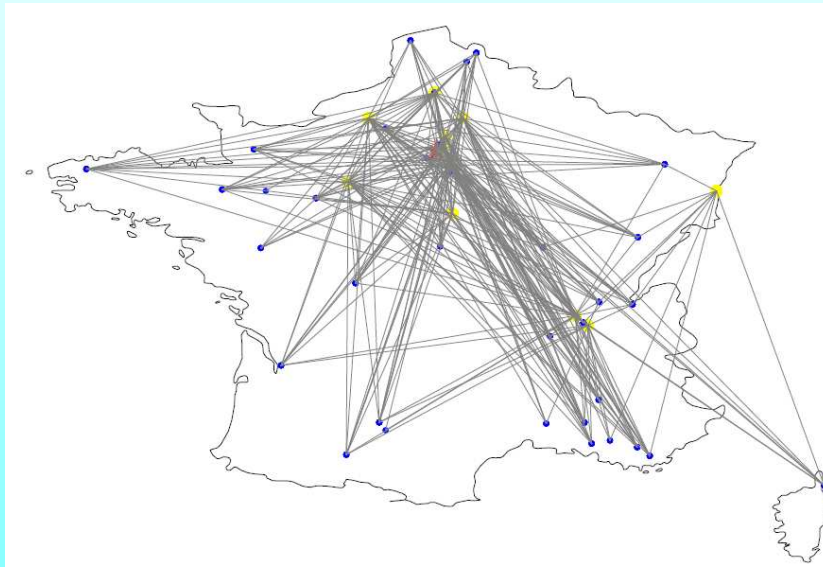
Cas 1 : la mutualisation des fournisseurs à forts volumes

# Résultat d'optimisation (camion uniquement)

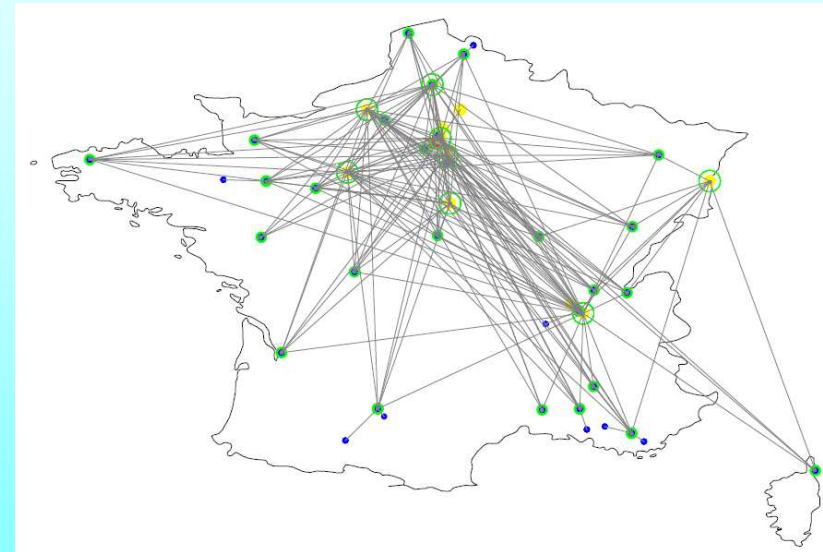
Mutualisation des schémas logistiques

le cas des DPH à forts volumes (grp. C)

*Flux de référence*



*Flux mutualisés*



**Les fréquences de livraisons sont égales ou améliorées**

## Cas 1 : la mutualisation des fournisseurs à forts volumes

**Résultat d'optimisation (camion uniquement)**

Enjeux : environnement le cas de la famille DPH

- Des gains environnementaux significatifs en t CO<sub>2</sub>/semaine

Classe		DPH			
Groupe		A	B	C	Σ
Emissions actuelles		51	93	319	463
Emissions / mutualisation		28	62	290	380
Diminution	Absolue	23	31	29	83
	Relative	45%	33%	9%	18%
Emissions minimales		11	45	266	322
Diminution	Absolue	40	48	53	141
	Relative	78%	52%	17%	30%

## Cas 1 : la mutualisation des fournisseurs à forts volumes

**Résultat d'optimisation (camion uniquement)**

- Des gains environnementaux significatifs en t CO<sub>2</sub>/semaine pour toutes les familles

Classe		DPH				EP				LIQ			
Groupe		A	B	C	Σ	A	B	C	Σ	A	B	C	Σ
Emissions actuelles		51	93	319	463	132	309	670	1111	183	291	1257	1731
Emissions / mutualisation		28	62	290	380	67	219	628	916	93	255	1193	1541
Diminution	Absolue	23	31	29	83	65	90	42	195	90	36	64	190
	Relative	45%	33%	9%	18%	49%	29%	6%	18%	49%	12%	5%	11%
Emissions minimales		11	45	266	322	29	147	568	744	39	177	1134	1350
Diminution	Absolue	40	48	53	141	103	162	102	736	144	114	123	381
	Relative	78%	52%	17%	30%	78%	52%	15%	33%	79%	39%	10%	22%

- Pour une solution à iso coût**
  - Transport : coûts sensiblement équivalents (-5%)

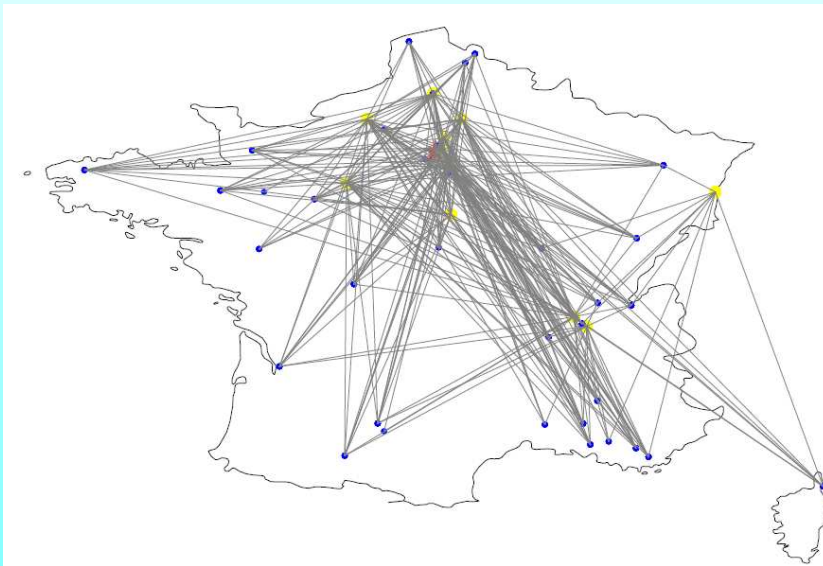
Cas 1 : la mutualisation des fournisseurs à forts volumes

## Résultat d'optimisation (route et rail)

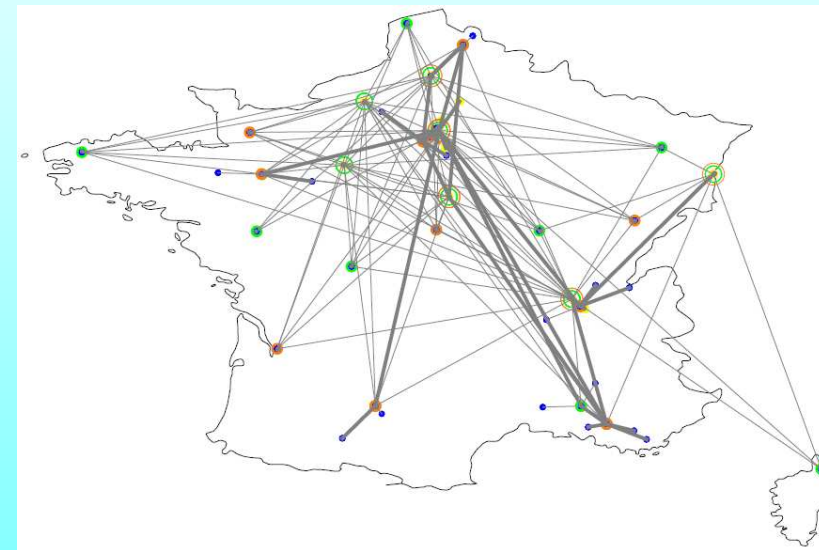
Mutualisation des schémas logistiques

le cas des DPH à forts volumes (grp. C)

*Flux de référence*



*Flux mutualisés (train = gras)*



**Les fréquences de livraisons respectent les flux hebdomadaires**

## Cas 1 : la mutualisation des fournisseurs à forts volumes

**Résultat d'optimisation (route et rail)****Enjeux : environnement et économie**

- Des gains environnementaux très significatifs en t CO<sub>2</sub>/semaine

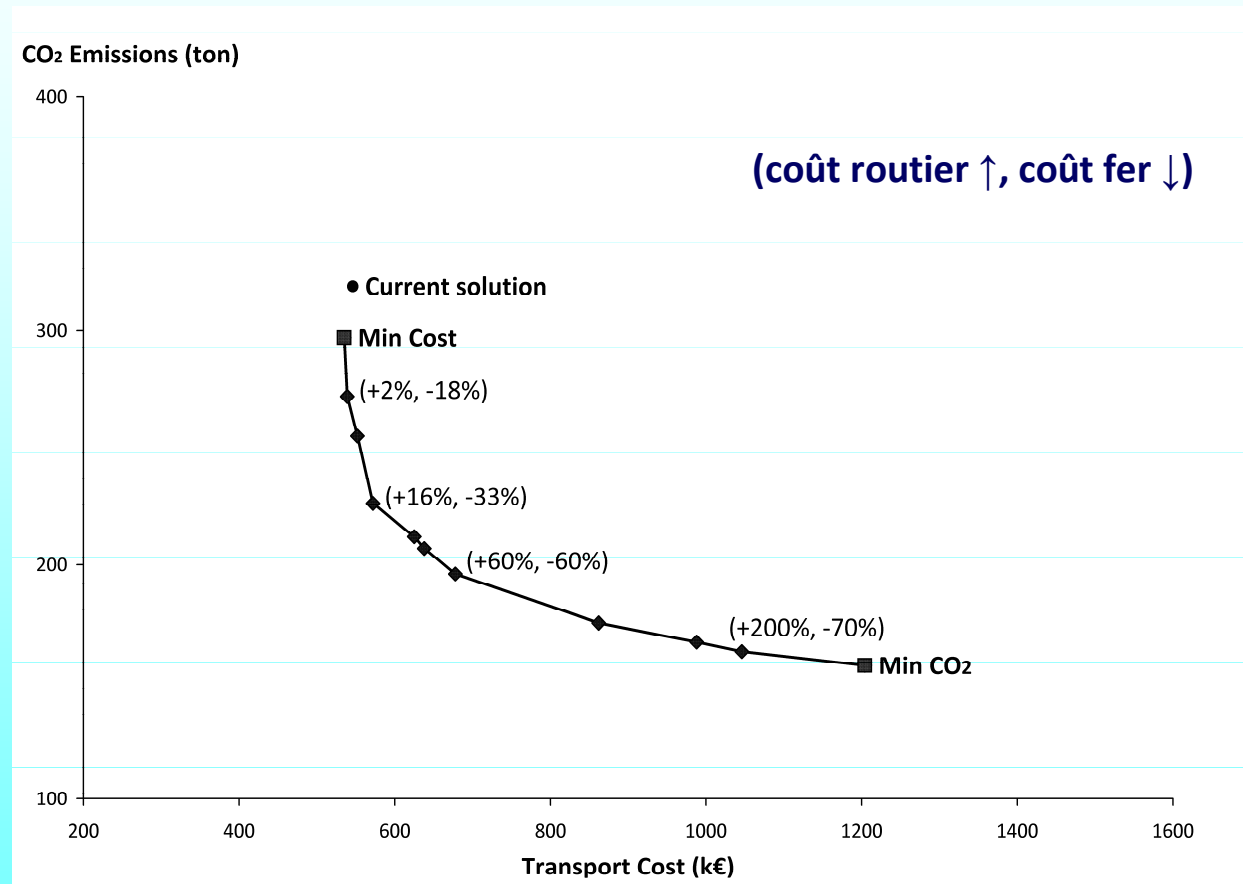
Classe		DPH				EP				LIQ			
Groupe		A	B	C	Σ	A	B	C	Σ	A	B	C	Σ
Emissions actuelles		51	93	319	463	132	309	670	1111	183	291	1257	1731
Emissions / mutualisation		28	44	157	230	67	210	257	534	93	247	471	812
Diminution	Absolue	23	49	162	233	65	99	413	577	90	44	785	919
	Relative	45%	53%	51%	50%	49%	32%	62%	52%	49%	15%	62%	53%

- Pour une solution économique plus élevée
  - Transport : augmentation des coûts (+ 85%)

## Cas 1 : la mutualisation des fournisseurs à forts volumes

## Définition d'une frontière d'efficacité

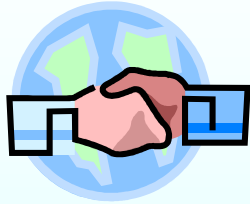
## Illustration : DPH à forts volume (group C)



**La mutualisation améliore la solution actuelle mais la structure à date des coûts ne permet pas d'atteindre le minimum d'émission**

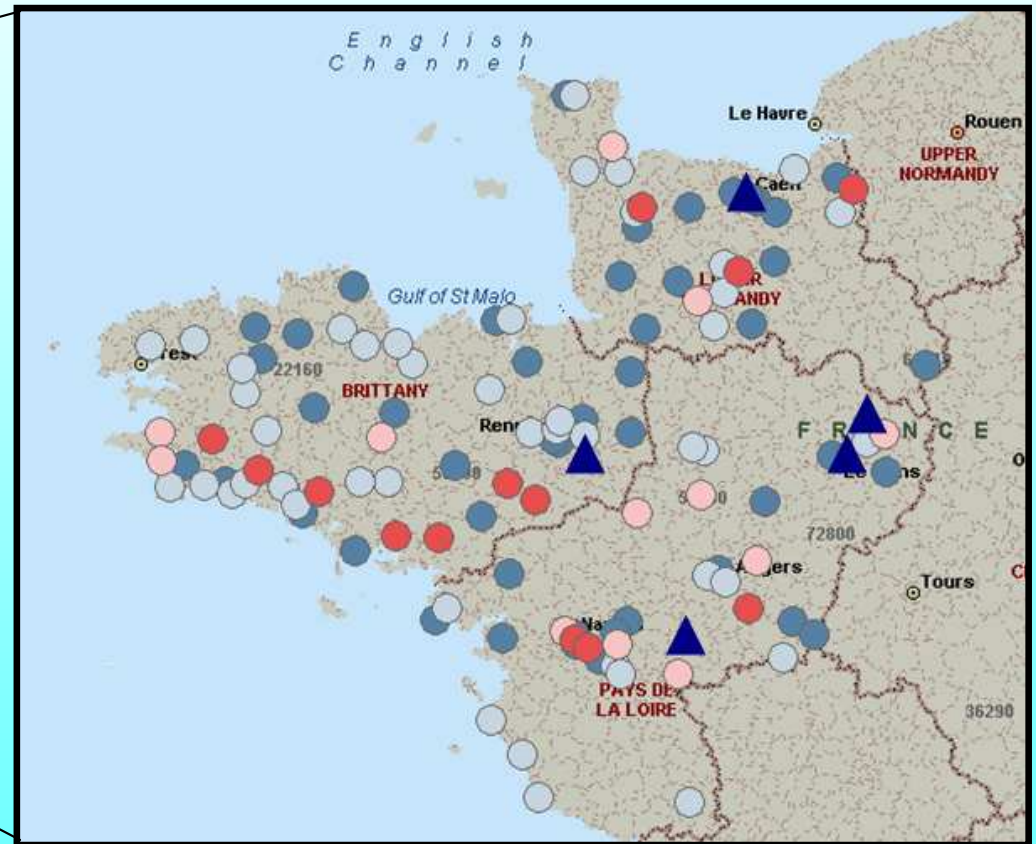
# Le cas des fournisseurs à petits volumes

## Cas 2 : la mutualisation des fournisseurs à petits volumes



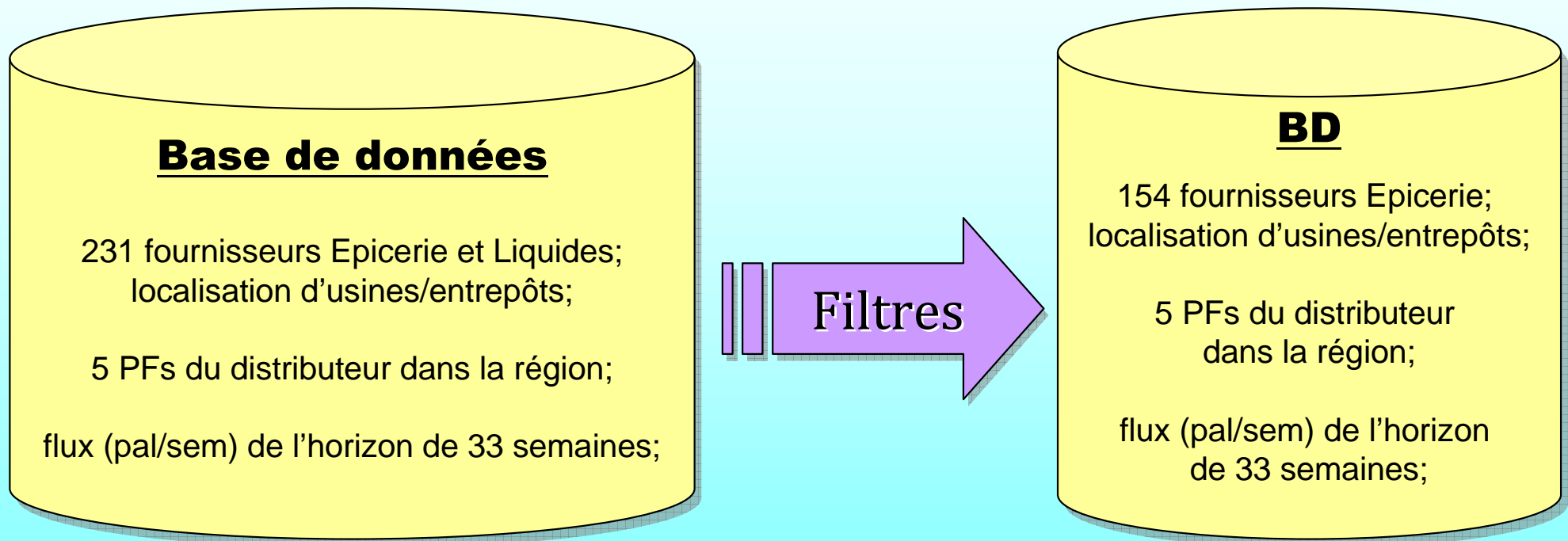
Carrefour  
FEEF (Fédération des Entreprises et Entrepreneurs de France)

### Périmètre géographique



## Cas 2 : la mutualisation des fournisseurs à petits volumes

# Construction de la base de données



**Limite : un seul distributeur dans l'étude**

## Cas 2 : la mutualisation des fournisseurs à petits volumes

# Analyse de l'existant

Enquête terrain à la plateforme Carrefour du Mans pendant une semaine :



### **Statistiques :**

- 32 camions entrants qui ont réalisé 54 livraisons pour 39 fournisseurs
- taux en surface : 84% (27 pal au sol/33)
- taux en volume : 67%
- existence de l'organisation logistique entre certains fournisseurs, mais opportuniste et fragmentaire

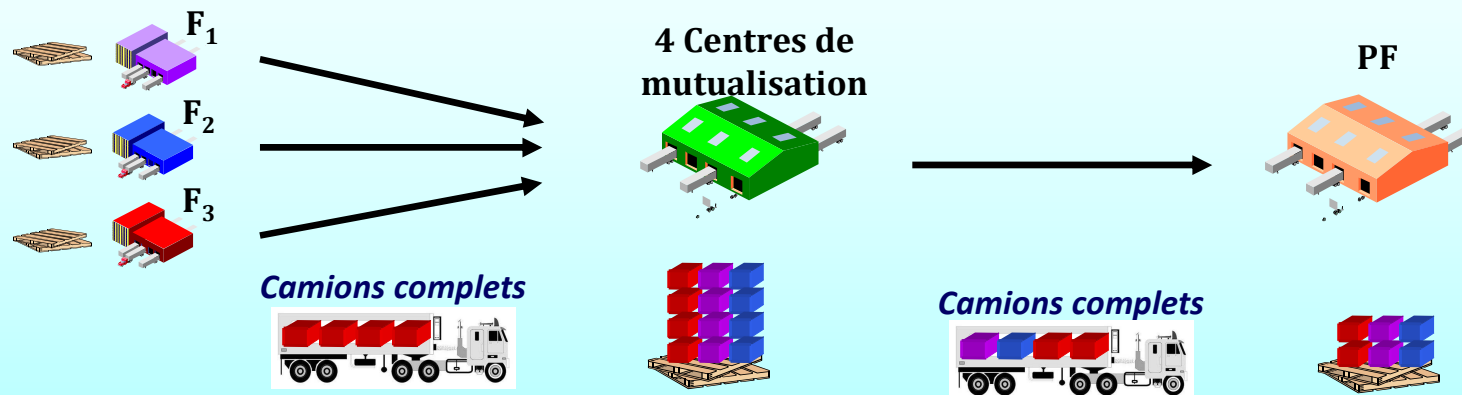


Le taux de remplissage de camion constaté est une référence pour évaluer l'efficacité de transport du cas actuel

## Cas 2 : la mutualisation des fournisseurs à petits volumes

## 4 scénarios de mutualisation (1/2)

## S1: Mutualisation d'entrepôts livrés en camions complets et directs



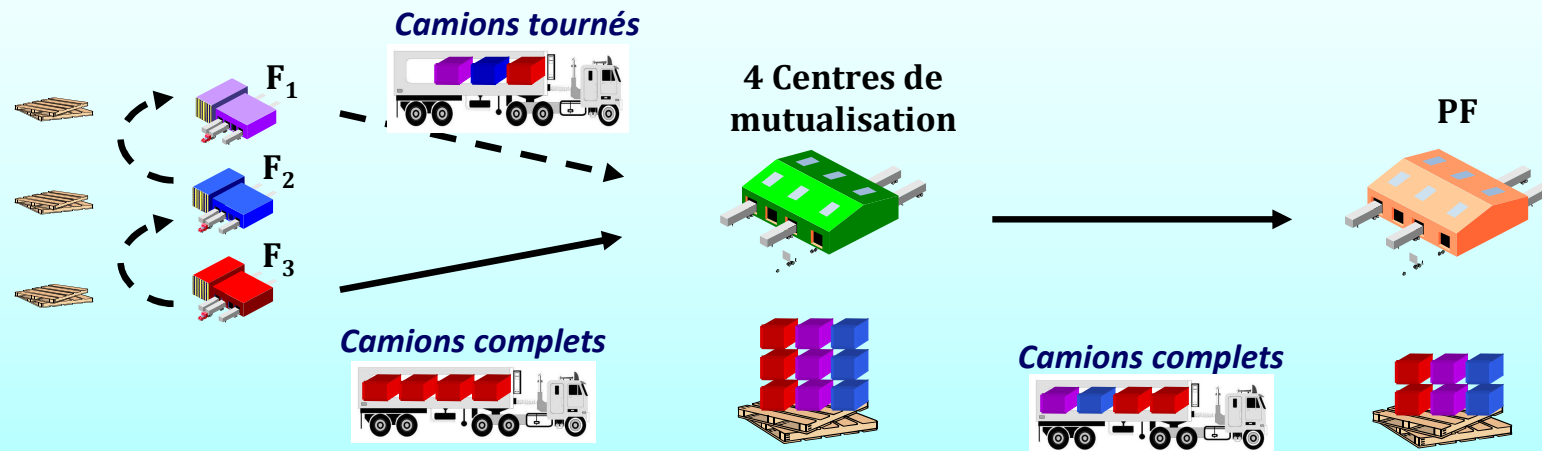
## S2: Mutualisation par des plateformes de Cross-docking



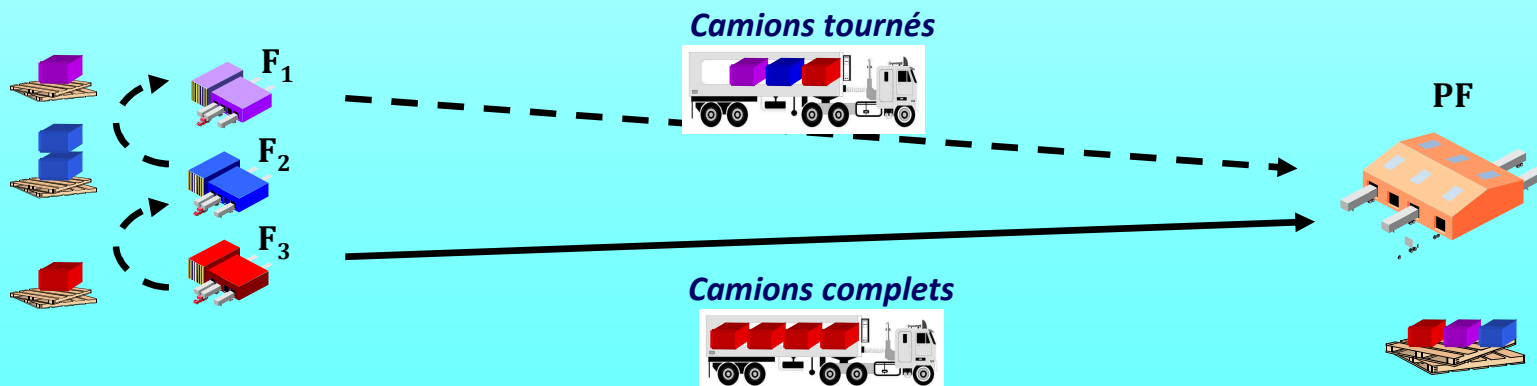
## Cas 2 : la mutualisation des fournisseurs à petits volumes

## 4 scénarios de mutualisation (2/2)

## S3: Mutualisation d'entrepôt livrés par tournées



## S4: Mutualisation par des tournées de camions



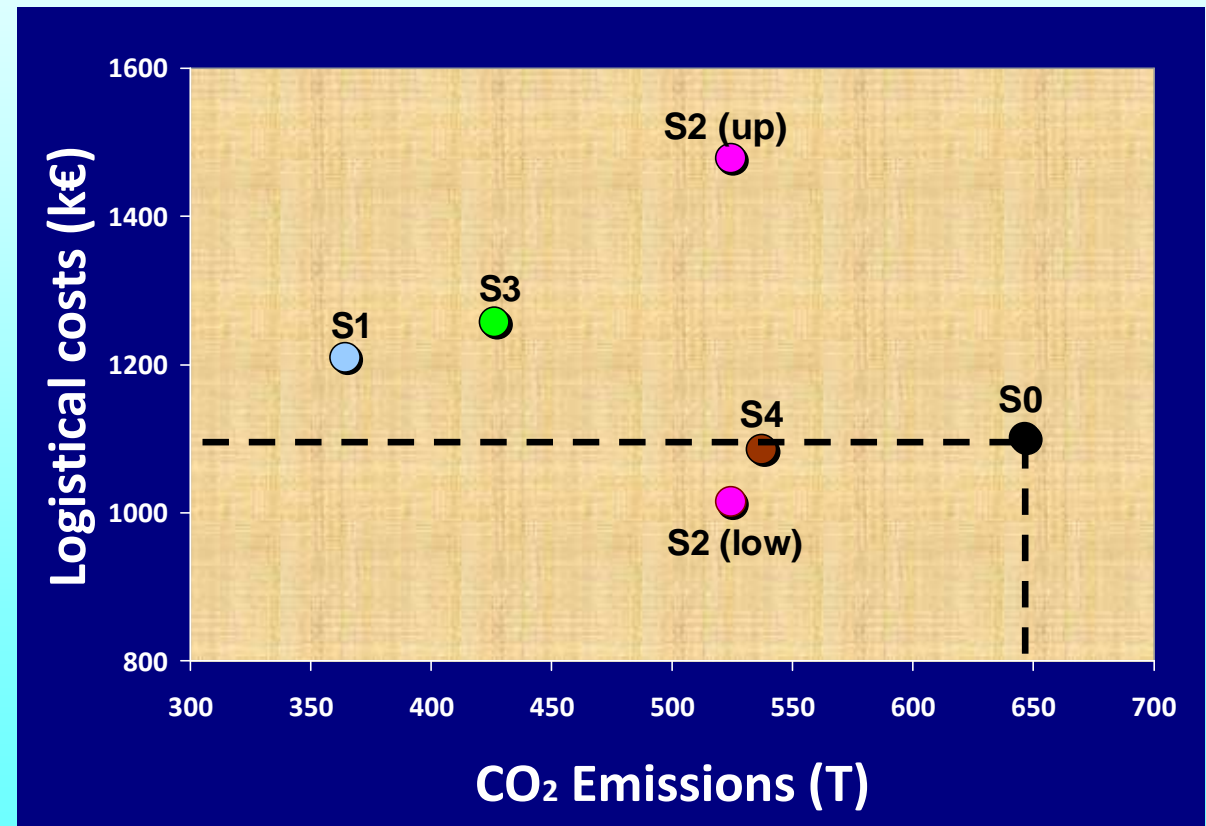
## Cas 2 : la mutualisation des fournisseurs à petits volumes

## Enjeux

Environnement : Optimisation des émissions de CO<sub>2</sub> du transport sur l'horizon 33 sem.

Economie : évaluation économique des solutions optimisées

	tonne CO <sub>2</sub>	k€
Situation actuelle (S0)	646	1102
Minimum	330	
Scenario 1	364	1210
Scenario 2	524	1015 ~ 1497
Scenario 3	426	1258
Scenario 4	537	1086



# Conclusions

## ✓ Une nouvelle organisation logistique : la mutualisation

- Définition d'une nouvelle dimension de la Supply Chain : la collaboration horizontale au niveau stratégique

## ✓ Optimisation des émissions de CO<sub>2</sub> liées au transport

- Modélisation des émissions de CO<sub>2</sub> du transport routier et ferroviaire
- Démarche de minimisation

## ✓ Evaluation de la performance au contexte de réseau de distribution

- Cas des fournisseurs à forts volumes : réduction de CO<sub>2</sub> de 14%~52%
- Cas des fournisseurs à petits volumes : réduction de CO<sub>2</sub> de 16%~43%

## ✗ Limites :

- Certaines contraintes ne sont pas prises en compte telles que la capacité d'entreposage et les parcours à vide etc.
- Les émissions de sites ne sont pas prises en compte
- La dimension économique est à compléter

# Perspectives

## ⊖ Défis relatifs à la mise en œuvre

- Chercher les partenaires à long terme
- Accepter de collaborer sur des solutions logistiques (y compris avec des concurrents...)
- Définir des règles de gestion en commun des coalitions
  - *Partage des moyens*
  - *Niveaux de prestation*
  - *Règlement des litiges*
  - *Rentabilité pour les coalitions*
  - *Partage des coûts et des gains*
- Relier les systèmes d'information

## ⊖ Optimisation multi-objectifs

- Pareto-optimale : environnemental et économique



**Merci de votre attention**

**Contact: {eric.ballot; frederic.fontane; shenle.pan}@mines-paristech.fr**