

**Ministère de l'Ecologie,  
du Développement durable et de l'Energie**

**CONVENTION DE SUBVENTION  
N°10-MT-PREDITGO4-4-CVS-124-20**



Groupe Opérationnel 4 du PREDIT

**SYNTHESE DES TRAVAUX  
SIMULATION  
DE L'INTERNET PHYSIQUE**

CONTRIBUTION A LA MESURE DES ENJEUX ET  
A SA DEFINITION

JUIN 2012

Sous la direction de Prof. Eric Ballot,  
Centre de Gestion Scientifique,  
MINES ParisTech, Paris, France



## Contributeurs au projet

Rochdi Sarraj, Mines ParisTech – CGS, Paris, FRANCE

Shenle Pan, Mines ParisTech – CGS, Paris, FRANCE

Frédéric Fontane, Mines ParisTech – CAOR, Paris, France

Pr. Benoit Montreuil, Université Laval – CIRRELT, Québec, Canada

Driss Hakimi, Université Laval – CIRRELT, Québec, Canada

Pr. Rémy Glardon, LGPP - Lausanne, SUISSE

Michaël Thémans, EPFL– Centre de Transport, Lausanne, SUISSE

Olivier Gobet, EPFL– Centre de Transport, Lausanne, SUISSE

## Remerciements

Les auteurs remercient ici les responsables industriels qui ont participé à la construction de la base de données et permis son utilisation dans le cadre de ce travail. Ce travail fut mené dans le cadre du Club Déméter pour la Logistique Durable qu'il convient également de remercier ici.

## Objectif du projet

L'objectif de ce projet de recherche consiste à examiner l'intérêt d'une nouvelle organisation de la logistique : l'Internet Physique. En effet, cette approche visant à interconnecter universellement les prestations logistiques à la manière d'un internet. Il s'agit de placer systématiquement les produits dans des conteneurs de tailles modulaires (de la taille d'une caisse mobile à un paquet postal), intégrés à l'Internet des objets donc parfaitement tracés et suivant des processus définis. Il en résulte potentiellement une véritable révolution logistique à la mesure de ce qui s'est passé dans le maritime depuis les années 1960. Cette approche très récente est suffisamment différente de l'Internet digital et innovante par rapport aux organisations logistiques actuelles pour qu'il soit nécessaire d'en évaluer les propriétés et le potentiel. À cette fin, un modèle de simulation a été construit, validé puis exploité à partir de flux réels. Cette approche est notamment motivée par le caractère insoutenable du développement de la logistique au sens large au regard des nouvelles exigences du développement durable, notamment en termes d'émissions.

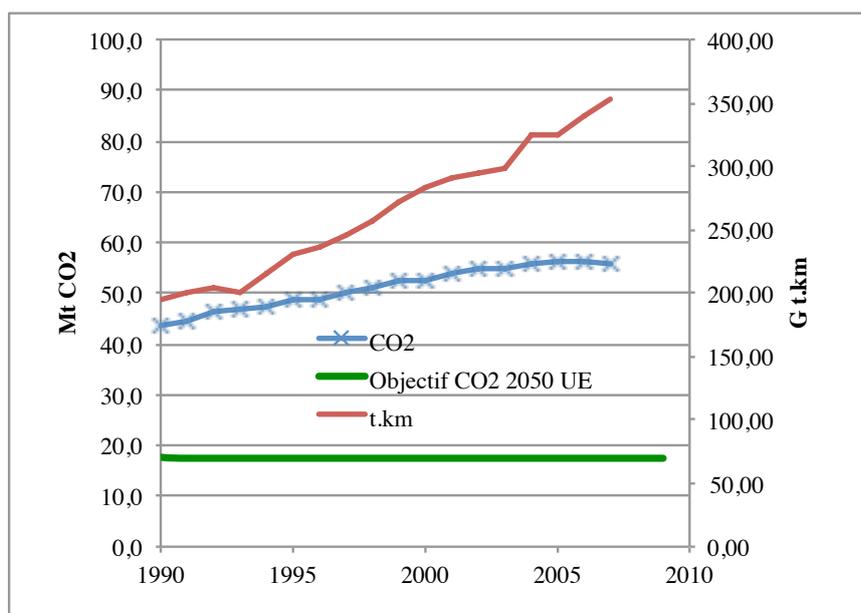
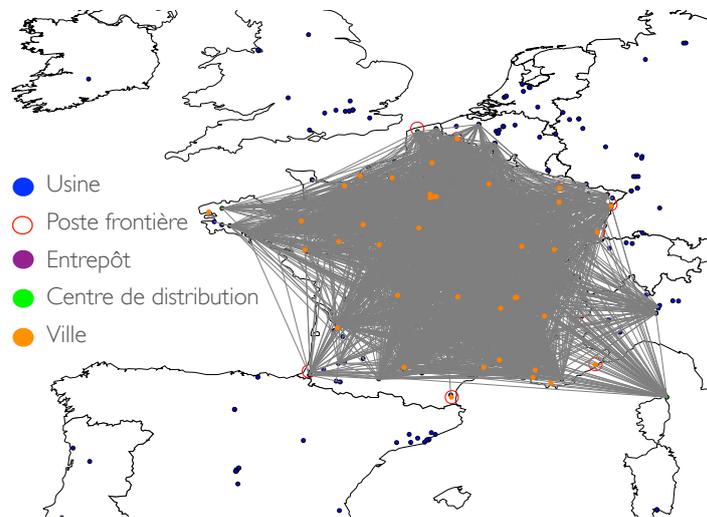


Figure 1 : croissance comparées des flux de marchandises en France, de leurs émissions et de l'objectif européen pour 2050

Les flux qui y sont testés proviennent du secteur de la grande distribution et plus particulièrement de l'alimentaire. Ils sont divisés en deux bases de données pour des raisons de disponibilité de celles-ci. La première base est la base «amont», elle regroupe des flux d'une centaine des plus importants fournisseurs du secteur depuis leurs usines vers les plateformes des distributeurs, ces flux passent également pour certains par des entrepôts des industriels. La base «aval» pour sa part reprend des flux en provenance de ces mêmes fournisseurs mais au niveau de la distribution depuis les centres des distributeurs vers les magasins de leurs réseaux : hyper, super

et proximité dans deux régions Ile-de-France et Rhône - Alpes. Ces flux correspondent respectivement à deux périodes de 12 semaines et 7 semaines.



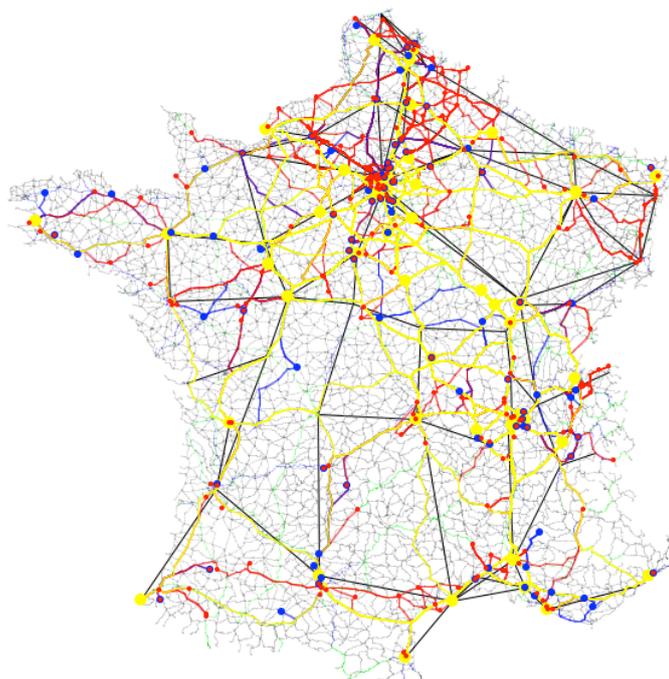
**Figure 2 : flux pris en compte au niveau national à partir de leur entrée sur le territoire national**

Pour être le plus représentatif possible de la situation actuelle le modèle de simulation s'appuie sur la localisation de l'ensemble de ces activités, les infrastructures routières et ferroviaires qui les relient ainsi que sur un regroupement des commandes par moyens de transport. Ceci permet d'optimiser le plus possible la situation actuelle qui sert de référence. In fine le modèle de référence est apparu représentatif, au regard de critères tels que les km parcourus ou les taux de remplissage des moyens (de l'ordre de 60% en masse).

En parallèle, une série de travaux furent menés pour définir le réseau de l'Internet Physique, simuler divers stades de son développement et ainsi explorer son fonctionnement et les performances associés. Dans cet objectif, des algorithmes pilotant son fonctionnement et des choix de conception ont été réalisés. Les éléments présentés ici n'ont donc pour prétention que de proposer des solutions raisonnables en termes de complexité et de performance pour le but de la démonstration. Il ne faut donc pas y voir des solutions à implémenter directement. En revanche les outils construits ont vocation à servir de plateforme d'expérimentation pour la spécification des conteneurs, des hubs, des algorithmes, etc.

Deux outils ont été construits.

1. Un outil de conception du réseau de l'Internet Physique par optimisation de la localisation de hubs, lieux d'interconnexion des prestations, en fonction des flux et des infrastructures.



**Figure 3 : réseau de prestations de l'Internet Physique (mêmes sites desservis que pour la figure précédente)**

2. Un outil de simulation de l'exploitation du réseau qui cherche, en fonction des demandes d'approvisionnement, à router les demandes vers leur destination dans les meilleures conditions d'efficacité et ce de manière décentralisée. L'outil de simulation permet en outre de construire des scénarios. Chacun de ces scénarios teste une hypothèse sur le matériel, le niveau de déploiement, etc.

| Ident. | Route | Fer | Entrepôt industriel | Critère de routage | Ensemble de conteneurs testés                             |
|--------|-------|-----|---------------------|--------------------|---|
| 0      | ✓     |     |                     | NA                 | ∅   |
| 1.1.C  | ✓     |     |                     | Coût               | $2.4 \times 2.4 \times \{1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6.0, 12.0\}$ |
| 1.1.T  | ✓     |     |                     | Temps              | $2.4 \times 2.4 \times \{1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6.0, 12.0\}$ |
| 1.2.C  | ✓     |     |                     | Coût               | $2.4 \times 2.4 \times 1.2$                               |
| 1.3.T  | ✓     |     |                     | Temps              | $2.4 \times 2.4 \times \{1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6.0, 12.0\}$ |
| 2.1.C  | ✓     | ✓   |                     | Coût               | $2.4 \times 2.4 \times \{1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6.0, 12.0\}$ |
| 2.1.T  | ✓     | ✓   |                     | Temps              | $2.4 \times 2.4 \times \{1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6.0, 12.0\}$ |
| 2.1.E  | ✓     | ✓   |                     | Emission           | $2.4 \times 2.4 \times \{1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6.0, 12.0\}$ |
| 3.1.C  | ✓     | ✓   | ✓                   | Coût               | $2.4 \times 2.4 \times \{1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6.0, 12.0\}$ |
| 3.1.E  | ✓     | ✓   | ✓                   | Emission           | $2.4 \times 2.4 \times \{1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6.0, 12.0\}$ |

**Table 1 : guide des scénarios et de leurs variantes**

## Méthode

La finalisation des modèles a nécessité de définir des principes pour la conception et l'exploitation des réseaux interconnectés. Ces principes font avancer la réflexion sur la conception de l'Internet Physique. Plus particulièrement, il a été défini des algorithmes permettant de :

⇒ définir des interconnexions et localiser des « routeurs physiques (hub) » routier ou rail route ;

⇒ remplir des conteneurs et des moyens de transport en fonction de commandes réelles ;

⇒ router des conteneurs dans un réseau interconnecté avec différents niveaux de conteneurisation.

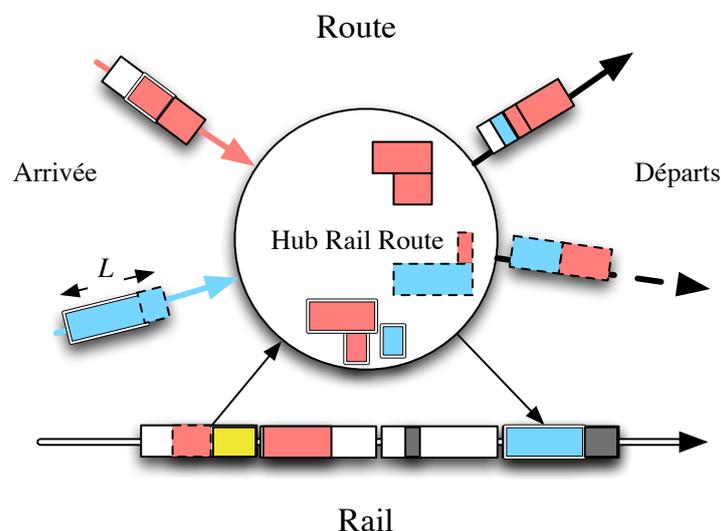


Figure 4 : fonction du passage des conteneurs par un hub multimodal

## Résultats

⇒ construire la crédibilité d'une telle organisation du point de vue de son efficacité opérationnelle par rapport aux solutions existantes ;

⇒ donner des objectifs économiques et de performance aux autres projets de l'Internet Physique (définition des tailles modulaires, utilisation des moyens camions trains ou conteneurs, coût objectif de passage par un hub, délai, etc.).

Les résultats obtenus sont tout à fait encourageants car on constate :

- un fort accroissement des taux de chargement des moyens de l'ordre de +17% suivant les cas ;

- une possibilité de report ferroviaire massif sur les principaux axes et ce malgré le volume limité des flux d'une approche sectorielle et leur fragmentation ;
- un gain économique certain provenant des améliorations réalisées sur l'efficacité du transport et de la manutention conteneurisée qui compensent plus que largement les coûts des ruptures et des conteneurs. Ces gains varient suivant les hypothèses de coûts retenus de -4% à -26%, (sauf un scénario qui n'est pas économique sur l'aspect purement transport car n'utilisant que des très petits conteneurs de 6,9 m<sup>3</sup>) ;

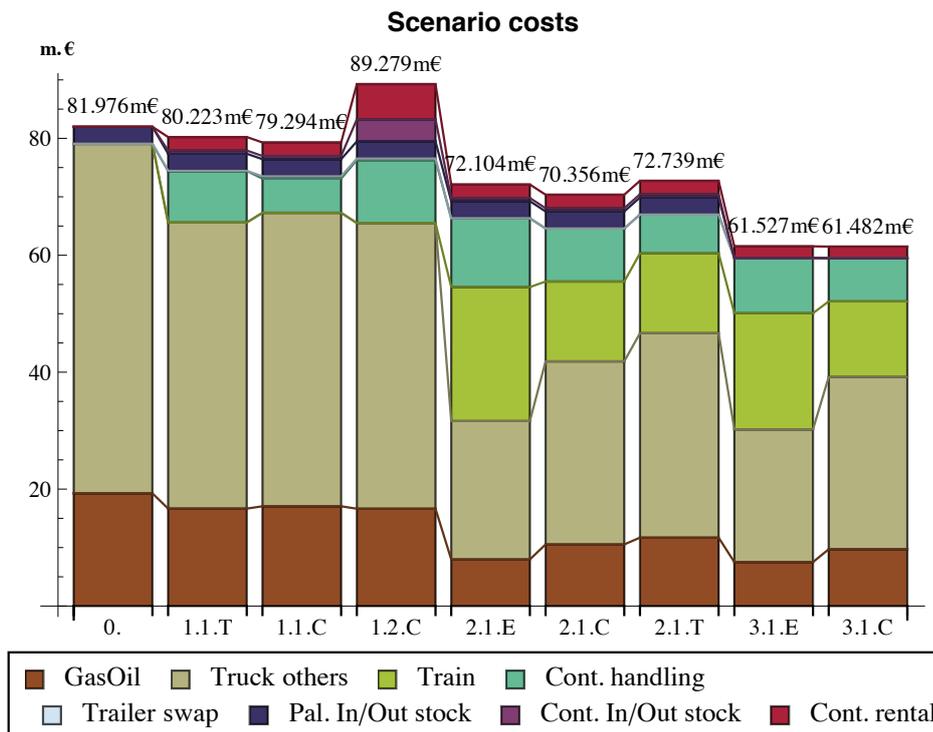


Figure 5 : coût des opérations logistiques par variante des scénarios

- de 1 à 2 ruptures de charges supplémentaires par rapport à la situation actuelle pour le réseau interconnecté de l'Internet Physique ;
- un délai de transport allongé de quelques heures, donc négligeable par rapport à la situation actuelle, voire un raccourcissement drastique par envoi direct dans le réseau (sans passage par entrepôt industriel) ;
- une possibilité de forte réduction des émissions provenant à la fois de la meilleure utilisation des moyens et du report vers le ferroviaire permettant de s'approcher du facteur 3, soit -65%.

## Perspectives

Les perspectives sont à deux niveaux : l'approfondissement et l'expérimentation.

Le routage tel que proposé ici est essentiellement fondé sur un meilleur chemin. Or ce chemin pourrait être remis en cause par le trafic, l'urgence de la livraison ou d'autres éléments de contexte non anticipés. Le développement d'un cadre plus dynamique est prévu afin d'améliorer les performances actuelles. Enfin, on peut rechercher une utilisation plus avancée de l'Internet Physique qui correspond au déploiement des produits en s'affranchissant de l'organisation actuelle de stockage dédiée pour l'intégrer dans le réseau de l'Internet Physique et ainsi libérer de nouvelles marges de manœuvre.

Ces résultats par leur caractère très prometteur sont également une incitation à se rapprocher des professionnels de ces secteurs pour préparer des expérimentations afin de valider ces résultats par les opérations et ainsi préparer le processus de spécification prélude à un déploiement. Ainsi un projet Européen débutera en octobre 2013 avec une dizaine de partenaires industriels pour expérimenter ces concepts et trouver des solutions techniques et organisationnelles aux défis posés.

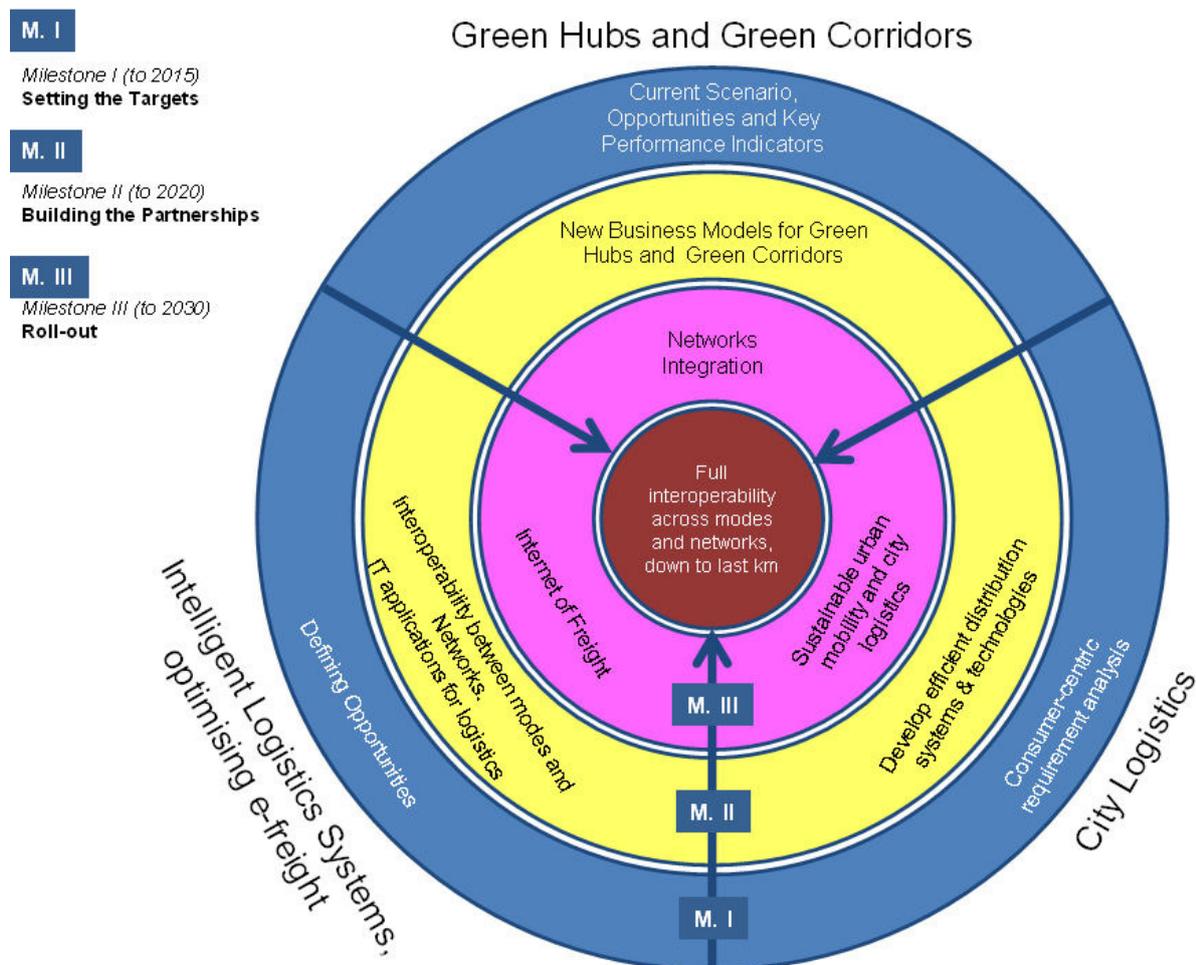


Figure 6 Roadmap pluri annuelle et stratégie de long terme pour la logistique - European Green Cars Initiative PPP