

# Analogies entre réseau Internet et réseaux de prestations logistiques

ROCHDI SARRAJ<sup>1</sup>, ERIC BALLOT<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MINES PARISTECH — CGS  
60, bd Saint-Michel 75272 Paris Cedex 06, France  
rochdi.sarraj@mines-paristech.fr

<sup>2</sup> MINES PARISTECH — CGS  
60, bd Saint-Michel 75272 Paris Cedex 06, France  
eric.ballot@mines-paristech.fr

---

**Résumé** – Dans le cadre de la proposition d’une nouvelle organisation de la logistique, nommée Internet Physique, cette contribution vise à préciser ce que peuvent être les analogies et les transpositions possibles entre les réseaux logistiques et les réseaux informatiques notamment en terme de routage. En effet, dans les deux cas il s’agit de réseaux et il existe des similitudes frappantes dans les concepts employés et les méthodes de conception mais aussi des différences fondamentales dans la nature des objets qui empêchent une transposition intégrale. Nous montrerons donc dans cet article quelles transpositions peuvent être faites et quelles perspectives elles montrent pour l’organisation des réseaux logistiques.

**Abstract** - Recently, Physical Internet was proposed as an open global logistics system leveraging interconnected supply networks through a standard set of collaborative protocols, modular containers and smart interfaces for increased efficiency and sustainability. The objective of this contribution, within this framework is to study the analogy between the routing of packets in computer networks and the routing of containers in logistic networks. We will show that even if there are similarities, fundamental differences related to the nature of the elements in both networks prevent a straight transposition.

**Mots clés** – Chaîne d’approvisionnement, réseaux, Internet Physique, analogie, interconnexion.

**Keywords** – supply chain, network, Physical Internet, analogy, interconnect.

---

## 1 INTRODUCTION

La *supply chain*, ou chaîne d’approvisionnement, propose une représentation de l’organisation logistique simplifiée qui met en avant l’interdépendance entre le client et son fournisseur et ceci de manière récurrente. Cependant, les chaînes d’approvisionnement réelles mobilisent des ensembles de fournisseurs et de clients dont les relations arborescentes se superposent géographiquement pour former des réseaux d’approvisionnement complexes aux flux enchevêtrés.

En ce plaçant dans cette perspective on peut assimiler l’ensemble des activités logistiques à une série de réseaux qui, aujourd’hui, évolue largement en parallèle (camion dédié, entrepôt réservé à une entreprise, etc.) tout en partageant des infrastructures communes (routes, voies ferrées,...)

Le réseau, ensemble de nœuds reliés entre eux par des liens, est une forme d’organisation très présente dans l’activité humaine, dans la nature et caractéristique du développement des transports ou de l’informatique.

C’est ainsi que [Montreuil, 2009] et [Montreuil et al., 2010] ont proposé une nouvelle organisation de la logistique et du transport : l’Internet Physique. Le concept repose sur une analogie entre les réseaux informatiques et les réseaux de prestations logistiques et plus particulièrement propose d’explorer l’impact du passage de réseaux de prestations logistiques dissociés et sans cohérence les uns avec les autres, à une logistique qui repose sur une interconnexion universelle des ces différents réseaux de prestations.

Dans la partie 2, nous montrerons les motivations et les attendus d’une telle démarche. Puis, tout au long des autres

parties, notre raisonnement étudiera trois constituants principaux des réseaux d’Internet qui concernent l’acheminement des données pour ensuite voir comment pourraient être transposés ces éléments dans l’Internet Physique et les potentialités et les problèmes qu’ils impliquent du fait du changement de contexte posé par le transport de marchandises.

Ainsi, dans la partie 3, on abordera la question de la définition de l’interconnexion des réseaux qui nous permettra ensuite d’étudier celle de la topologie du réseau Internet et celle que pourrait avoir l’Internet Physique (partie 4). Puis, au sein de la partie 5, on présentera le routage et sa fonction principale d’acheminement de la marchandise depuis son origine jusqu’à sa destination. En partie 6 on étudiera les impacts sur les modèles d’affaires des prestataires logistiques.

## 2 MOTIVATION DE L’INTERNET PHYSIQUE

La performance et la réduction des coûts dans la logistique et le transport sont des problématiques pour lesquelles la recherche a apporté beaucoup de solutions : localisations des entrepôts [Chopra et Meindl, 2004], la gestion des tournées des véhicules [Daganzo, 2005], la coordination client fournisseur [Pan et al., 2010], etc.

Cependant, une nouvelle préoccupation a vu le jour à savoir les impacts environnementaux de la chaîne logistique et en particulier des transports qui y sont associés. En effet, les émissions en CO<sub>2</sub> représentent aujourd’hui un critère important que les industriels tentent de réduire. Ceci concerne particulièrement les acteurs du transport de marchandises qui

représentent à eux seuls 14% de l'ensemble des émissions de CO<sub>2</sub> en France, se positionnant ainsi comme la principale source et qui plus est en forte croissance du fait d'une croissance des flux de l'ordre de 33% par 10 à 15 années [[Boissieu, 2006]et [Citepa, 2009]].

Dans cette perspective, il a été recherché différentes méthodes de re-conception des réseaux pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, comme la mutualisation [[Pan et al., 2010], [Ballot et Fontane, 2010]] ou encore le transport multimodal [[Groothedde et al., 2005], [Bontekoning et Priemus, 2004],[Janic, 2007]]. Cependant, ces approches seules ne permettent pas de répondre véritablement aux objectifs à savoir une réduction en émissions de 20% d'ici à 2020 et de 75% d'ici 2050 en Europe [Piecny et McKinnon, 2009]. Atteindre de tels résultats globaux nécessite en fait des changements plus radicaux en termes d'organisation, y compris en logistique.

Une piste est donnée par le faible niveau d'efficacité des moyens de transport qui est aujourd'hui de l'ordre de 10% à 20% [Ballot et Fontane, 2008] et offre donc des possibilités d'amélioration.

Le nouveau concept de la logistique que l'on va étudier ici se fonde donc sur une analogie avec le réseau Internet qui a su développer un système global de transport de données (datagrammes).

Afin de mesurer l'impact qu'aurait une telle organisation, une étude a été menée et a montré qu'une logistique se basant sur l'Internet Physique réduit les ressources de l'ordre de 30% à 55%, ce qui par changement modal en complément permettrait d'atteindre l'objectif d'une réduction de 75% des émissions de CO<sub>2</sub>, y compris en limitant leur croissance [Ballot et al., 2011]. Même si cette étude est théorique car stylisée, elle ouvre tout de même des perspectives vis-à-vis de ce nouveau mode logistique.

Cet article vient dans cette perspective de conception et de définition d'un Internet Physique. Il s'agit d'un travail initial permettant d'explorer certains principes permettant le routage de la marchandise depuis son origine jusqu'à sa destination via le réseau des réseaux des prestations logistiques : l'Internet Physique. L'objectif est que la massification des flux ainsi obtenue permettra de mieux utiliser les capacités de transport disponibles et de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> en utilisant les moyens les plus efficaces.

### 3 L'INTERCONNEXION DES RESEAUX : DE L'INTERNET VERS L'INTERNET PHYSIQUE

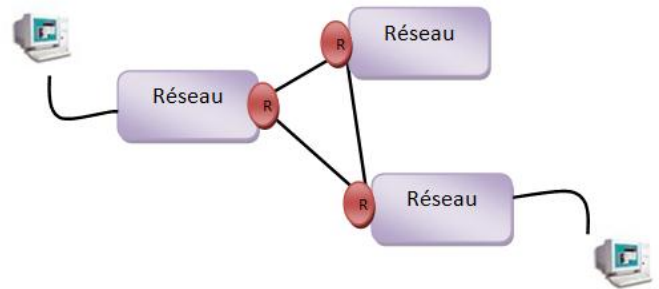
#### 3.1 L'interconnexion des réseaux dans Internet

Internet est dit le réseau des réseaux car il représente l'interconnexion universelle des réseaux informatiques.

L'interconnexion se fait via des « ordinateurs spécifiques qui transfèrent des paquets d'un réseau à un autre » [p.34 [Comer, 2006]] (Figure 1). Ces ordinateurs spécifiques sont appelés des « routeurs ». Ainsi, entre deux réseaux voisins, ce sont les routeurs qui les lient qui permettent le transit des paquets d'informations (on parle de datagrammes qui ont des caractéristiques standardisés comme la taille ou la structuration). Par extension, pour transiter entre deux ordinateurs distants de plusieurs réseaux, les datagrammes seront acheminés via les routeurs interconnectant les différents réseaux intermédiaires par lesquels ils transiteront, pour

atteindre le réseau de destination, puis l'ordinateur destinataire, appelé hôte.

La même logique de fonctionnement se retrouve au sein de chacun de ces réseaux qui sont composés de routeurs permettant aux hôtes du réseau de communiquer entre eux et avec les réseaux extérieurs. Le rôle du routeur est finalement, d'assurer l'acheminement des datagrammes leurs indiquant, lors de leurs arrivées, et suivant leurs destinations, le prochain routeur vers lequel ils doivent s'orienter. Ainsi, ils arriveront pas à pas jusqu'à destination à travers une organisation en partie maillée et en partie hiérarchique.



**Figure 1 : Interconnexion de réseaux via les routeurs**

Pourrions-nous transposer cette façon d'interconnecter les réseaux informatiques pour interconnecter un ensemble de réseaux de prestations logistiques, créant ainsi la notion d'Internet Physique ?

#### 3.2 L'interconnexion des réseaux dans Internet Physique

Pour répondre à cette question il est important de savoir que les réseaux dans Internet ont les éléments physiques suivant : câbles, hôtes, et routeurs

Actuellement, en logistique, il existe de nombreux réseaux de prestations généralement définis par entreprise et qui reposent sur des schémas logistiques figés et/ou dédiés. On note l'exemple du réseau de prestations logistiques entre un fournisseur et les grands distributeurs ou celui d'un opérateur de messagerie. Ainsi, ces réseaux logistiques se retrouvent complètement dissociés, et chaque acteur travaille indépendamment des autres.

L'idée de l'Internet Physique est d'interconnecter l'ensemble de ces réseaux de prestations logistiques par, si possible, transposition des principes de l'Internet. Ce qui est recherché est donc l'interconnexion de réseaux de transfert de marchandises.

Au niveau physique, une prestation logistique est réalisée dans un réseau constitué de nœuds (comprenant hubs, plateformes et les entrepôts, usines,...), de schémas logistiques (routes terrestres, chemins de fer, les voies maritimes etc. sur lesquels sont définis des moyens de transfert des flux de marchandises par des services particuliers) et émetteurs/récepteurs finaux (entreprises ou particuliers). En appliquant l'analogie, un émetteur transporte sa marchandise à un nœud proche qui s'occupera de la stocker, la maintenir et l'envoyer vers sa destination via l'ensemble des schémas logistiques accessibles. De plus la marchandise pourra, comme dans le cas des données sur Internet, être encapsulée formant ainsi des paquets standardisés sous forme de conteneurs. Ce fonctionnement nous permet d'analyser la forte analogie qu'il peut y avoir entre un réseau logistique et un réseau informatique (Cf. Tableau 1).

**Tableau 1 : Analogie entre réseau informatique et physique**

Réseau	Internet	Internet Physique	Fonction d'interconnexion
Flux	Data-gramme	Conteneur	Encapsulation, anonymisation des marchandises
Nœud	Routeurs	Hub	Lieu d'orientation (de tri), de changement de mode, de prestataire.
	Hôtes (adresse unique)	Fournisseur ou consommateur	Lieu de conteneurisation et de déconteneurisation
Arc	Connexion filaire ou par onde	Schéma logistique	Service ponctuel ou régulier de transport entre deux hubs.

On note qu'un hôte est un lieu d'entrée ou de sortie de l'Internet Physique. Il s'agit donc de l'endroit où sont conteneurisés les biens. Il peut s'agir aussi bien d'un poste sur une ligne d'assemblage, qu'un rayon d'un magasin, voire le domicile d'une personne.

L'interconnexion entre deux réseaux logistiques peut se faire via la création de nouveaux schémas logistiques entre les nœuds des deux réseaux distincts. En effet, un émetteur d'un réseau pourrait transmettre sa marchandise à un hub d'un autre réseau, et de même un nœud d'un réseau pourrait envoyer des marchandises à un nœud de l'autre réseau. Ainsi, on aurait deux réseaux interconnectés avec des nœuds qui assureraient l'acheminement des marchandises depuis leurs origines jusqu'à leurs destinations avec la possibilité de passer par des réseaux intermédiaires. Cette façon très logique et intuitive d'interconnecter les réseaux existe d'ailleurs dans des solutions bilatérales d'accord de partage de trafic mais sans généralisation possible car sans normalisation.

D'ailleurs, on pourrait aussi penser interconnecter deux réseaux logistiques en ajoutant d'autres nœuds assurant le transit des marchandises entre les réseaux avec les schémas logistiques associés par exemple ferroviaire. Logique qui se retrouve aussi dans les interconnexions des réseaux informatiques avec la notion de *backbone* [Chapitre 4 [Tanenbaum, 2003]].

Il s'agit maintenant d'étudier la structure globale qu'aurait cette interconnexion des réseaux logistiques créant ainsi l'Internet Physique.

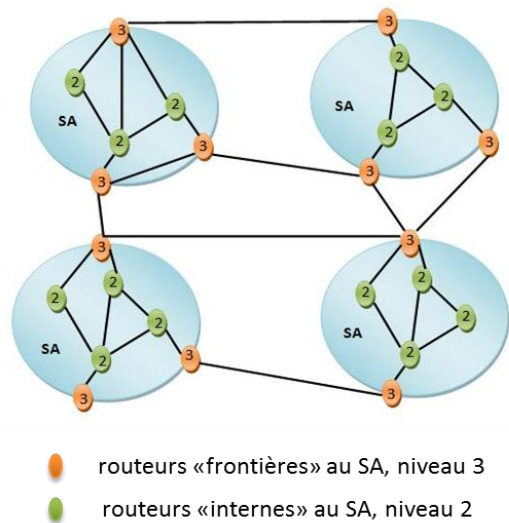
#### 4 LA STRUCTURE DU RESEAU DES RESEAUX : DE L'INTERNET VERS L'INTERNET PHYSIQUE

##### 4.1 Architecture du réseau Internet

L'interconnexion, si elle permet de relier tout nœud, ne signifie pas qu'il existe un arc de chaque nœud à chaque nœud. Bien au contraire, devant le nombre élevé d'utilisateurs d'Internet, la conception de ce réseau a été faite de façon à limiter le nombre d'arc pour des raisons d'investissement et de facilité de routage qui seront étudiées ci-après.

Internet présente en fait une structure de type fractale, dans le sens où la topologie des réseaux de chaque niveau de la

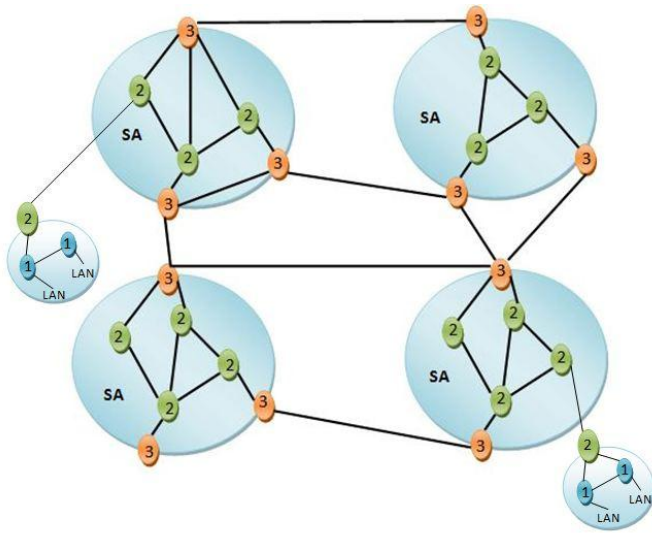
hiérarchie peut se reproduire de manière plus ou moins similaire à d'autres niveaux. Il est composé, sur son niveau hiérarchique le plus haut, d'un ensemble de grands réseaux interconnectés, appelés des « Systèmes Autonomes » (Figure 2). En effet, Internet n'étant pas contrôlé par un unique administrateur, on introduit la notion de systèmes autonomes (SA) dont chacun est géré d'une manière indépendante par un seul opérateur (généralement un SA est un grand opérateur public ou privé). Les SA communiquent entre eux via des routeurs spécifiques dits « routeurs frontières ». A contrario, le transfert des informations au niveau interne des SA se fait via des routeurs dits « routeurs internes » et la communication interne est réalisée grâce à d'autres types de protocoles [section 3.1.2 : cœur du réseau Internet [Hardy et al., 2002], section 8.1 : Splitting the Internet into Autonomous systems [Huitema, 1999], Section 4 : structuration de l'Internet [Rubino et Toutain, 2000]].



**Figure 2 : schématisation conceptuelle de l'Internet, réseau d'interconnexion de SA.**

Ces différentes relations entre les SA sont fonctionnelles ce qui signifie que ces SA peuvent être géographiquement confondus. De plus, chaque système autonome est lui-même composé d'autres réseaux qui sont des « zones » (ou « aires »). Dans les deux cas on parle de sous-réseaux ayant ou non leur gestion propre. Cette décomposition peut continuer à un troisième niveau pour avoir des sous-réseaux de sous-réseaux et ainsi de suite jusqu'à arriver au réseau local ou à un hôte. Il n'y a pas de nombre de niveaux spécifique dans le réseau Internet, mais la pratique indique que l'on peut y distinguer trois niveaux hiérarchiques dont le niveau le plus bas (niveau 1) correspond généralement à des fournisseurs d'accès Internet (FAI) ou des routeurs intra-universitaires dans Rénater par exemple. [Le site de culture scientifique créé par des chercheurs de l'INRIA [INRIA, 2011], section 4.3 : protocoles de passerelles extérieures : BGP\_4 [Hardy et al., 2002]]

On retrouve ainsi ces trois niveaux dans la schématisation conceptuelle d'Internet (Figure 3).



**Figure 3 : schématisation conceptuelle de l'Internet, réseau d'interconnexion de SA. Les chiffres correspondent à des niveaux de hiérarchie**

Cette topologie à la fois maillée et fractale permet à la fois la résilience d'Internet, la limitation des infrastructures et la limitation des tailles des données nécessaires au sein des routeurs pour l'acheminement des datagrammes du fait de la limitation en nombre des interconnexions entre les réseaux. En effet, il est plus facile d'acheminer des datagrammes lorsqu'il y a des points de passages connus et en nombre limité que lorsqu'il en a un nombre considérable [chapitre 6 [Mathon, 2003]]. Ces points de passages correspondent à quelques routeurs qui permettent l'accès à l'extérieur des sous réseaux, comme par exemple les routeurs 3 par rapport aux SA dans la Figure 3.

La question qui se pose maintenant est de savoir comment pourraient être transposés ces principes de la topologie du réseau Internet pour définir celle que pourrait avoir l'internet physique ?

#### 4.2 Architecture du réseau de l'Internet Physique

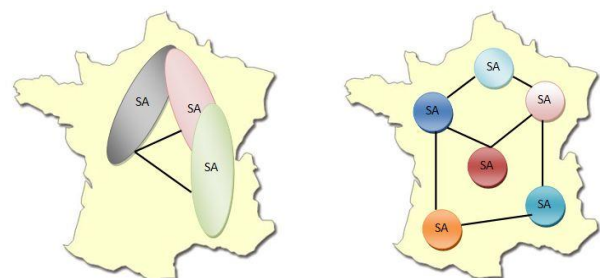
Devant le nombre très élevés de nœuds, de producteurs et de consommateurs dans le monde (une ligne d'assemblage industrielle pouvant représenter à elle seule des centaines de postes), sans compter les hubs, l'obtention d'une vision globale de l'intégralité du réseau de l'Internet Physique paraît irréaliste en termes de taille de données nécessaires. Il est donc intéressant de voir ce que pourrait donner une transposition de la structure de l'Internet vers l'Internet Physique. Un autre point important est la prise en compte de la situation actuelle de la logistique ; en effet, il existe plusieurs rôles joués par les entreprises et les administrations dans ce secteur et il faudra étudier la compatibilité du modèle transposé avec le cadre actuel des prestataires logistiques. Cette transposition de la structure d'Internet impose la définition d'un certain nombre de termes par analogie de l'Internet, Cf. Tableau 2.

**Tableau 2 : Eléments d'analogie entre Internet et Internet Physique**

Niveau	Internet	Internet Physique
Inter réseaux	Partage des transferts de datagrammes	Partage des prestations logistiques conteneurisées
Autorité administrative	—	Par zones de souveraineté
Réseau	Système autonome (SA), réseau géré par une et une seule entité de gestion	Ensemble de schémas logistiques gérés par un et un seul acteur (prestataire, industriel ou distributeur) : SA Physique
FAI	Entité donnant un accès à un réseau interconnecté	Prestataire logistique donnant accès à un réseau interconnecté.

Les zones de souveraineté (pays) ont un nombre limité de plateformes internationales d'échange (aéroports, ports et gare de trains internationaux) notamment pour des questions de contrôle des flux par les douanes et qui représenteraient, dans ce cas, les Nœuds « Frontières » au sens propre du terme. De plus, chaque pays a ses propres règles de transfert de marchandises et ses propres moyens de transport. Il s'agit là d'une dimension supplémentaire, structurante et absente des réseaux digitaux.

Pour autant, un pays n'est pas un système autonome car il ne se préoccupe pas des prestations logistiques qui seront assurées par des prestataires spécifiques. Un réseau autonome est donc un réseau logistique géré par une entreprise suivant ses propres règles, il peut s'agir d'un opérateur de messagerie, d'un intégrateur logistique international ou d'une entreprise qui gère son réseau d'approvisionnement directement : constructeur automobile ou distributeur par exemple. Tout comme en informatique les SA peuvent avoir ou non une signification géographique. C'est à dire se superposer géographiquement ou au contraire reposer sur un territoire exclusif comme le montre la figure 4.



**Figure 4 : Internet Physique avec une vision géographique des SA (figure à droite), Internet Physique avec une vision purement conceptuelle des SA (figure à gauche). Les connexions physiques (échanges de marchandises) entre SA dans ce second cas se font aussi dans les zones d'intersection des SA.**

Ainsi on se rend compte, comme dans Internet, que les réseaux de prestations logistiques actuels (SA physiques) seraient sans localisation géographique précise.

Par contre la logique d'interconnexion qui n'est pas géographique pour l'Internet digital ne pourra pas être reproduite pour l'Internet Physique, sans quoi le gain du partage des moyens logistiques pourrait être limité par des trajets aberrants. En effet dans le cas de l'Internet, la distance parcourue sur une infrastructure existante compte peu, ce qui n'est pas vraiment le cas en logistique.

Si nous cherchons à limiter la connaissance et donc le transfert de données relatives à l'état du réseau physique, pour l'optimisation de son fonctionnement, il est intéressant de découper un réseau Internet Physique en plusieurs zones sous formes de SA physiques. De même que, dans Internet, on peut partager ces SA en de sous-SA physiques réduisant encore la quantité d'informations nécessaires au niveau des Nœuds. Dans ce cas, un Internet Physique est l'interconnexion de SA physiques, qui interconnectent eux-mêmes d'autres SA. On pourrait continuer la décomposition en d'autres SA physiques encore mais ceci dépendra des besoins réels du transport de marchandises.

On note évidemment que la fonction de fournisseur d'accès à l'Internet Physique n'existe pas à l'heure actuelle en logistique mais pourrait être assurée par des prestataires de services de proximité notamment pour les particuliers.

Ainsi, Internet physique serait l'interconnexion fractale de plusieurs réseaux conceptuellement différents et qui peuvent être aussi géographiquement distincts. Ces réseaux pouvant être des prestataires logistiques déjà existants qui non seulement fournissent des prestations à leurs clients mais peuvent être clients et fournisseurs d'autres prestataires. Ce système existe d'ailleurs déjà dans le transport aérien par le système de *code sharing* ainsi que dans le transport de conteneurs maritimes.

Il y a cependant de nombreux paramètres qui rentrent en compte lors du choix d'une prestation logistique.

Ainsi, on a défini une certaine structure que pourrait avoir l'Internet Physique afin d'assurer une interconnexion des différentes prestations logistiques permettant l'acheminement (roulage) des conteneurs. La conséquence de cette structure a été étudiée dans [Ballot et al., 2011].

## 5 LE FONCTIONNEMENT DU ROUTAGE : DE L'INTERNET VERS L'INTERNET PHYSIQUE

### 5.1 Le fonctionnement des routeurs dans Internet

Techniquement, les routeurs déterminent la direction que doit prendre chaque datagramme via une table de routage. En effet, la table de routage fait correspondre pour chaque adresse de destination la direction que doit emprunter le datagramme afin d'arriver à sa destination de la meilleure des façons (meilleure selon un ou plusieurs critères préétablis). Une table de routage donne uniquement le prochain routeur que doit emprunter le datagramme, et on appelle cela du routage [section1 : *introduction to routing in the internet* [Huitema, 1999], chapitre 3 : commutation, routage et technique de transfert [Pujolle et al., 2008], section 8.5 : L'acheminement dans le réseau [Servin, 2003]]. En guise d'analogie, c'est comme s'il s'agissait d'un rond-point avec des panneaux de directions

pour chaque destination, une route entre deux ronds-points représentant une connexion entre deux routeurs. La construction de sa table de routage est assez compliquée, et sa taille dépend de celles des réseaux que le routeur correspondant interconnecte [chapitre 7 : acheminement des datagrammes IP [Comer, 2006]]. Ce qui sera, d'ailleurs, prouvé ultérieurement lors de notre étude sur la construction des tables de routage.

Cette table de routage représente le cœur du fonctionnement de chaque routeur. Prenons un petit exemple définissant bien cet aspect du routage. Considérons un morceau de réseau dont l'architecture est dans la Figure 5 :

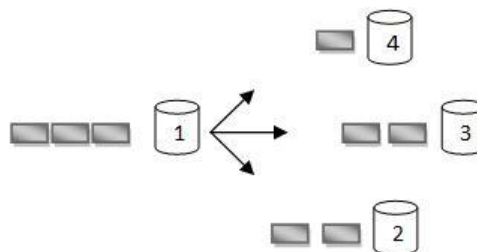


Figure 5 : Fonctionnement du routage

Adresse destination	Ligne de sortie
127.23.34.188	2
123.45.12.45	2
152.45.34.22	3
129.23.x.x	4

Figure 6 : Table de routage

Nous avons ainsi 4 routeurs (numérotés de 1 à 4) et des datagrammes (les rectangles gris). Nous avons les connexions suivantes entre les routeurs ; Connexion Routeurs 1-2, Connexion Routeurs 1-3 et Connexion Routeurs 1-4.

Considérons un émetteur qui envoie des datagrammes vers le routeur 1 avec lequel il est connecté. A la réception de chacun de ces datagrammes, le routeur 1 consulte sa table de routage qui lui indique, suivant l'adresse de destination du datagramme, la direction (prochain routeur) que ce dernier doit emprunter. Un exemple d'aperçu de la table de routage du routeur 1 est donné dans la Figure 6 (le prochain routeur est indiqué dans la colonne « Ligne de sortie »).

Si le routeur en question correspond à la destination finale (dans ce cas ce routeur serait un hôte), le datagramme est bien arrivé à destination. Si le routeur en question n'est pas la destination finale, ce dernier réitérera la procédure appliquée par le routeur précédent, et ainsi de suite jusqu'à arriver à la destination du datagramme.

Ainsi, le routeur a une fonction de lecture des adresses de destination pour chaque datagramme. Ces adresses font d'ailleurs partie intégrante du datagramme correspondant. En effet, ce dernier est un paquet d'informations sous forme d'un ensemble de bits divisé en plusieurs parties dont chacune représente un sous-paquet d'informations comme celui contenant l'adresse de destination ou le contenu même des informations à transmettre (contenu du mail ou texte, etc.). On parle donc de paquet d'informations qui « encapsule » d'autres. De plus, lors de la phase transport (entre routeurs par exemple), les datagrammes s'encapsulent dans des « trames » qui peuvent contenir chacune un ou plusieurs datagrammes.

Ainsi, lors de l'arrivée d'un datagramme à un routeur, il est extrait de la trame puis se trouve dans une file d'attente avant d'être traité. Le routeur s'occupera, en effet, de lire l'entête des datagrammes et ensuite, pour chacun d'eux, d'accéder à la partie qui concerne l'adresse de destination. Ensuite il placera le datagramme sur le port de sortie correspondant et l'acheminera via une autre trame vers le routeur voisin, et ainsi de suite jusqu'à arriver à destination.

Que pourraient être alors l'encapsulation, les datagrammes, les trames, les files d'attentes, et les tables de routages dans l'Internet physique ?

### 5.2 Le fonctionnement du routage dans l'Internet Physique

L'idée d'avoir des paquets de données encapsulés dans un datagramme, lui-même pouvant être transporté sous forme de trame qui encapsulent également et que des décapsulations et ré-encapsulations soient mises en œuvre lors des passages par les routeurs, peut également être transposée à la logistique en proposant un modèle de marchandises sous formes d'un ensemble de conteneurs standardisés (datagrammes) interfacés sur chaque moyen de transport (trames) [Ballot et al., 2010]. En effet, ces auteurs prévoient dans le modèle de l'Internet physique des nœuds qui recevront des conteneurs, les imbriqueront dans d'autres contenants (qui seront des conteneurs) ou en extrairont leurs contenus (qui seront aussi des conteneurs de moindres tailles) en les imbriquant ou pas avec d'autres conteneurs pour utiliser au mieux les capacités de transport sur chaque segment. L'ensemble de ces conteneurs obtenus sera ensuite transféré suivant leurs adresses de destination au prochain nœud.

Ces conteneurs à leurs différents niveaux seront appelés des  $\pi$ -conteneurs<sup>1</sup> pour les différencier des conteneurs maritimes actuels et représentent l'analogie avec les paquets d'informations et les datagrammes.

Il devient dès lors possible de transposer à l'Internet Physique la notion de table de routage utilisée dans Internet, dans chaque routeur présent à chaque nœud, et qui viendra déterminer, le nœud suivant pour atteindre la destination finale. De la même manière, mais pas suivant la même logique, suivant la destination du  $\pi$ -conteneur, le prochain nœud qu'il doit emprunter avant d'arriver à sa destination de la meilleure façon (meilleure selon un ou plusieurs critères : coût, délai, CO<sub>2</sub>) devra être déterminé par la table de routage du  $\pi$ -hub qui joue un rôle de centre de tri des conteneurs.

L'analogie entre les rôles des différents composants physiques de l'Internet et de l'Internet physique vient se renforcer notamment entre les routeurs et les  $\Pi$ -Hub (Tableau 3).

Dans Internet, le routage des datagrammes à l'extérieur ou à l'intérieur même des SA ne se fait pas de la même façon car on prend en compte le modèle d'affaire choisi. Cette distinction est aussi importante dans les relations entre les prestataires logistiques.

**Tableau 3 : Analogie entre routeurs de l'Internet et  $\Pi$ -hub**

Fonction	Routeurs dans Internet	$\Pi$ -hub
Réception	Dé tramage et tramage suivant les protocoles réseaux utilisés	Déchargement et ou décomposition de $\pi$ -conteneurs en entrée
Routage	Acheminement suivant une table	Sélection de la prochaine destination
Expédition	Mises en trame suivant le réseau sélectionné	Composition de $\pi$ -conteneurs et chargement sur moyen de transport

## 6 ROUTAGE ET MODELE D'AFFAIRE : DE L'INTERNET A L'INTERNET PHYSIQUE

Dans Internet on distingue la politique interne de routage et la politique externe de routage dans les SA sous la forme de protocoles spécifiques. Les protocoles de routage externe concernent uniquement les routeurs qui échangent directement avec les réseaux extérieurs. On parle donc de routeurs « frontières » (routeurs en couleur orange dans Figure 2) contrairement aux routeurs « internes » au SA qui n'ont pas de visibilité à l'extérieur du SA et qui mettent en œuvre les protocoles internes de routage. Nous définissons les caractéristiques des routeurs « frontières » et « internes » de systèmes (sous-systèmes) qu'ils soient simples ou autonomes [chapitre 14 : Routage entre pairs (BGP) [Comer, 2006]]. Ceci implique que tout routeur frontière repose sur un contrat portant sur le trafic entre les opérateurs.

### 6.1 Le routage et les échanges de flux entre opérateurs

La connexion entre deux SA différents se fait nécessairement grâce à des routeurs qui se trouvent à la frontière (Cf. Figure 2). Ces routeurs « frontières » transmettent aux routeurs « internes » du système en question les datagrammes provenant d'autres systèmes et vis-versa [section 3.1.2 : cœur du réseau Internet [Hardy et al., 2002]].

En parlant d'un SA, on met en relief un opérateur et donc une certaine politique de routage vers l'extérieur. En effet, les échanges entre les SA se font, dans ce cas, suivant des accords de « *peering* » qui ont pour objectif d'établir un équilibre dans les échanges, en facturant par exemple le déséquilibre de flux d'informations entre deux SA ou encore le déséquilibre entre leurs niveaux de qualités de connexion (qualité de service).

La traduction technique de ces accords vient dans les protocoles de routage utilisés dans les routeurs « de frontières » des SA. Il s'agit de protocoles de type BGP (Border Gateway Protocol), qui sont implémentés sur les routeurs « frontières » et qui garantissent une bonne communication entre SA.

La question de la redevance liée au partage de flux ou de l'acheminement pour un tiers dans Internet par un opérateur a pu être traité au départ comme un « simple » échange du fait du coût marginal quasi nul du passage des datagrammes sur une infrastructure existante. Ainsi il a existé entre les grands opérateurs des accords de *peering* (échange de trafics non comptabilisé monétairement). Cela ne pourra certainement pas être le cas dans l'Internet Physique car tout mouvement de  $\pi$ -conteneur, implique un coût de manutention et de transport

<sup>1</sup>  $\Pi$  est ici utilisé comme sigle pour Physical Internet (PI).

non négligeable et des accords de partage de trafics facturés et assurés par des Incoterms seront inévitables. Dans ce domaine, la structuration du transport apparaît plus en avance que dans le domaine d'Internet : partage de code, de responsabilité, etc. normalisés.

### 6.2 Le routage et les échanges de flux au sein d'un opérateur

Chaque système autonome peut avoir ses propres protocoles de routage dans son système interne : on parle de protocole type IGP (Interior Gateway Protocol).

On voit que la question politique de routage peut alors être concrètement intégrée dans le routage des datagrammes dans Internet. Ayant ce même besoin de pouvoir router correctement les  $\pi$ -conteneurs entre les différents réseaux de l'Internet Physique et d'assurer la liberté de chaque SA physique de pouvoir appliquer sa propre politique commerciale et industrielle.

### 6.3 Le routage dans sa fonction politique dans Internet Physique

Il est primordial de pouvoir traduire la politique des prestataires logistiques, tant interne qu'externe dans le routage des conteneurs. Comme dans Internet, on peut distinguer des Nœuds « internes » et de « frontières » ainsi que des politiques de routages externes et internes. Voici donc le Tableau 4 représentant cette analogie.

**Tableau 4 : Eléments d'analogie entre Internet et Internet Physique**

Internet	Internet physique	Détails dans l'Internet Physique
Routeurs « frontières »	Nœuds «Frontières»	Les Nœuds de transit entre le SA Physique et l'extérieur
Routeurs « Internes »	Nœuds «Internes»	Les Nœuds internes au SA Physique
Protocoles BGP	Politique extérieure	Politique de routage d'un SA physique vers ses partenaires.
Protocoles IGP	Politique intérieure	Politique de routage interne à un SA physique.

#### Les Nœuds « frontières » des SA Physiques :

Ces Nœuds se trouvent à la frontière des SA physiques car ils assurent la connexion avec d'autres SA. Ils intégreront dans la façon de router les politiques externes de leur SA. Leurs fonctions logistiques serait de router les  $\pi$ -conteneurs provenant de l'extérieur (du SA correspondant) vers le nœud «interne» le plus adapté afin d'arriver à la destination, passant ainsi par plusieurs Nœuds. Leur seconde fonction est de router les  $\pi$ -conteneurs provenant de leur SA vers leurs destinations au cas où celles-ci seraient à l'extérieur de leur SA.

#### Les Nœuds « internes » dans les SA Physiques:

Ces Nœuds internes aux SA traduisent la politique de routage interne de leur SA. De plus, ils n'auraient connaissance que de la topologie intérieure du domaine-SA. C'est dans cette perspective que chacun des SA Physiques est autonome car

tout ce qui se passe à l'intérieur de ce réseau se fait indépendamment de ce qui est autour, et chaque nœud « interne » du SA Physique n'a comme vision que l'architecture globale ou partielle du SA.

### 6.4 Limites de cette analogie

L'analogie entre les routeurs et les nœuds de l'Internet Physique a bien évidemment des limites car la fonction logistique des nœuds ne se résume pas au routage. La construction du réseau de l'Internet physique doit prendre en considération le besoin réel de la logistique comme la gestion des capacités de transport et de tri des nœuds qui ne se pose pas ainsi dans Internet où le protocole accepte de « payer pour voir », c'est à dire réexpédier d'autres datagrammes si les premiers sont perdus ou victimes d'un engorgement.

En revanche, les protocoles de routages entre les nœuds pourront utiliser la meilleure connaissance des flux et l'estimation de leur état futur pour préparer le routage, ce qui n'est pas le cas dans Internet. En effet, l'Internet Physique peut bénéficier d'un rapport favorable entre ses moyens et le coût de l'information sur ces mêmes moyens.

## 7 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cet article, nous avons montré la forte analogie qui peut être mise en évidence entre Internet et les réseaux logistiques et en particulier l'Internet Physique en terme de routage. Cette analogie montre que de nombreux éléments d'organisation sont déjà présents pour permettre un meilleur partage des ressources pour acheminer des flux toujours croissants.

Cependant, cette analogie montre également des différences fondamentales qui font que la logistique n'est pas Internet et qui méritent d'être explorées pour aboutir à une meilleure performance et se diriger vers l'Internet Physique.

1. L'absence d'une conteneurisation (datagramme) dans le domaine de la logistique terrestre, qui permettrait de rationaliser les moyens de transport et de manutention.
2. Certaines marchandises ne peuvent pas être transportées avec d'autres pour des questions de sécurité.
3. Les interfaces entre les conteneurs et les différents moyens de transport et de manutention pour réaliser des groupements dégroupements en lieu et place du tramage et du dé tramage.
4. La publication des capacités et des conditions de transport, tri, manutention etc, pour orienter efficacement les flux vers les schémas logistiques les plus pertinents. Cela revient à proposer une infrastructure logistique « ouverte », l'Internet Physique en substitution des logistiques fermées actuelles.
5. La définition de protocoles de routage reposant sur les spécificités des marchandises et des capacités logistiques limitées et fondées sur leur publication ainsi que celle des flux. Pour cela la définition d'un système d'adressage combinant domaine et géographie sera nécessaire.

Les perspectives de ce travail exploratoire sont donc nombreuses et vont dans un premier temps postuler l'existence des solutions de conteneurisation pour pouvoir déterminer les informations nécessaires au routage ainsi que ses principes. Un

modèle de simulation, permettra de valider à la fois les gains de l'Internet Physique par rapport à la logistique et d'expérimenter son fonctionnement. Ce travail permettra de valider l'intérêt de la démarche et constitue un préalable à l'étude de la spécification des conteneurs.

## 8 REFERENCES

- Ballot, E. et F. Fontane (2008). "Rendement et efficacité du transport: un nouvel indicateur de performance." *Revue Française de Gestion Industrielle* 27(2): 41.
- Ballot, E. et F. Fontane (2010). Reducing greenhouse gas emissions through the collaboration of supply chains: lessons from French retail chains. *Production, planning & control*. 21: 640-650.
- Ballot, E., R. Glardon, et al. (2010). Rapport Open Fret: Contribution à la conceptualisation et à la réalisation d'un Hub Rail\_Route de l'Internet Physique. M. C. 52, PREDIT: Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres.
- Ballot, E., B. Montreuil, et al. (2011). Topologie des réseaux logistiques et potentiel d'un Internet Physique. Metz-France, IESM' 2011.
- Boissieu, C. (2006). Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050, Ministère de l'Ecologie et du développement durable.
- Bontekoning, Y. et H. Priemus (2004). "Breakthrough innovations in intermodal freight transport." *Transportation Planning and Technology* 27(5): 335-345.
- Chopra, S. et P. Meindl (2004). *Supply Chain Management: Strategy, planning and operation*, Prentice Hall.
- Citepa (2009). Substances relatives à l'accroissement de l'effet de serre. Emissions dans l'air en France. France, Centre Interprofessionnel Techniques d'Etudes de la Pollution Atmosphérique.
- Comer, D. (2006). *TCP/IP: Architecture, protocoles, et applications*, Pearson.
- Daganzo, C. F. (2005). *Logistics systems analysis*, Springer.
- Groothedde, B., C. Ruijgrok, et al. (2005). "Towards collaborative, intermodal hub networks:: A case study in the fast moving consumer goods market." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 41(6): 567-583.
- Hardy, D., G. Malléus, et al. (2002). *Réseaux: Internet, téléphonie, multimédia*, De Boeck Université.
- Huitema, C. (1999). *Routing in the Internet*, PrenticeHall.
- INRIA. (2011). "Institut National de Recherche en Informatique et Automatique, Interstices." from [http://interstices.info/jcms/c\\_15921/internet-le-conglomerat-des-reseaux?part=0](http://interstices.info/jcms/c_15921/internet-le-conglomerat-des-reseaux?part=0).
- Janic, M. (2007). "Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 12(1): 33-44.
- Mathon, P. (2003). *Windows Server 2003: les services réseaux TCP/IP*, Editions ENI.
- Montreuil, B. (2009). *Physical Internet Manifesto: globally transforming the way physical objects are handled, moved, stored, realized, supplied and used*.
- Montreuil, B., R. D. Meller, et al. (2010). "Towards a physical Internet: The impact on logistics facilities and materials handling systems design and innovation." *Progress in material handling research*: 23.
- Pan, S., E. Ballot, et al. (2010). "The reduction of greenhouse gas emissions from freight transport by pooling supply chains." *International Journal of Production Economics* In Press, Corrected Proof.
- Pieczyk, M. I. et A. C. McKinnon (2009). "Forecasting the carbon footprint of road freight transport in 2020." *International Journal of Production Economics*.
- Pujolle, G., O. Salvatori, et al. (2008). *Les réseaux*, Eyrolles.
- Rubino, G. et L. Toutain (2000). *Routage dans les réseaux Internet*. Techniques de l'ingénieur. Télécoms.
- Servin, C. (2003). *Réseaux et télécoms*.
- Tanenbaum, A. (2003). *Réseaux*, Pearson Education.