



Augmentation de la capacité de lignes ferroviaires par optimisation conjointe de l'infrastructure et du matériel roulant

Jean-Daniel Buri, LITEP – EPFL

Conference paper STRC 2008

STRC

8th Swiss Transport Research Conference
Monte Verità / Ascona, October 15-17, 2008

Augmentation de la capacité de lignes ferroviaires par optimisation conjointe de l'infrastructure et du matériel roulant

Jean-Daniel Buri
LITEP/EPFL
Station 18
1015 Lausanne

Phone: +41 21 693 24 58
Fax: +41 21 693 50 60
email: jean-daniel.buri@epfl.ch

Octobre 2008

Résumé

Le chemin de fer est un système complexe dont l'optimisation ne peut se faire partie par partie. Seule la prise en compte des différents éléments – matériel roulant, infrastructure et services fournis – en interaction permet de trouver les solutions les plus satisfaisantes.

L'optimisation du binôme infrastructure / matériel roulant a de tout temps été l'une des clefs du succès du chemin de fer. Cette optimisation a essentiellement eu pour objet l'augmentation des performances des trains et la diminution des temps de parcours. Dans cette optique, la mise au point de trains à caisses inclinables a permis, dans certains cas, d'éviter la construction de coûteuses lignes à grande vitesse (Rail 2000 1^{ère} étape).

Une telle démarche d'optimisation doit également être envisagée pour résoudre les problèmes de saturation des lignes d'un réseau ferré. Les solutions généralement envisagées prévoient, dans la plupart des cas, l'augmentation du nombre de voies sur tout ou partie de la ligne saturée. De tels aménagements sont onéreux et souvent difficiles à réaliser dans les zones fortement urbanisées. Ainsi, toutes les solutions permettant de limiter la construction de nouvelles voies au strict nécessaire doivent être envisagées.

La recherche de processus d'optimisation est basée sur le cas concret de la ligne Lausanne – Genève. Avec 7 sillons voyageurs et 1 sillon marchandises par heure et par sens, cette ligne peut être considérée comme saturée. Il n'est en effet pas possible de tracer un sillon supplémentaire alors que les cantons de Vaud et de Genève envisagent à l'avenir de faire circuler 10 à 12 trains voyageurs par heure entre les deux capitales cantonales.

L'analyse a montré qu'il était possible d'augmenter significativement la capacité de la ligne sans construire une 3^e voie continue entre Lausanne et Coppet. Par contre, une partie du matériel roulant circulant sur la ligne doit être renouvelée.

Les résultats obtenus ont été extrapolés afin de servir de support à l'analyse d'autres lignes présentant des signes évidents de saturation. Ainsi, malgré la séparation entre la gestion de l'infrastructure et les entreprises ferroviaires cantonnées dans leur rôle de prestataire de transports, le binôme infrastructure / matériel roulant doit continuer à être étudié. Sans cela, des projets de développement de l'offre pourraient être freinés, voire stoppés, par manque de moyens pour construire de nouvelles voies.

Mots clés

Infrastructures ferroviaires – Capacité – Structure horaire – Matériel roulant

1. Introduction

Le réseau ferré suisse assure chaque jour des prestations qui n'ont de pareil dans aucun autre pays au monde. Les statistiques de l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC) montrent qu'en moyenne, il circule chaque jour plus de 90 trains sur chacune des lignes du réseau. Suite au succès de Rail 2000, le nombre de voyageurs transportés ne cesse d'augmenter ce qui conduit d'année en année à étoffer l'offre et à introduire là où c'est encore possible de nouveaux trains. Le réseau est donc proche de la saturation, en particulier dans les agglomérations et sur les grandes lignes.

Cette saturation croissante des infrastructures peut également s'observer dans d'autres pays, essentiellement dans les zones les plus urbanisées ou sur les axes principaux, là où se concentrent des flux importants.

A terme, des mesures seront donc nécessaires afin de soutenir la croissance de la demande et de permettre au chemin de fer de remplir son rôle pour la mobilité des personnes et des biens. Malheureusement le coût des infrastructures ferroviaires est un frein à leur développement. D'autre part, la place disponible dans les agglomérations et les zones fortement urbanisées ne permet généralement pas d'y développer les réseaux ferrés, si ce n'est en sous sol. Par conséquent, il est d'autant plus nécessaire de trouver des solutions qui permettent d'utiliser au mieux les infrastructures existantes et si possible de permettre d'y faire circuler encore plus de trains tout en limitant les investissements.

Le chemin de fer étant un système complexe, son optimisation ne peut se faire partie par partie. Seule la prise en compte des différents éléments en interaction – matériel roulant, infrastructure et services fournis – permet de trouver les solutions les plus satisfaisantes. Le présent article tend à montrer que l'optimisation du binôme infrastructure / matériel est nécessaire et qu'il permet d'apporter des solutions économiquement intéressantes.

La recherche de processus d'optimisation est basée sur le cas concret de la ligne Lausanne – Genève, l'une des plus chargées du réseau suisse. Une analyse plus systématique de la problématique a permis d'en déduire quelques principes et ainsi de généraliser l'approche en vue de l'appliquer à d'autres cas.

Traitant des lignes principales saturées, le présent document ne prend pas en compte le cas des lignes à simple voie.

2. Notions de capacité

De manière générique, la capacité peut se définir comme étant "*le nombre maximal de train susceptibles de circuler durant un intervalle de temps donné*". Toutefois, la capacité d'un réseau ferré n'est pas une valeur unique calculable à l'aide d'une formule. Elle est intimement liée à l'horaire et à sa structure. Ainsi, deux horaires peuvent, en fonction de la répartition spatio-temporelle des sillons avoir une capacité résiduelle différente et/ou nécessiter des investissements en infrastructures différents.

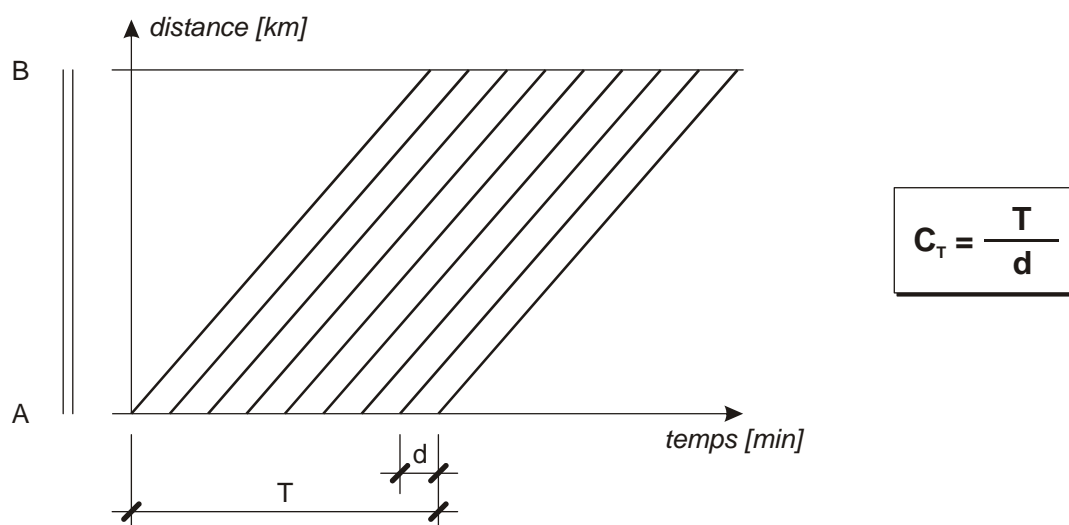
De même, les réserves de capacité dépendent des trafics considérés (catégories de trains et paires origine/destination). En effet sur une ligne donnée, des sillons peuvent être tracés pour un type de trains au détriment d'autres trains qui ne trouvent plus de place dans le graphique.

Au vu de cette complexité, il est nécessaire de rappeler les principales notions élémentaires.

2.1 Capacité d'une ligne à trafic homogène

Lorsque tous les trains parcourant une ligne donnée circulent à la même vitesse et s'arrêtent dans les mêmes gares et haltes, la capacité peut se calculer de manière relativement simple. En effet, dans les horaires graphiques (diagramme espace/temps représentant la marche des trains) tous les sillons (tracé défini pour un train) sont parallèles. La capacité dépend donc uniquement du distancement (temps de succession entre trains). La capacité se calcule donc ainsi (Fig. 1) :

Figure 1 Capacité d'une ligne à trafic homogène



La simplicité de cette formulation n'est toutefois qu'apparente. Lorsque les gares et haltes intermédiaires ne disposent que d'un quai par voie de circulation, la capacité globale de la ligne dépend de la capacité des gares. En effet, lorsqu'un train est arrêté, il limite la progression des circulations suivantes. La durée d'arrêt est donc un paramètre majeur (et variable en fonction de l'affluence) dans le calcul du temps de succession des trains.

Les lignes de métro sont des lignes à trafic homogènes, mais elles ne sont pas les seules. Les lignes les plus chargées des réseaux RER desservent les grandes villes européennes ou certains tronçons très chargés aux abords de grandes gares (jonction Nord-Midi à Bruxelles) sont souvent exploités avec des horaires homogènes. En effet, cette configuration est celle qui permet de maximiser la capacité, à moins que des effets réseaux n'introduisent des contraintes aux abords du tronçon en le plus chargé.

2.2 Capacité d'une ligne à trafic mixte

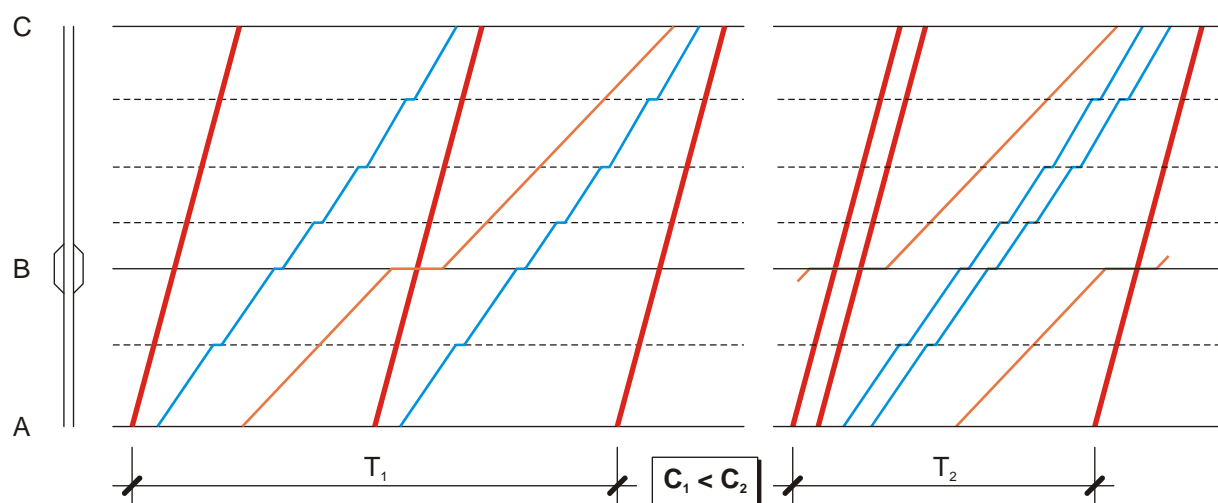
Le cas précédent peut être considéré comme un cas particulier. En effet, la plupart des lignes ferroviaires connaissent un trafic mixte. Elles sont parcourues par plusieurs types de trains ayant des missions différentes (arrêts desservis le long de la ligne). Il en résulte que les différentes circulations n'ont pas la même vitesse commerciale. Les sillons tracés dans le graphique horaire ne sont donc plus parallèles.

Au moins deux autres paramètres doivent encore être pris en considérations pour déterminer la capacité d'une ligne à trafic mixte :

- la distance entre deux gares permettant le garage d'un train lent pour le faire dépasser par un train plus rapide,
- l'ordonnement des différents types de sillons (ordre dans lequel les trains circulent sur la ligne).

La prise en compte du dernier paramètre implique qu'il n'est plus possible de concevoir une formule mathématique pour définir la capacité car cette valeur n'est plus unique. Seule la construction d'un horaire permet pour des conditions données de déterminer la capacité. La figure 2 permet d'illustrer ce propos en présentant deux structures d'horaires ayant des capacités différentes.

Figure 2 Capacité d'une ligne à trafic mixte (exemples)



Si l'arrêt d'un train lent pour lui permettre de se faire dépasser par un autre plus rapide permet d'augmenter la capacité de la ligne, cette mesure d'exploitation diminue la qualité de service du sillon le plus lent. Largement utilisée pour les trains marchandises, une telle mesure est difficilement applicable aux trains voyageurs. En effet, un tel arrêt dure au minimum 5 à 6 minutes (ligne équipée d'un block performant) ce qui impacte fortement la vitesse commerciale du sillon et par conséquent l'attrait commercial d'un tel train.

2.3 Capacité d'un réseau ferré

Hormis pour quelques lignes isolées, il est nécessaire de prendre en compte l'effet réseau lors de la détermination de la capacité. En effet, chaque ligne constituant un réseau ferré est en interaction avec ses voisins. Ainsi :

- les trains circulant sur les différentes lignes doivent se partager l'utilisation des voies de la gare de jonction,
- les trains parcourent souvent plusieurs lignes avant d'atteindre leur terminus,
- certains tronçons sont communs à plusieurs lignes.

Ces différents éléments introduisent des contraintes complémentaires qui influencent la capacité du réseau. Celle-ci ne peut se déterminer qu'avec la construction d'un horaire tenant compte de toutes les contraintes liées aux infrastructures et à l'exploitation.

La capacité d'un réseau ferré peut donc être définie comme étant le nombre maximal de train susceptibles de circuler dans des conditions données d'exploitation et de qualité de service.

Par conditions d'exploitation en entend notamment :

- la structure de l'horaire (cadencé ou non),
- l'itinéraire et la mission des trains (arrêts desservis),
- la proportion, ou les priorités entre trains de catégories différentes.

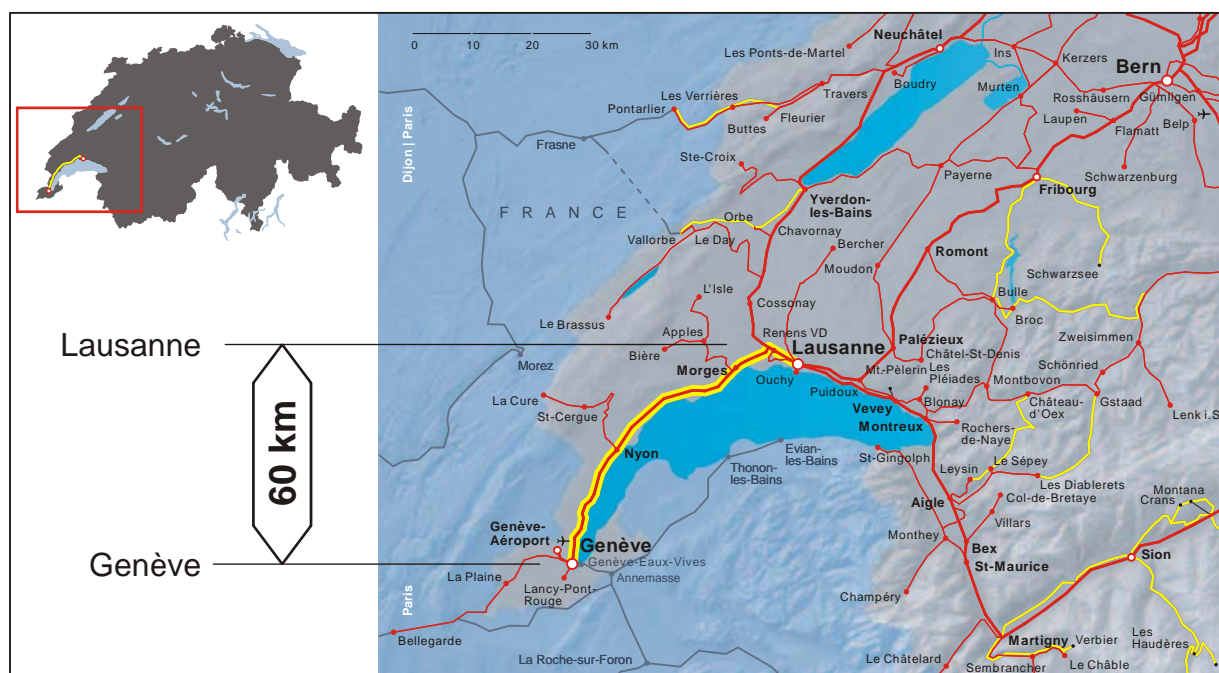
Quand à la qualité de service, elle tient compte de la robustesse du graphique (stabilité de l'horaire). En effet, la capacité d'un réseau diminue proportionnellement à l'augmentation des marges de régularité et de majoration des temps de parcours utilisées pour construire l'horaire.

3. Ligne Lausanne – Genève, situation et prévisions

3.1 Situation et trafic actuel

La ligne Lausanne – Genève peut être considérée comme l'épine dorsale du réseau ferré en suisse romande. Tout juste âgée de 150 ans, elle voit circuler chaque jour plus de 210 trains de voyageurs transportant quelques 38'000 passagers. La plupart de ces trains ne s'arrêtent pas à Lausanne, mais circulent également sur les trois autres lignes rayonnant autour de Lausanne, soit celle du Valais, du plateau (Fribourg, Berne, Zürich) et du Pied du Jura.

Figure 3 Ligne Lausanne – Genève dans le réseau ferré suisse romand



Source: carte CFF

L'horaire actuel, introduit avec Rail 2000, prévoit la circulation sur toute la ligne¹ de 6 trains voyageurs et un train marchandises par heure et par sens. Aux extrémités s'ajoutent encore les

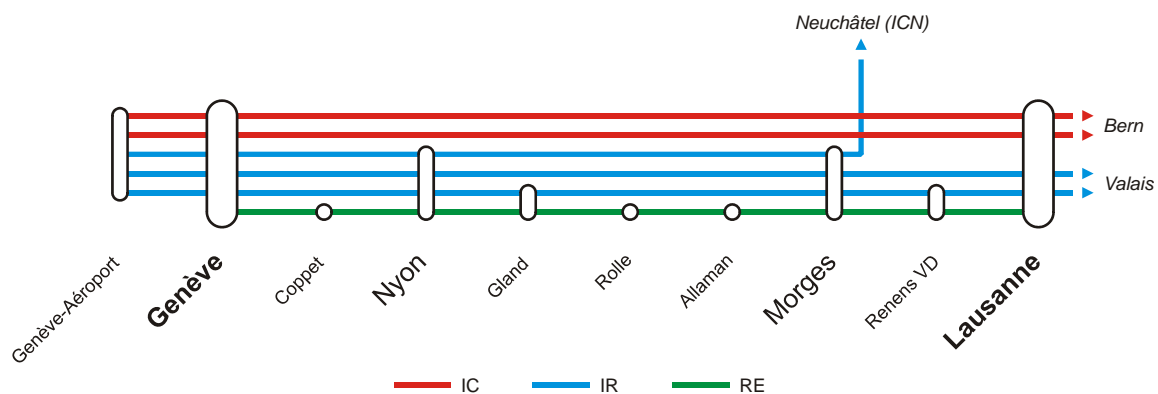
¹ Exception faite de l'ICN assurant les relations Genève – Neuchâtel sans passer par Lausanne. Ces trains utilisent le raccordement direct existant entre les deux lignes à la hauteur de la gare de triage de Denges (Lausanne-Triage).

trains régionaux (futurs RER) entre Lausanne et Allaman ainsi qu'entre Genève et Coppet (tronçon déjà équipé de trois voies). Les sillons voyageurs appartiennent à trois catégories de trains différentes :

- IC sans arrêt entre Lausanne et Genève (2 trains par heure de/pour Berne),
- IR desservant Morges et Nyon et éventuellement Renens et Gland (2 trains par heure de/pour le Valais et un pour Neuchâtel ne passant pas par Lausanne)
- RE desservant 7 arrêts intermédiaires (Renens, Morges, Allaman, Rolle, Gland, Nyon, Coppet) et assurant la correspondance avec de nombreuses lignes de bus régionales (1 train par heure faisant la navette entre Lausanne et Genève).

La figure ci-dessous présente schématiquement le schéma de déserte actuel sur la ligne Lausanne – Genève. Par raison de simplifications, seuls les trains de la ligne de Genève sont mentionnés sur le tronçon Lausanne – Renens, commun avec la ligne du Pied du Jura.

Figure 4 Ligne Lausanne – Genève offre actuelle



Depuis la mise en service de Rail 2000 en décembre 2004, la gare de Lausanne est un nœud de correspondances de type 15/45, c'est-à-dire que les trains IC, IR et RE s'y donnent rendez-vous deux fois par heure aux alentours des minutes 15 ou 45. Les trains IC servent de base à la structuration de l'horaire. Ils ne sont pas exactement cadencés mais espacés de 25/35 minutes. Ces contraintes (nœud de correspondance et cadence imparfaite) influencent directement les horaires et la capacité de la ligne Lausanne – Genève.

3.2 Développement de l'offre

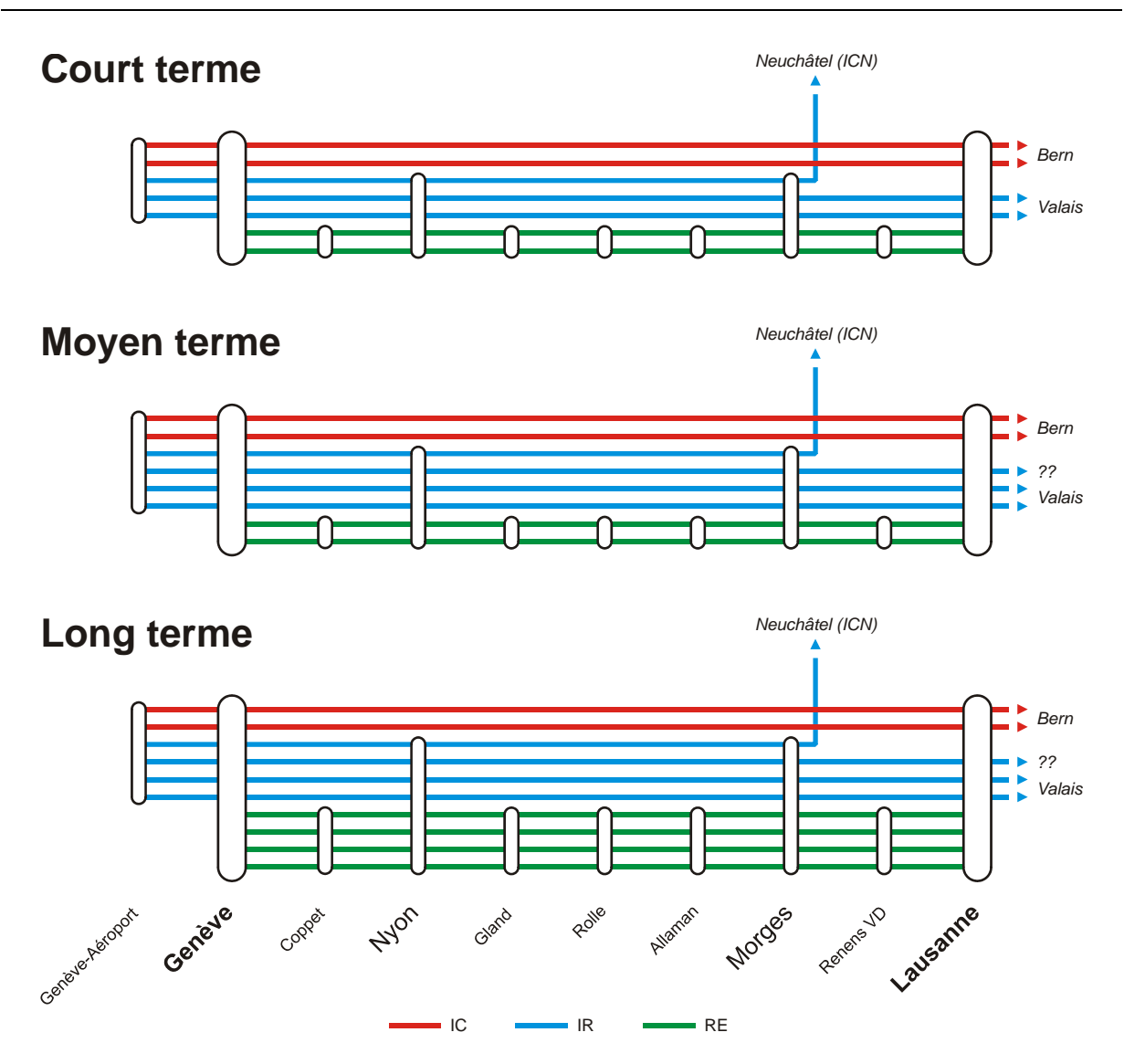
Depuis quelques années, l'arc lémanique (région comprise entre Lausanne et Genève) connaît une croissance démographique et économique supérieure à la moyenne nationale. Cette tendance ne devrait pas faiblir puisque les prévisions tablent sur une augmentation de la

population supérieure à 30 % pour les 20 prochaines années. Cette croissance a des répercussions directes sur les besoins en mobilité et par conséquent le demande tant routière que ferroviaire.

Au vu de la congestion croissante du réseau routier, une bonne partie de la croissance devra pouvoir être assurée par les transports publics et plus particulièrement le chemin de fer. Fort de ce constat, les cantons de Vaud et de Genève ont élaboré des scénarii d'augmentation de l'offre prenant en compte le trafic local (RER) mais également l'ensemble des relations entre les deux villes.

Trois horizons de planifications ont été définis. Ils sont associés à des objectifs en termes de nombre de trains.

Figure 5 Scénarii d'offre pour les trois horizons de planification



- Court terme ajout d'un deuxième RE dans la trame actuelle (total, 2 IC, 3 IR et 2 RE) tout en garantissant la circulation d'un sillon fret par heure et par sens ; l'introduction d'un deuxième RE doit permettre de supprimer les arrêts de Renens et Gland de l'un des IR ; pas de modification des horaires du nœud de correspondance de Lausanne,
- Moyen terme ajout d'un quatrième IR (total, 2 / 4 / 2) et cadencement parfait de tous les types de trains (30 ou 15 min), l'un des 4 IR ne dessert pas Lausanne (ICN),
- Long terme doublement du nombre de RE (total, 2 / 4 / 4) ce qui porte à 10 le nombre de trains voyageurs par heure et par sens ; au besoin il devrait être possible d'ajouter encore deux IC pour porter à 12 le nombre de circulations.

Sans se lancer dans de nombreuses études, il est évident qu'un tel développement de l'offre, tout en maintenant différents types de trains, ne pourra se faire sans aménagements ni construction de nouvelles voies. La demande pressante des cantons romands pour la prise en compte du projet dit de 3^e voie Lausanne - Genève dans les planifications nationales semble légitime. Par contre, des études sont nécessaires afin de définir l'ampleur et l'emplacement de ces nouvelles infrastructures.

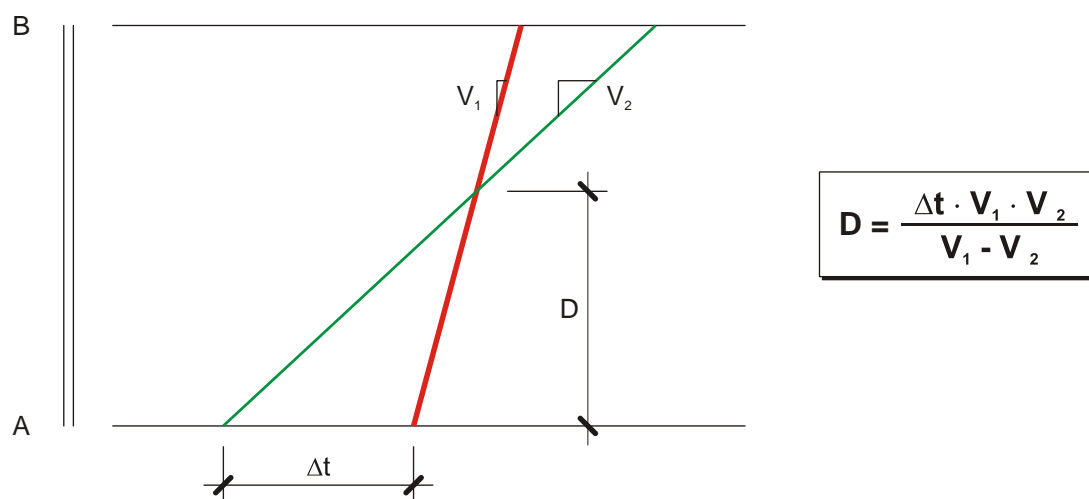
4. Problématique

4.1 Un seul sens de circulation

Lorsque des trains ayant des vitesses commerciales différentes doivent circuler sur une même ligne, la densification de l'offre conduit tôt ou tard à des problèmes de rattrapages / dépassements entre sillons. Ce problème est d'autant plus aigu que le différentiel de vitesse entre les trains est élevé.

Il est possible de définir approximativement la distance pouvant être parcourue avant que les sillons ne se rattrapent. Cette distance dépend de la vitesse commerciale de chaque sillon (inclinaison dans le graphique horaire) ainsi que l'espacement (en minutes) entre les deux départs (Fig. 6).

Figure 6 Rattrapage et distance parcourue avant rattrapage



En cas de modification de l'un des paramètres (vitesses de l'un des trains ou horaire de départ), le lieu de déplacement se déplace le long de la ligne.

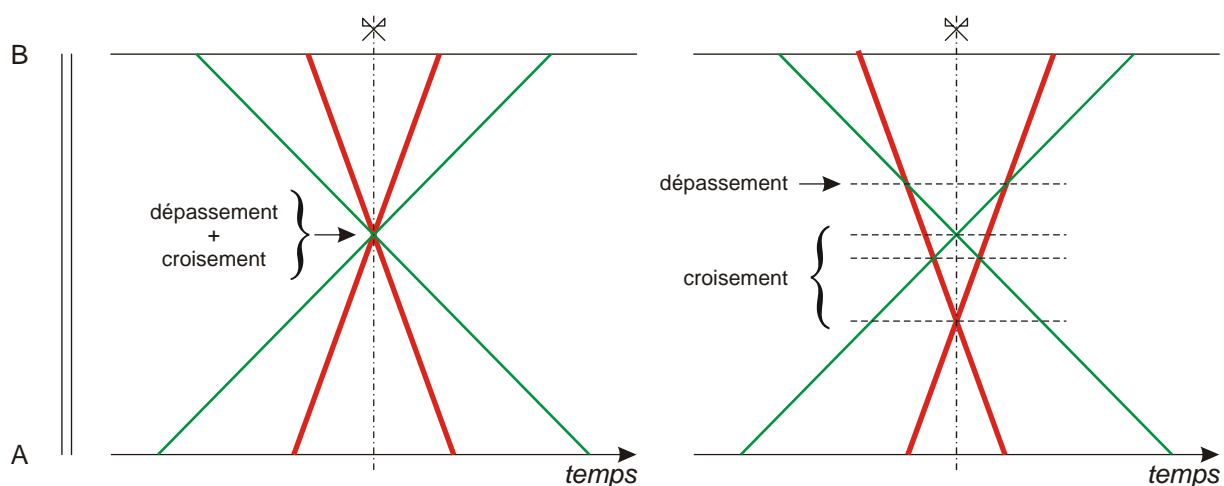
4.2 Interaction entre sens de circulation

Dans les horaires cadencés coordonnés (nœuds de correspondance avec même qualité de service offerte aux relations de sens contraires), les horaires de sens contraires sont symétriques. L'axe de symétrie généralement utilisé correspond à la minute 00. Les trains d'une même famille cadencés se croisent toujours à la minute de symétrie puis à intervalles réguliers correspondant à la moitié de la cadence. Par exemple des trains cadencés à la demi-

heure se croisent toutes les 15 minutes, aux minutes 00, 15, 30 et 45. Dans ce cas ces quatre minutes peuvent être considérées comme autant d'axe de symétrie dans l'horaire graphique.

Ainsi, lorsque le dépassement de deux trains doit avoir lieu aux alentours d'un axe de symétrie (min 00 ou un sous multiple), ce ne sont pas 2, mais 4 trains qui sont simultanément au même endroit (Fig. 7), et par conséquent nécessite 4 voies (ligne à 4 voie ou gare avec deux voies de circulation et deux autres voies de dépassement).

Figure 7 Dépassement sur l'axe de symétrie de l'horaire ou légèrement décalés



Cette situation est la plus contraignante et peut poser d'énormes problèmes lorsque le tronçon à 4 voies doit se situer dans une zone fortement urbanisée.

Certaines variantes d'horaire esquissées pour la ligne Lausanne – Genève présentent une telle configuration au droit de la gare de Rolle. Si les terrains sont dorés et déjà réservés pour une éventuelle 3^{ème} voie, il semble très difficile et coûteux d'implanter une 4^{ème} voie dans la traversée de cette localité en pleine expansion. D'autres solutions doivent donc être envisagées.

5. De multiples solutions très contrastées

Sans être exhaustif, ce chapitre tente de montrer que les solutions peuvent être très contrastées suivant le point de vue (gestionnaire d'infrastructure, opérateurs).

5.1 Minimisation des contraintes d'exploitation

Les entreprises ferroviaires (opérateurs voyageurs ou marchandises) souhaitent pouvoir faire circuler leurs trains avec le moins de contraintes possible. En cas de problème de capacité la solution la plus simple consiste à augmenter le nombre de voies. Une ligne à double voie passant ainsi à 3 ou 4 voies sur toute la longueur de la ligne. Dans certains cas cette augmentation peut se concrétiser par la construction d'une nouvelle ligne (par exemple ligne à grande vitesse ou nouveau tunnel de base).

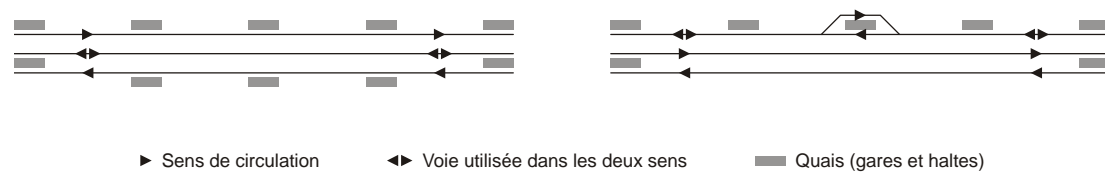
Le passage de deux à 4 voies est la solution qui est certes la plus chère mais offre la plus grande souplesse d'exploitation. En effet, avec deux voies par sens placées côte à côte, des dépassements actifs (les deux trains sont en mouvement) sont possible n'importe où sans gêne pour les trains de sens contraire. Une telle infrastructure permet également de faire circuler les trains rapides sur deux voies (une par sens) et les plus lents (régionaux et marchandises) sur les deux autres.

Quelques exemples de lignes à 4 voies existent en Suisse et à l'étranger. Une telle solution ne peut se généraliser pour différentes raisons, principalement financières. En effet, certaines zones fortement urbanisées, tel que l'arc lémanique, ne permettent pas d'envisager une telle solution sans d'énormes travaux et de nombreux ouvrages d'art. D'autre part, le doublement du nombre de voies risque de créer durablement des surcapacités difficilement justifiables économiquement. De tels aménagements ne devraient donc être envisagés, sauf cas exceptionnels, que lorsqu'une ligne à 3 voies est saturée.

Les lignes à trois voies peuvent déjà permettre de résoudre des problèmes de capacité. Toutefois, l'augmentation de la capacité est inférieure à 50 % car au moins l'une des voies doit être utilisée pour les deux sens de circulation, limitant de fait sa capacité. L'évolution de la capacité entre des lignes à 2, 3 puis 4 voies n'est donc pas linéaire.

Différentes typologies sont possibles quand à l'utilisation de chacune des trois voies (Fig. 8). Leurs avantages et contraintes sont brièvement présentés ci-dessous.

Figure 8 Typologie des lignes à trois voies



La première solution est la plus classique. Les voies extérieures sont réservées à un seul sens de circulation alors que la voie centrale banalisée peut être utilisée par tous les trains. Cette voie centrale est alors utilisée pour les dépassements actifs. Cette solution ne peut être envisagée que si les dépassements n'ont pas lieu sur l'axe de symétrie de l'horaire (c.f. § 4.2).

La deuxième solution consiste à mettre côte à côte une ligne à simple voie et une ligne à double voie. La ligne à double voie est destinée à supporter l'essentiel du trafic alors que la ligne à simple voie est destinée aux trains les plus lents c'est-à-dire les plus gênants du point de vue de la capacité. Comme sur les lignes à simple voie, des stations d'évitement sont nécessaires pour assurer le croisement des trains de sens contraire. La ligne possède donc des petits îlots à 4 voies.

La troisième voie construite entre Coppet et Genève est exploitée selon la deuxième typologie. La ligne est équipée d'un point de croisement et deux autres sont dorés et déjà prévus pour permettre de doubler la fréquence des trains.

5.2 Augmentation de l'offre à infrastructure constante

Les gestionnaires des infrastructures peinent parfois à réunir les financements nécessaires aux développements de leurs infrastructures. Il est alors nécessaire d'étudier des scénarii de développement de l'offre à "infrastructures constantes".

Sur une ligne saturée (à double voie), la seule solution permettant d'augmenter le nombre de trains sans ajouter de nouvelles voies, consiste à rendre plus homogène les différents sillons. Pour y parvenir, le nombre de type de trains ainsi que le nombre de missions (politique d'arrêt) doivent être diminués. Une telle démarche implique soit de supprimer quelques arrêts aux trains les plus lents, soit de ralentir artificiellement les trains les plus rapides (en ajoutant éventuellement quelques arrêts). De ce fait, sur les horaires graphiques les sillons deviennent parallèles (ou quasiment parallèles) évitant ainsi les dépassements gourmands en capacités.

De telles solutions sont envisageables, voire souvent nécessaire pour les lignes urbaines (type RER ou traversée de ville), notamment lorsqu'elles sont construites en tunnel. Dans le cas de

trafics urbains, la domestication des sillons n'est pas trop pénalisante car les vitesses commerciales restent supérieures à celles des autres transports publics urbains (bus et tramways).

Dans les autres cas et notamment lorsque ces mesures concernent des lignes relativement longues (pour exemple, 60 km séparent les gares de Lausanne et de Genève), leur effet sur les temps de parcours peuvent être relativement importants. D'autre part, ces mesures peuvent avoir des conséquences sur des trains au plus long parcours et ainsi annuler les gains de temps réalisés sur d'autres tronçons. L'impact de ces mesures sur la demande doit être analysée attentivement afin d'éviter un report modal contre productif.

5.3 Le matériel roulant, paramètre important du système

Les deux solutions présentées ci-dessus ne sont, sauf cas particulier pas applicable. Des solutions intermédiaires peuvent être trouvées, mais quelle que soit la solution, tous les éléments du système n'ont pas été optimisés. En effet, le matériel roulant est un composant essentiel du système ferroviaire. Ses performances et caractéristique peuvent influencer la capacité. En effet :

- la vitesse maximale, les performances de traction et de freinage, sans oublier le nombre, la largeur et la hauteur d'embarquement des portes, influencent la vitesse commerciale des trains et par conséquent la capacité en nombre de sillons,
- la longueur des rames, mais également le type de voitures (un ou deux étages) influencent la capacité de transport, soit le nombre de passager pouvant être transporté durant une période donnée.

L'allongement des trains ou l'affectation de nouveaux véhicules à deux étages permet d'augmenter le confort des voyageurs (plus de places assises offertes) sans nécessiter de travaux d'infrastructures autres qu'un allongement des quais et l'adaptation de leur hauteur. L'investissement se répartit donc entre les exploitants (matériel roulant) et le gestionnaire d'infrastructure.

Si ces mesures ne suffisent pas ou si la densification de l'offre répond à d'autres besoins (par exemple une meilleure répartition temporelle de l'offre), la première mesure devrait toujours être prise en compte. Elle vise à permettre l'accélération des trains les plus lents sans pour autant supprimer des arrêts. Afin de limiter au maximum l'impact de chaque arrêt sur la vitesse commerciale, les trains ayant des arrêts fréquents doivent avoir des caractéristiques d'accélération et de freinage aussi performantes que possible.

Sur les lignes connaissant des problèmes de capacités, il n'est pas rare de constater que les trains les plus lents sont non seulement pénalisés par le nombre d'arrêt mais également par les mauvaises performances de leur matériel roulant. En effet, les compagnies ferroviaires ont de tout temps affecté leurs véhicules les plus anciens aux relations les moins nobles.

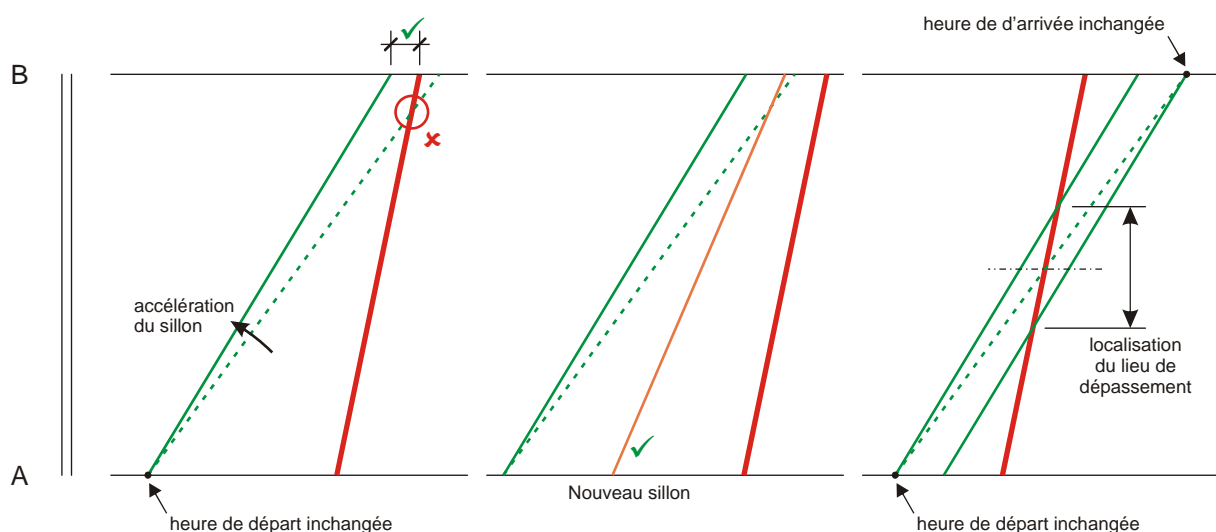
Ce n'est heureusement plus systématiquement le cas puisque certains matériels roulants commandés ces dernières années sont spécifiquement destinés aux trains régionaux. Toutefois certains réseaux ne profitent pas de ces renouvellements pour accroître (ou que partiellement) les performances de leurs véhicules.

Cette brève analyse montre qu'il reste une marge de progression. La question du matériel roulant doit donc être prise en considération dans la problématique de l'accroissement de la capacité bien que ce soit a priori un problème d'infrastructure.

5.4 Accélération du train le plus lent

Comme présenté ci-dessus, l'accélération du train le plus lent permet de diminuer le différentiel de vitesse entre les différents sillons. En pratique cela permet (Fig. 9) :

Figure 9 Impact sur la capacité de l'accélération du train le plus lent



- d'éviter le rattrapage d'un train par un autre si ce phénomène devait se produire peu avant une gare terminus ou une gare équipée d'une voie d'évitement,
- de dégager de la place dans le graphique horaire pour insérer de nouveaux sillons juste derrière le train lent,

- de déplacer le lieu du dépassement du train lent par un train rapide; cette modification permet, dans certaines limites, de choisir la position des nouvelles infrastructures nécessaires (3^{ème} voie ou voie d'évitement) afin de limiter les coûts de construction.

Une telle mesure ne permet pas à elle seule de résoudre tous les problèmes de capacités, mais elle est un facteur essentiel dans l'optimisation globale du système.

6. Ligne Lausanne – Genève, solutions envisageables

Sur la ligne Lausanne – Genève, l'augmentation de la capacité à court terme ne peut se faire qu'à infrastructure constante. En effet, hormis les questions budgétaires, les délais de réalisation de nouvelles infrastructures ne permettent pas d'offrir d'améliorations dans un délai raisonnable. Les cantons et les CFF ne souhaitant pas modifier la typologie de l'offre, les premières mesures ne peuvent donc concerner que le matériel roulant.

A plus long terme ces mesures ne suffiront sûrement pas et devront être combinées avec de nouvelles infrastructures. Des choix judicieux permettront toutefois de limiter l'ampleur des investissements.

6.1 Nouveau matériel roulant pour les RE

Exception faite des trains régionaux (limités aux tronçons extrêmes de la ligne), les trains voyageurs les plus lents sont les RE. Le matériel roulant affecté à ces circulations est le plus ancien encore en circulation sur le réseau. Conçu à l'époque pour des trains au long parcours, il n'est pas adapté à un service à arrêts fréquents sur une ligne fortement chargée.

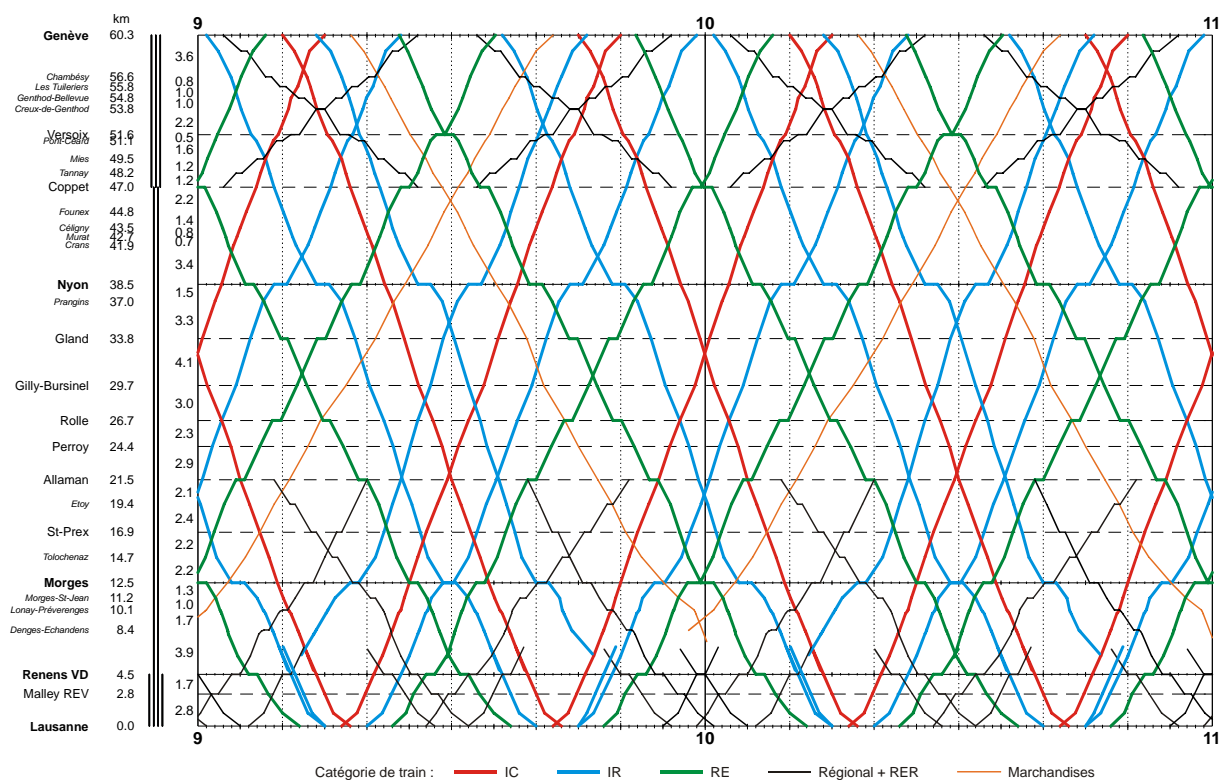
Quelques comparaisons montrent que les CFF possèdent ou ont commandé des automotrices plus performantes et mieux adaptés à ce type de trains. Ce sont d'une part les rames Flirt déjà en service (véhicule à un niveau circulant sur différents RER) et d'autre part la 3^{ème} série de trains à deux niveaux commandés pour le RER zurichois. Ces deux séries se caractérisent par une puissance massique de l'ordre de 20 KW/t (permettant des démarrages énergiques supérieurs à 1 m/s²) et de puissants freins.

Les calculs de marche effectués, pour les trains RE, avec ces deux types de véhicules montrent qu'il est possible de diminuer le temps de parcours entre Lausanne et Genève de 5 minutes, soit de près de 10 % (46 minutes au lieu des 51 actuellement à l'horaire). Ce gain est suffisamment significatif pour qu'il ait une influence sur la capacité de la ligne.

Ainsi, cela permet :

- à court terme la circulation d'un deuxième RE sans restrictions pour le trafic marchandises; au contraire, l'augmentation de la capacité est telle qu'elle permet d'améliorer la qualité de service des trains marchandises; en effet, ces trains n'ont plus besoin de s'arrêter sur la voie de dépassement de Gilly-Bursinel diminuant ainsi le temps de parcours Lausanne-Triage – Genève de plus de 20 minutes (Fig. 10).

Figure 10 Horaire Lausanne Genève avec 2 RE par heure (nouveau matériel roulant)



- à moyen terme d'éviter le rattrapage des sillons RE par les sillons IR et par conséquent d'éviter la construction (problématique et coûteuse) de nouvelles voies à l'entrée de Genève.
- à long terme d'éloigner de l'axe de symétrie le point de dépassement du RE par l'IC et ainsi de limiter les infrastructures nécessaires pour résoudre ce conflit (c.f. également ci-dessous dans le § 6.2).

6.2 Nouveaux tronçons à 3 voies

La modification du matériel roulant affecté aux trains RE ne suffit pas (excepté à court terme) à résoudre tous les problèmes de capacité de la ligne Lausanne – Genève. De nouveaux tronçons à trois voies seront nécessaires.

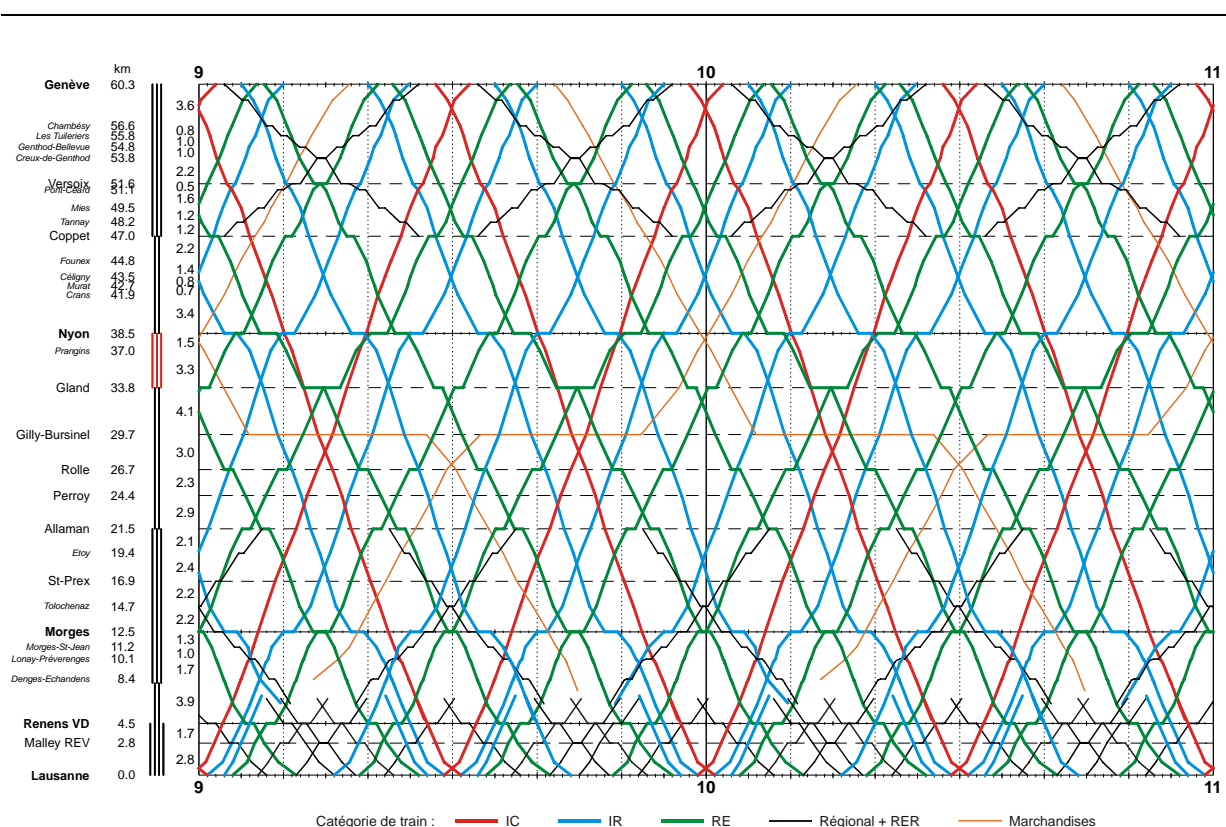
A moyen terme, le cadencement des IR au quart d'heure (avec introduction du 4^{ème} train de ce type) ne peut se faire sans nouvelles infrastructures entre Renens et Allaman. En effet, l'intervalle entre ces trains n'est pas suffisant pour permettre aux trains du Réseau Express Vaudois (REV, futur RER vaudois) d'arriver jusqu'à Allaman sans se faire dépasser. Pour

préserver le développement du RER vaudois, la solution envisagée s'inspire de celle retenue entre Genève et Coppet. L'étude de cas réalisée dans le cadre de cette recherche ne s'est pas attardé sur cette problématique et a pris comme hypothèse la réalisation, à terme, d'une troisième voie entre Renens et Allaman.

A long terme, le renforcement de la cadence des trains RE implique le dépassement de ces derniers par les trains IC. Comme mentionné ci-dessus, l'accélération du sillon RE permet d'éviter la construction d'un tronçon à quatre voies grâce à un déplacement du lieu de dépassement. Le dépassement peut se faire entre Gland et Nyon, moyennant les mesures suivantes :

- construction d'une troisième voie entre ces deux gares et modification du plan des voies de ces deux gares,
- utilisation de la voie centrale par les trains IC et des voies latérales par les trains RE,
- allongement des durées d'arrêts du train RE en gare de Gland et de Nyon.

Figure 11 Horaire à long terme avec 10 trains voyageurs par heure et par sens



Cette solution est celle qui minimise les nouvelles infrastructures tout en permettant l'augmentation du nombre de trains voyageurs à 10 voire 12 par heure et par sens. Tout allongement du tronçon de troisième voie permet d'augmenter la stabilité de l'horaire. Il faut

toutefois veiller à ce que les deux sillons IC ne se gênent pas mutuellement à l'entrée/sortie de la troisième voie. Seule une analyse de stabilité permettra de déterminer précisément la longueur nécessaire des nouvelles infrastructures.

7. Conclusions

Cette recherche a permis de montrer que pour résoudre des problèmes de capacité il est nécessaire de prendre en compte tous les éléments du système ferroviaire et pas uniquement ceux liés aux infrastructures. Le matériel roulant est souvent considéré comme une contrainte et non pas comme un paramètre à part entière.

La réforme des chemins de fer tend à confirmer cette manière de pratiquer. En effet, les problèmes de capacités sont du ressort du gestionnaire de l'infrastructure alors que le choix du matériel roulant dépend des opérateurs. Le premier ne peut pas imposer au second d'acheter de nouveaux trains pour limiter ses dépenses d'infrastructures. L'optimisation du système n'est alors plus possible. Il est donc primordial que tous les partenaires travaillent ensemble pour conduire le chemin de fer sur la voie du succès.

8. References

- Hachemane, P. (1997) Evaluation de la capacité de réseaux ferroviaires, *Ph D Thesis*, **1632**, EPFL Lausanne.
- Noordeen, M. (1996) Stability analysis of cyclic timetables for a highly interconnected rail network, *Ph D Thesis*, **1435**, EPFL Lausanne.
- Putallaz Y. (2007) Gestion stratégique de la capacité et de la maintenance d'un réseau ferré, *Ph D Thesis*, **3852**, EPFL Lausanne.
- Wägli, H.G. (1998) Réseau ferré suisse, Atlas technique et historique, *ISBN 3-905111-21-7*, As Verlag Zürich
- Kräuchi, C. and U. Stöckli (2004) Plus d'entrain pour la Suisse, L'histoire de Rail 2000. *ISBN 3-909111-07-6*, As Verlag Zürich
- CFF, (2008) 150 ans Lausanne-Genève-La Plaine : Quelques données historiques, <http://www.sbb.ch>
- Canton de Vaud, (2006) Vers une mobilité durable: les transports publics vaudois à l'horizon 2020, Département des infrastructures, Service de la mobilité, Lausanne sept. 2006