



Métro Grand Paris

DOSSIER DES ÉTUDES

Exploitabilité du Métro Grand Paris (RATP)

SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

NOTE MOT D 2010 5164

03 mars 2010 version 8

Exploitabilité du Métro Grand Paris

1. Introduction

Le dimensionnement du Métro Grand Paris prévoit pour l'exploitation des lignes bleue et verte un intervalle d'exploitation minimum de 90 puis 85 secondes sur toute la partie de la ligne bleue (ORLY \leftrightarrow ROISSY) pour tenir compte des évolutions de trafic. Le principe d'exploitation est illustré par la figure ci-dessous.

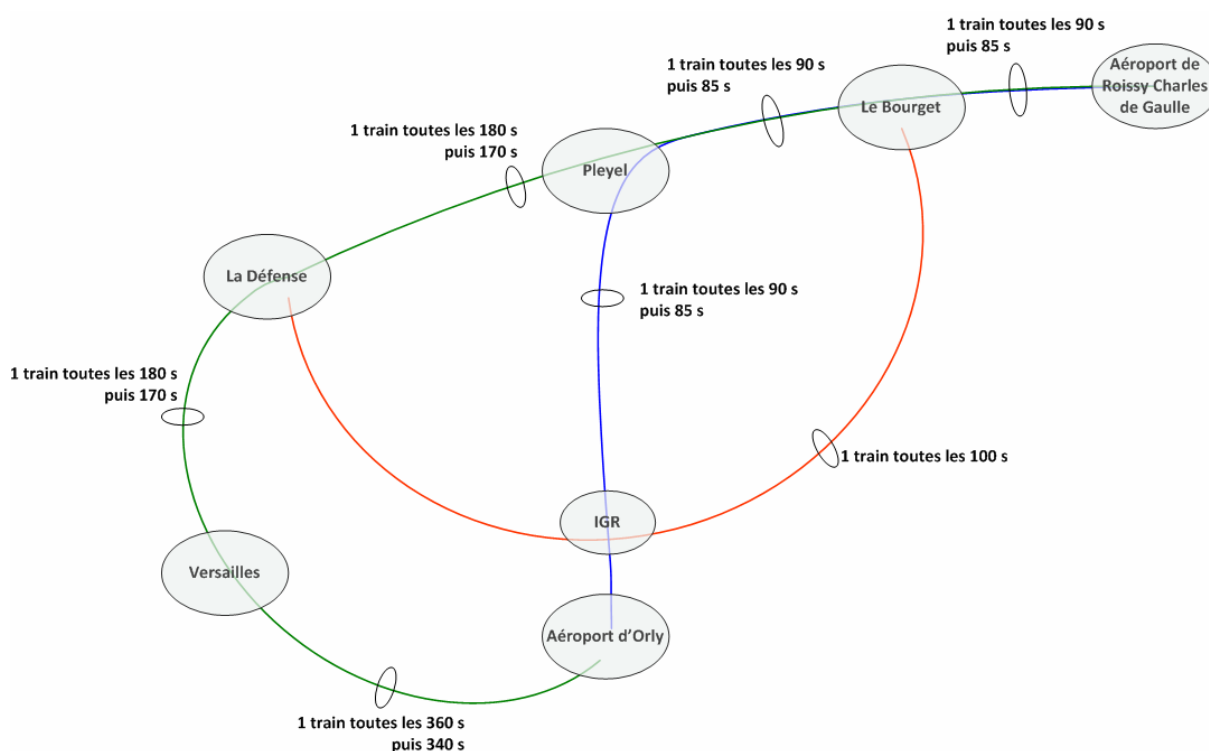


Figure 1 – Schéma de principe de l'organisation de la desserte

- Suite aux études de dimensionnement, il a été décidé d'étudier l'exploitabilité d'un tel réseau et notamment sa stabilité et sa robustesse ainsi que sa sensibilité aux perturbations.

La présente note a pour objet d'étudier l'exploitabilité des lignes bleue et verte complètes avec un intervalle d'exploitation de 90 secondes puis de 85 secondes.

Pour ce faire, le Métro Grand Paris a été modélisé et simulé via outil de simulation dynamique appelé OpenTrack. Il est capable de reproduire un horaire, et de le simuler en lui intégrant des perturbations aléatoires. Avec cet outil, on dispose d'un modèle réaliste (infrastructure, matériel roulant et système de conduite modélisés) qui permet de créer des scénarios de simulation d'exploitation en fonction des besoins.

En particulier, le but de l'étude est de vérifier la stabilité de l'exploitation, c'est-à-dire la capacité du système et des infrastructures à rentrer dans l'horaire suite à des perturbations. Pour se faire, les perturbations introduites dans la modélisation ont été volontairement amplifiées de l'ordre de dix fois supérieures à la réalité de la L14.

2. Hypothèses de simulation

2.1. Matériel roulant

Du fait du tronç commun entre la ligne bleue et la ligne verte le Matériel roulant est un matériel roulant pneumatique type MP05 à 8 voitures :

- Longueur 120 mètres ;
- Freinage de service 1.1 m/s².

2.2. Infrastructure

La modélisation des lignes bleue et verte a été faite avec les données du débat public et les caractéristiques suivantes :

- Le plan et le profil ne sont à ce jour pas encore connus (incidence possible sur les temps de parcours) ;
- Aucune restriction de vitesse n'a été prise sur l'entrée des gares. L'intervalle dynamique n'est donc pas minimal.
- Les caractéristiques de Pleyel sont les suivantes :
 - Un quai dédié pour chaque type de mission dans chaque sens
 - Un sas de régulation en amont de la convergence en sortie de la gare de Pleyel, permettant de lancer les trains à la vitesse optimale de libération de l'appareil de voie.
- Les deux terminus principaux Roissy et Orly ligne bleue ont été équipés d'une infrastructure à trois voies de type quais décalés qui permet :
 - De définir un battement suffisant ;
 - une bonne capacité d'absorption des trains et une circulation souple en arrière gare ;
 - De disposer de deux quais d'expédition.
- Le troisième terminus, Orly et les terminus intermédiaires : Pleyel et La folie sont quant à eux équipés d'une infrastructure classique à deux voies.

2.3. Système de conduite

Un système de conduite de type cantonnement mobile (moving block) est modélisé. Il permet un intervalle optimal en tout point du parcours d'un train (qui est fonction de la position du train le précédent et des points d'arrêts d'exploitation).

Aucune limitation de vitesse n'a été prise c'est pourquoi l'intervalle minimal atteint 70 secondes (30 stationnements+38 dynamiques) Il est possible de le faire baisser d'environ **5 à 6 secondes** selon les marges prises en fixant une optimisation de la vitesse en entrée de gare (comme sur le tronçon central de la ligne A équipé en SACEM)

La marge d'exploitation minimale est toutefois avec cette modélisation de 20 secondes (avec un intervalle de 90 secondes). Elle est donc très supérieure à celle disponible sur la ligne A (10 secondes) et sur la future ligne 1 en mode automatique (12 secondes). Il est toutefois probable que certaines gares du Métro Grand Paris possèdent un temps de stationnement supérieur à 30 secondes.

2.4. Régulation

Avec le système de conduite, est implanté une régulation « type ligne 14 ». La vitesse des trains en mode nominal est volontairement inférieure à celle de la marche type tendue :

- Sur la portion de la ligne 14 et la zone de Pleyel (intergare en amont et en aval) cette détente est de 7% ;
- Sur le reste de la ligne, la détente est fixée à 4 % (similaire à une détente RER).

La boucle de régulation implantée (figure 3) fait qu'à chaque gare le train va comparer son horaire théorique par rapport à son horaire réel. Si son retard est supérieur au seuil défini (7 secondes) il va automatiquement se circuler en marche accélérée (marche type tendue) dans l'intergare suivante. C'est donc une **régulation d'horaire** qui est définie.

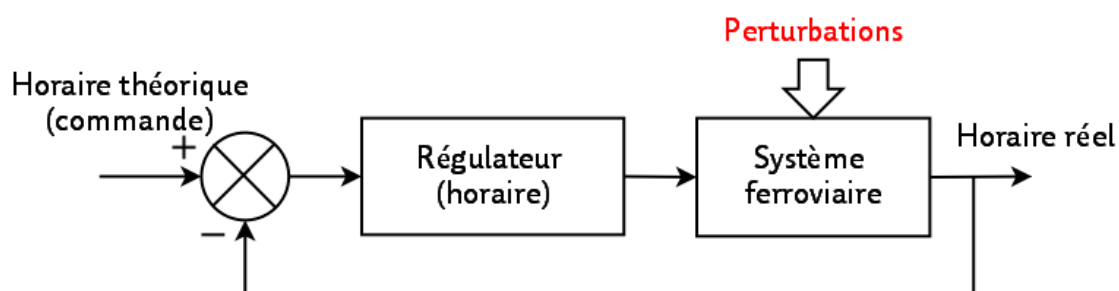


Figure 3 – Boucle de régulation modélisée dans l'outil de simulation

Le retard total pouvant être absorbé sur chaque ligne s'élève donc à :

- **135 secondes** sur la ligne bleue (Orly → Roissy via Paris) ;
- **153 secondes** sur la Ligne verte (Orly → Roissy via La défense).

3. Définition de la simulation

Le but de la simulation est d'étudier la stabilité des lignes bleue et verte du Métro Grand Paris. Contrairement aux deux études concernant Pleyel et les terminus, il s'agit dans ce cas d'une

simulation **macroscopique**. L'objectif étant d'observer le comportement général des lignes face à une série de perturbations aléatoires.

Afin d'obtenir des résultats invariants d'une simulation à une autre, la simulation a été réalisée en reproduisant un horaire de pointe (exploitation à intervalle minimum) sur une très longue période. Une simulation de 1000 trains par voie a été donc définie. Cela correspond à une simulation de 26 heures exploitation dont 24 à horaire établi (le temps de parcours d'un terminus à l'autre étant d'environ une heure, il faut ce temps pour atteindre l'horaire de pointe en régime établi sur l'ensemble des lignes).

Au total, c'est donc un horaire comportant **2500 missions** qui a été modélisé et simulé (trains bleu foncé, bleu clair et verts dans chaque sens).

Les incidents de type surstationnement ont été **volontairement exagérés** afin de simuler un trafic très dégradé, beaucoup plus que sur une ligne de métro (traditionnelle ou automatique). Ces incidents se produisent dans la simulation de manière **aléatoire**.

Il résulte du réglage des perturbations **que 40 % des trains** de chaque mission (vert, bleu foncé et bleu clair) sont impactés par les probabilités de surstationnement définis dans chaque gare. Ces surstationnements définis autour d'une distribution exponentielle vont de 5 secondes à 50 secondes en fonction des gares. Comme pour l'étude de Pleyel les perturbations engendrant la mise en place d'un service provisoire ne sont pas traitées car le système n'est alors plus exploité de la même manière.

Par contre, contrairement à l'étude de Pleyel, l'occurrence des perturbations insérées est beaucoup plus forte. L'objectif n'est en effet pas de reproduire une journée type d'exploitation mais de déstabiliser le système en certains points et observer l'évolution des perturbations le long de la ligne.

La figure suivante illustre la répartition des perturbations importantes définies sur le réseau. Cette répartition consiste bien sur à dégrader l'exploitation là où c'est le plus péjorant comme par exemple en amont des convergences.

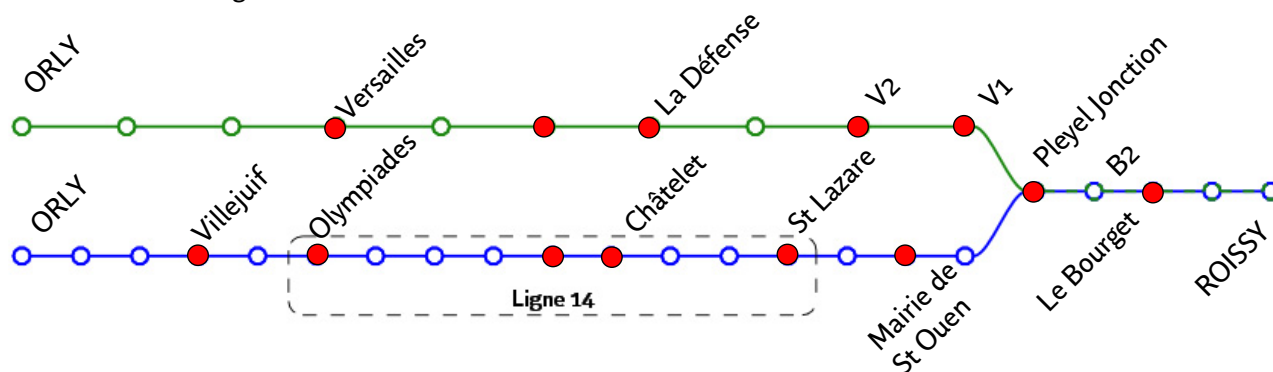


Figure 3 – Répartition des perturbations « fortes » sur les lignes

Dépassement du temps de stationnement simulé à Chatelet (voie1)

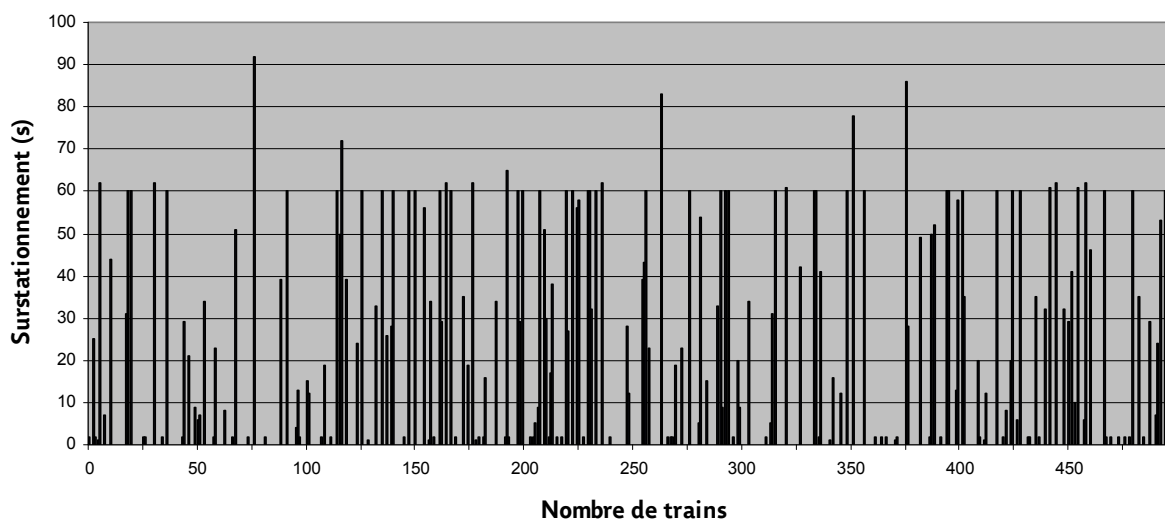
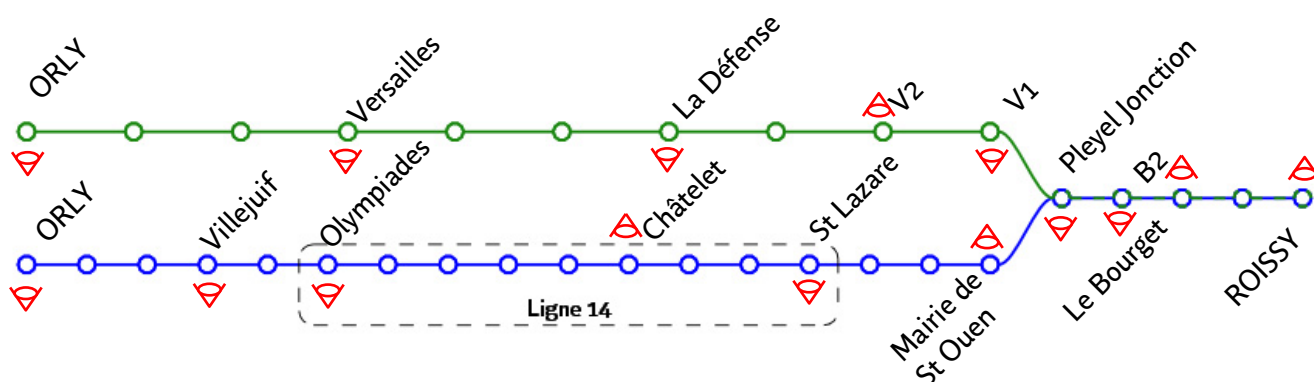


Figure 4 – Représentation du dépassement du temps de stationnement généré par l’outil de simulation



Une fois la simulation terminée, commence la part de l’analyse. Pour ce faire, des observateurs permettant de recueillir les données importantes tout au long de la simulation ont été placés le long des lignes (figure 5).

Figure 5 – Répartition des observateurs sur les lignes

A l’aide de ces observateurs, les informations suivantes sont collectées à chaque passage d’un train :

- N° du train ;
- Vitesse ;
- Horaire (réel et théorique) ;
- Intervalle par rapport au dernier train ;
- Nombre de passage.

4. Résultats d'exploitation à 90 secondes

La première simulation a consisté à définir un horaire théorique pour répondre à un intervalle minimum de 90 secondes. A la suite de la simulation, trois paramètres principaux sont évalués pour étudier la stabilité et l’exploitabilité des lignes.

- L’évolution du taux d’irrégularité le long de la ligne : Cette notion permet d’observer le comportement ou la réponse du système face aux perturbations. Elle est donc directement fonction de l’intensité des incidents simulés. C’est donc l’évolution du taux d’irrégularité le

long de la ligne qui est à observer. Il donne des indications quand à la convergence ou à la divergence du système face à une dégradation de l'exploitation.

Il est calculé comme un coefficient de variation ; c'est-à-dire en faisant le rapport entre l'écart type et la moyenne des intervalles relevés. Il permet de mesurer la dispersion relative de l'intervalle d'exploitation.

- La distribution et l'évolution du retard : Le retard maximum des trains permet de mesurer l'intensité des perturbations mis en place mais aussi de la propagation de celles-ci. Car 40 % des trains ont subi un surstationnement qui vont, si ils sont supérieur à la marge d'exploitation, avoir une incidence sur le train suivant. Avec le retard final (retard des trains à l'entrée du terminus), on peut mesurer la capacité des lignes à résorber le retard et noter le battement qui sera nécessaire aux terminus afin de ne pas propager une perturbation d'une voie sur l'autre.
- L'augmentation du temps de parcours. Avec une exploitation très perturbée, le temps parcours va augmenter car les trains ne circuleront plus à vitesse nominale. Cette notion permet d'appréhender la performance du système de conduite.

4.1. Evolution du taux d'irrégularité

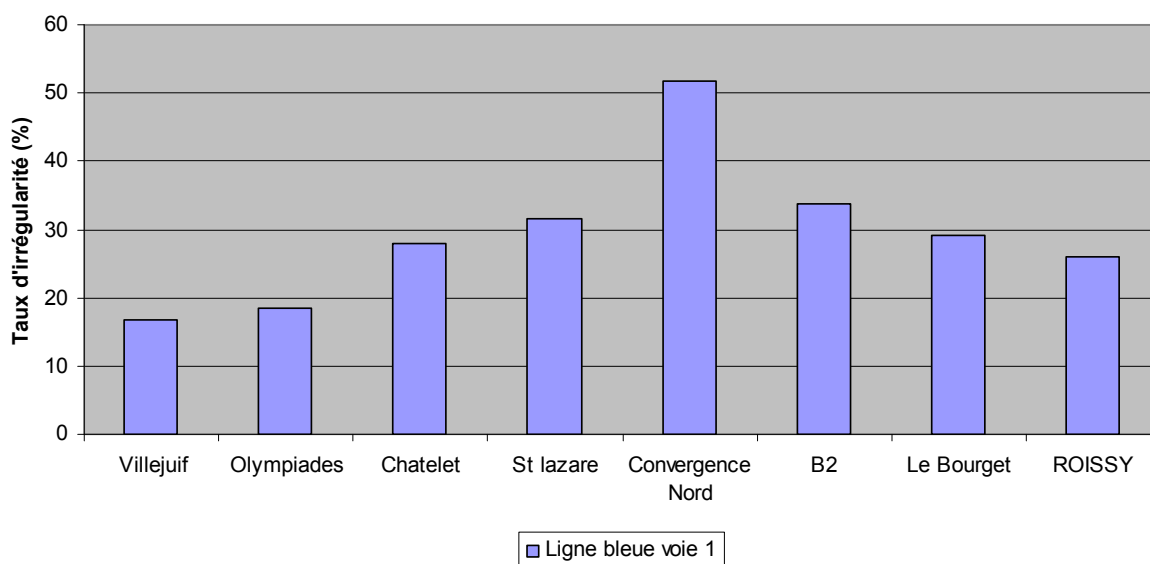


Figure 6 – Evolution du taux d'irrégularité sur la voie 1 de la ligne bleue

On observe une montée progressive du taux d'irrégularité qui est fonction des perturbations rencontrées et notamment sur la partie Ligne 14 où les perturbations sont les plus fortes. Au passage de la convergence, ce taux monte à plus de 50 %. C'est l'endroit où les trains verts rencontrent les trains bleus et donc l'intervalle se dégrade sensiblement. Mais, grâce à la longue intergare entre Pleyel et B2, le taux d'irrégularité retombe à un niveau légèrement supérieur à celui de St Lazare. Ensuite ce taux décroît jusqu'au terminus ce qui montre que le système converge.

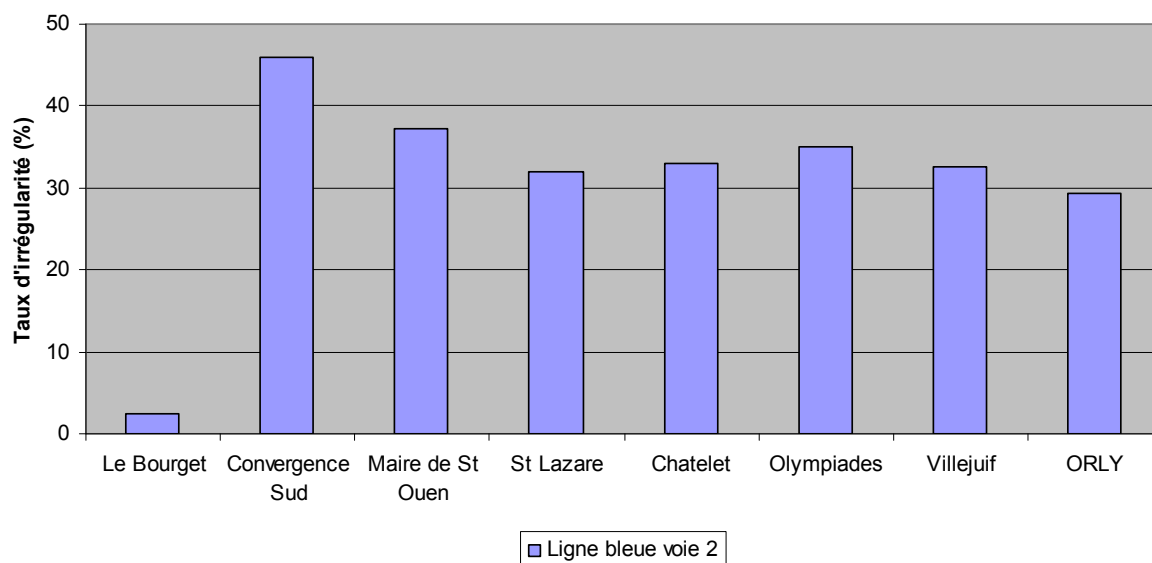


Figure 7 – Évolution du taux d'irrégularité sur la voie 2 de la ligne bleue

Sur la voie 2, le taux d'irrégularité est très important à partir de la convergence sud car pour créer des perturbations, les trains bleu ciel (trains tournant au terminus de Pleyel) ont eu très peu de battement au terminus intermédiaire. Les perturbations voie 1 se propagent donc sur la voie 2. Ensuite, grâce à la marge de régulation le taux d'irrégularité baisse avant de remonter sur la partie Ligne 14 où, comme sur la voie 1 de grosses perturbations sont insérés. Comme pour la voie 1 l'irrégularité décroît par la suite mais, à Orly son taux est supérieur par rapport à Roissy.

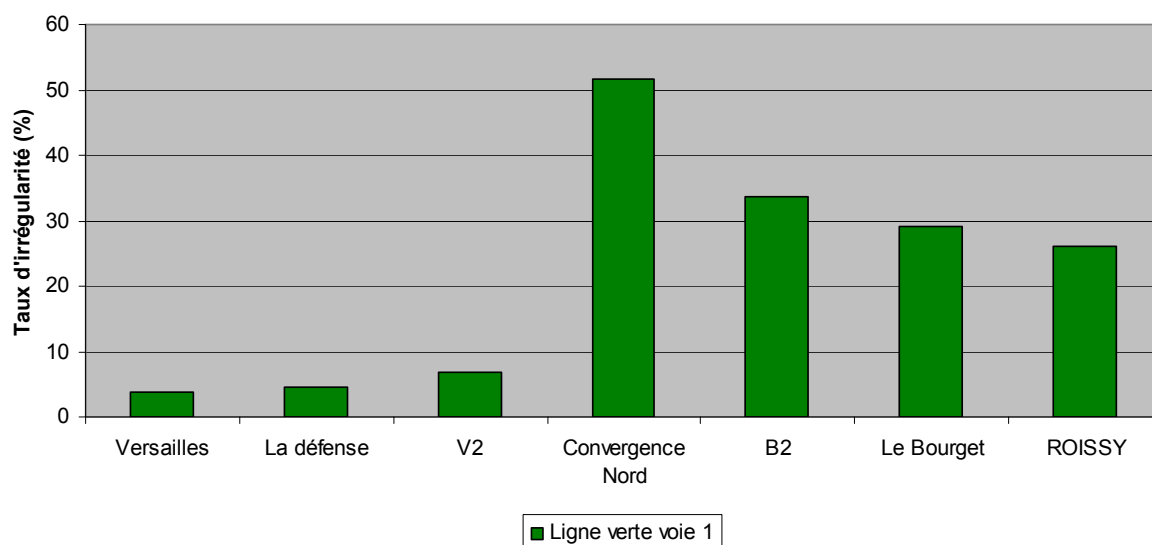


Figure 8 – Évolution du taux d'irrégularité sur la voie 1 de la ligne verte

Sur la ligne verte le taux est très faible car l'intervalle est de 3 minutes jusqu'à Pleyel. Puis à la convergence avec les trains bleus l'intervalle devient très irrégulier (cf. description figure 6)

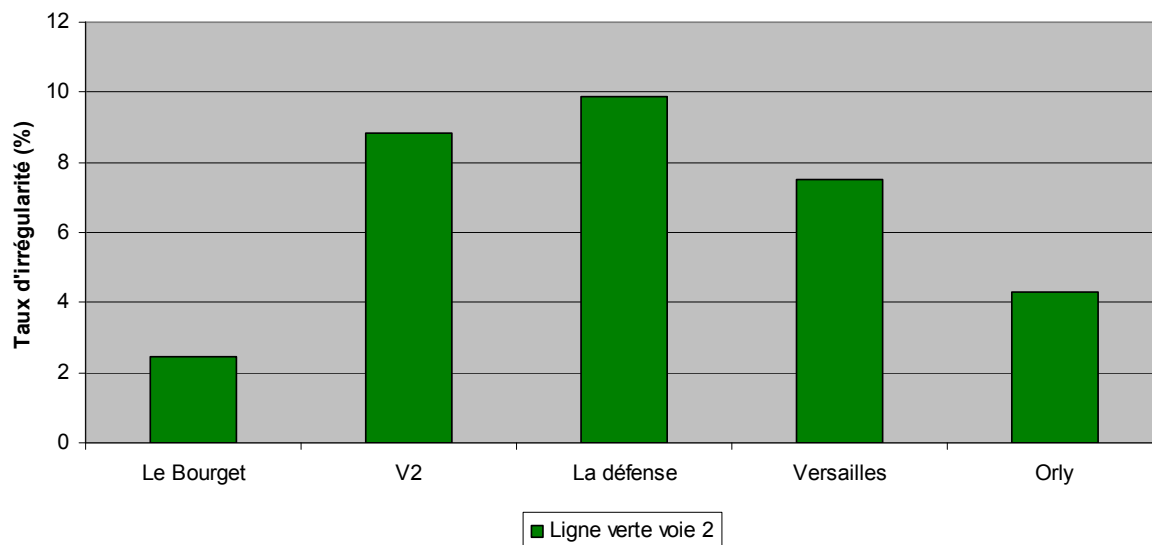
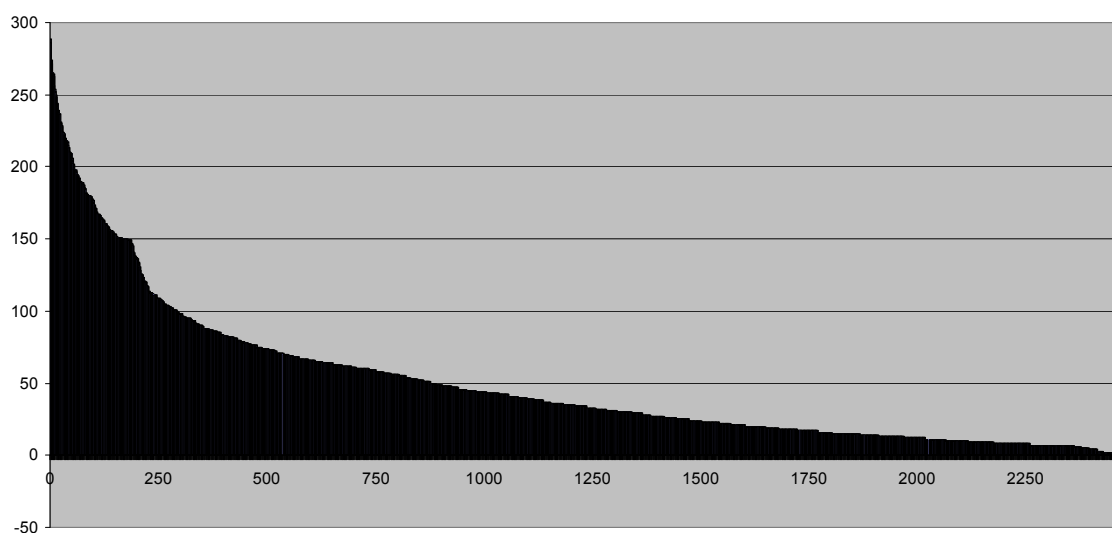


Figure 9 – Evolution du taux d'irrégularité sur la voie 2 de la ligne verte
Malgré des perturbations importantes générées entre Pleyel et la Défense, le taux d'irrégularité reste sous la barre des 10%. Grâce à des intergares longues qui permettent une grande marge de régulation les trains de la ligne verte restent donc à intervalle très régulier tout le long de la ligne.

4.2. Distribution du retard

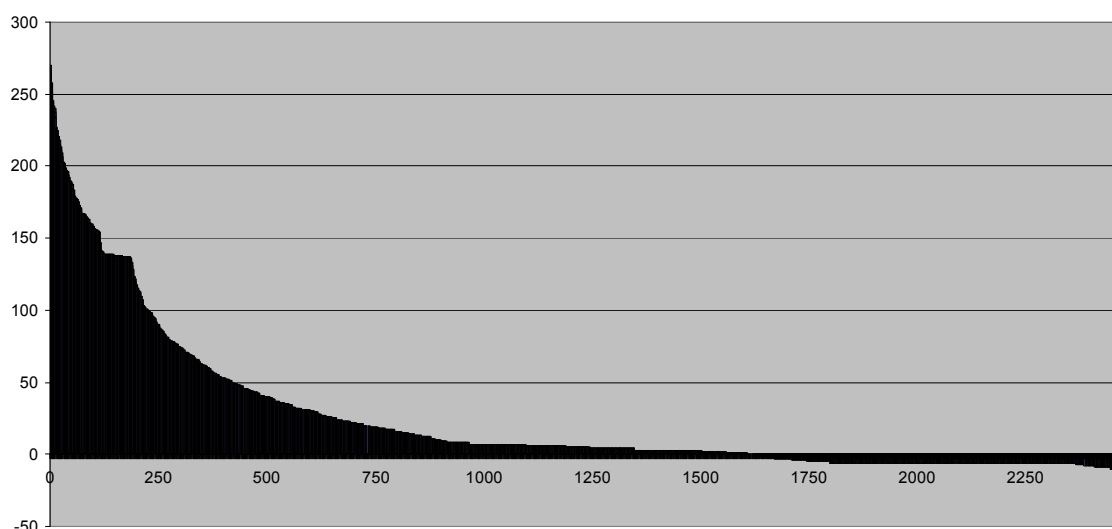
Les deux histogrammes suivant illustrent le taux de retard. Avec pour le Premier le retard maximum des trains. Il s'agit pour chaque train du retard maximum par rapport à son horaire qu'il a eu en ligne. Le second histogramme présente pour chaque train le retard final c'est-à-dire à l'entrée du terminus.

Retard maximal des trains moyenne = 50,3 secondes



Avec cet histogramme on observe que tous les trains ont un retard par rapport à leur horaire. Cela est dû à la propagation des perturbations car il n'y a pas de régulation d'intervalle de mise en place.

Retard final des trains moyenne = 24,4 secondes



A l'entrée des terminus, tous les retards inférieurs à 50 secondes ont à peu près été résorbés. C'est grâce à la régulation en ligne qui permet aux trains de circuler en marche accélérée. La moyenne du retard a donc été divisée de moitié pour atteindre un niveau acceptable. Pour environ 10 % des trains, le retard est tout de même conséquent. Avec une configuration de terminus autorisant du battement et un temps de retournement très faible comme celui modélisé (terminus à trois voies à quais décalés) un retard ne devrait pas être propagé d'une voie sur l'autre.

4.3. Temps de parcours

Mission	Augmentation du temps de parcours
Bleu clair → Nord	+ 2,3 %
Bleu clair → Sud	+ 2,9 %
Bleu foncé → Nord	+ 2,10 %
Bleu foncé → Sud	+ 2,42 %
Vert → Nord	+0,98 %
Vert → Sud	+ 0,74 %

Malgré de fortes perturbations et grâce à un système de conduite performant les temps de parcours moyens sont très peu impactés. C'est un bon indicateur de performance du système surtout sur une course d'une heure. Il faut tout de même noter qu'avec une régulation d'intervalle qui retient les trains en gare le temps de parcours risque d'augmenter légèrement.

4.4. Indicateurs d'exploitation

Tous ces résultats de simulation sont intéressants pour analyser la réponse aux perturbations ainsi que le comportement général des lignes. Mais il est difficile de comparer ces résultats bruts

avec l'exploitation d'une ligne classique. C'est pourquoi il est intéressant d'utiliser l'indicateur « Indice Global Trafic » (IGT) qui donne en pourcentage le reflet de l'offre réel par rapport à l'horaire théorique et permet de mettre en exergue une régularité effective. Cet indice est calculé en faisant le rapport entre l'intervalle réel équivalent (qui prend en compte l'irrégularité moyenne) et l'intervalle notice équivalent (dans notre cas l'intervalle théorique).

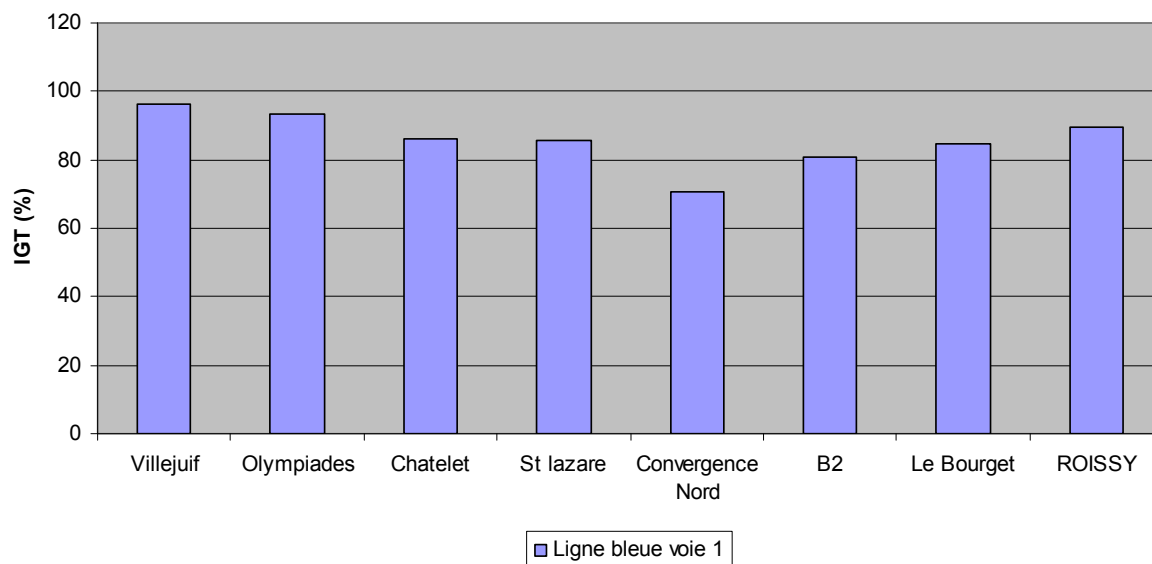


Figure 10 – Evolution de l'IGT sur la voie 1 de la ligne bleue

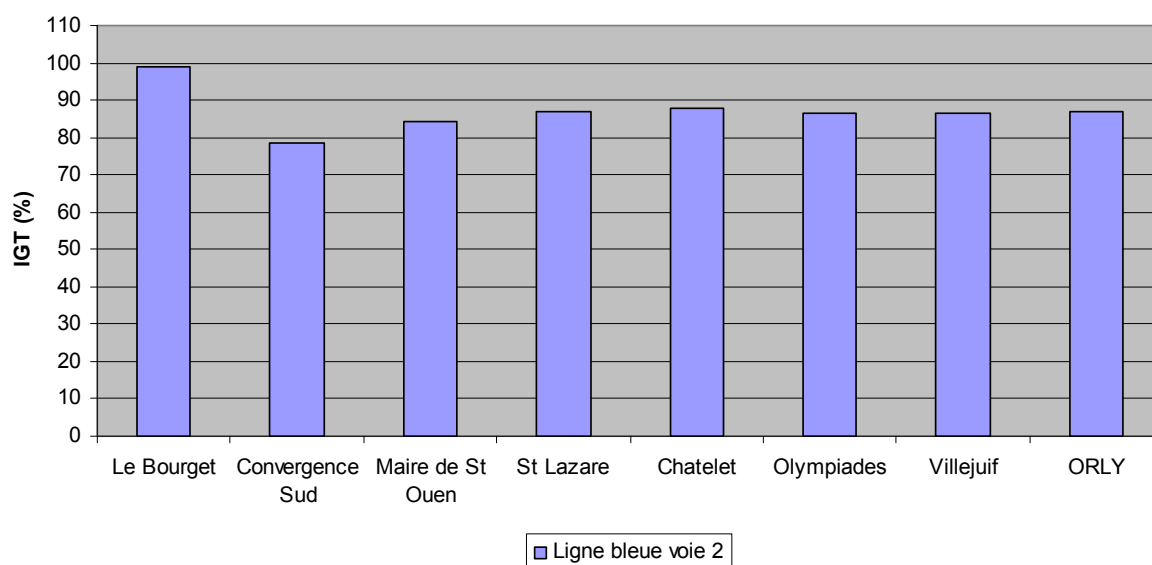


Figure 11 – Evolution de l'IGT sur la voie 2 de la ligne bleue

L'analyse de ces graphiques reste la même par rapport à ceux présentés auparavant. C'est-à-dire que la ligne diverge au moment de la Jonction des deux lignes ce qui est relativement normal. Puis, grâce à la régulation d'horaire implantée, le taux d'IGT remonte jusqu'aux terminus.

Par rapport à une ligne automatique, ce taux est assez bas. Il ressemble plus à celui que l'on retrouverait sur une ligne traditionnelle. Mais **les perturbations insérées sont beaucoup plus répétitives et importante que la normale.**

4.5. Conclusion

Malgré de fortes perturbations beaucoup plus importante par rapport à une journée type, les lignes ne divergent pas c'est un facteur important de stabilité.

Concernant le retard, toutes les microperturbations sont absorbées en ligne. Le taux d'irrégularité et le retard final sont supportables par les terminus (capacité, battement et train de réserve d'exploitation). **Une perturbation ne se propage donc pas d'une voie à l'autre.**

Avec une réelle régulation (d'horaire et d'intervalle) et un taux perturbation « objectif » ces deux lignes présenteront un taux de régularité similaire à celui de la ligne 14.

Il est important de noter que les conclusions relatives à la stabilité de l'exploitation ne sont en aucun cas détachables de tous les éléments mentionnés ci avant y compris dans les notes connexes (terminus, fonctionnement de Pleyel, performance du système de conduite)

5. Résultats exploitation à 85 secondes

Avec le même taux de perturbation et la même topographie, un horaire est créé pour répondre à un intervalle d'exploitation de 85 secondes qui pourrait être nécessaire pour absorber la demande de transport. La simulation qui équivaut à 26 heures d'exploitation permet de reproduire les mêmes conditions de simulation (loi des grands nombres).

5.1. Evolution du taux d'irrégularité

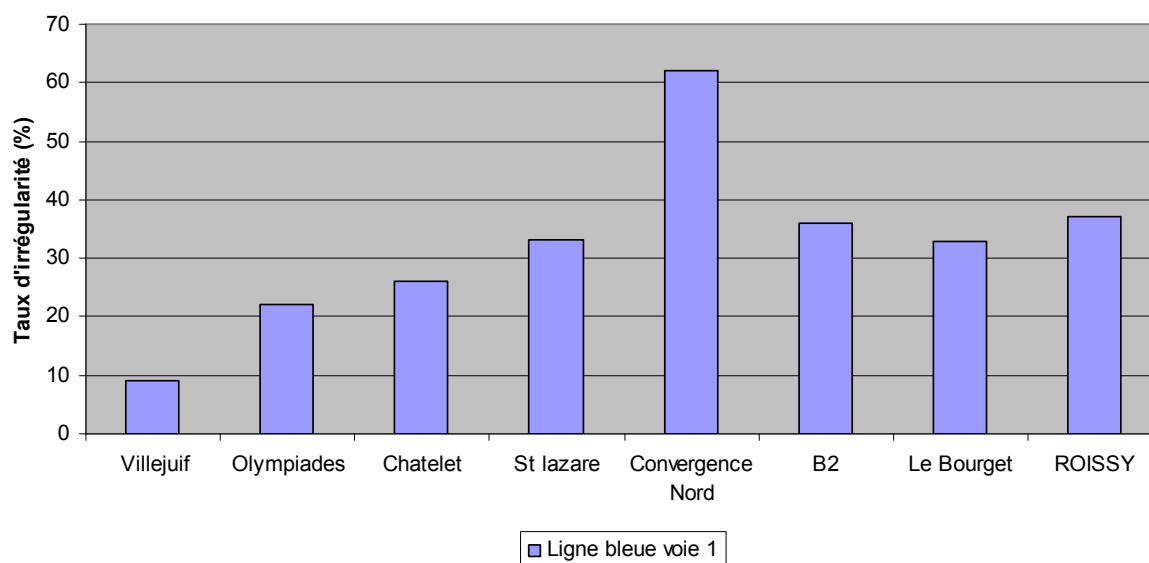


Figure 12 – Evolution du taux d'irrégularité sur la voie 1 de la ligne bleue

Ce graphique a une allure similaire comparé à la simulation d'intervalle à 90 secondes mais avec un niveau d'irrégularité supérieur. La seule différence concerne le terminus de Roissy où l'irrégularité remonte. Cela peut s'expliquer par la mixité des missions sur ce tronçon commun. Les trains verts arrivent avec un intervalle assez régulier et un retard moindre du fait de la grande marge de régulation de la ligne verte. Les trains bleus quand à eux, sont les seuls réellement impactés par la diminution de l'intervalle. Ils arrivent donc à la convergence avec un intervalle très disparate et un retard conséquent. De fait, la majorité des trains bleus vont être en marche accélérée. Cela crée donc un déséquilibre entre les trains bleus et verts qui agit sur l'irrégularité.

La figure ci-dessous illustre le déséquilibre en terme d'intervalle. On remarque que l'intervalle des trains verts entre eux est relativement centré autour de l'intervalle moyen alors que 20 % des trains bleus sont très dispersés (tout en étant regroupés à des intervalles soit grands soit faibles). En annexe, les graphiques d'intervalle sous forme de nuage de point sont représentés de la gare B2 au terminus de Roissy. Ils illustrent l'évolution du déséquilibre de l'intervalle entre les trains bleus et verts.

Avec une régulation d'intervalle appropriée, cette irrégularité pourra s'atténuer en limitant justement la marche accélérée quitte à absorber moins de retard.

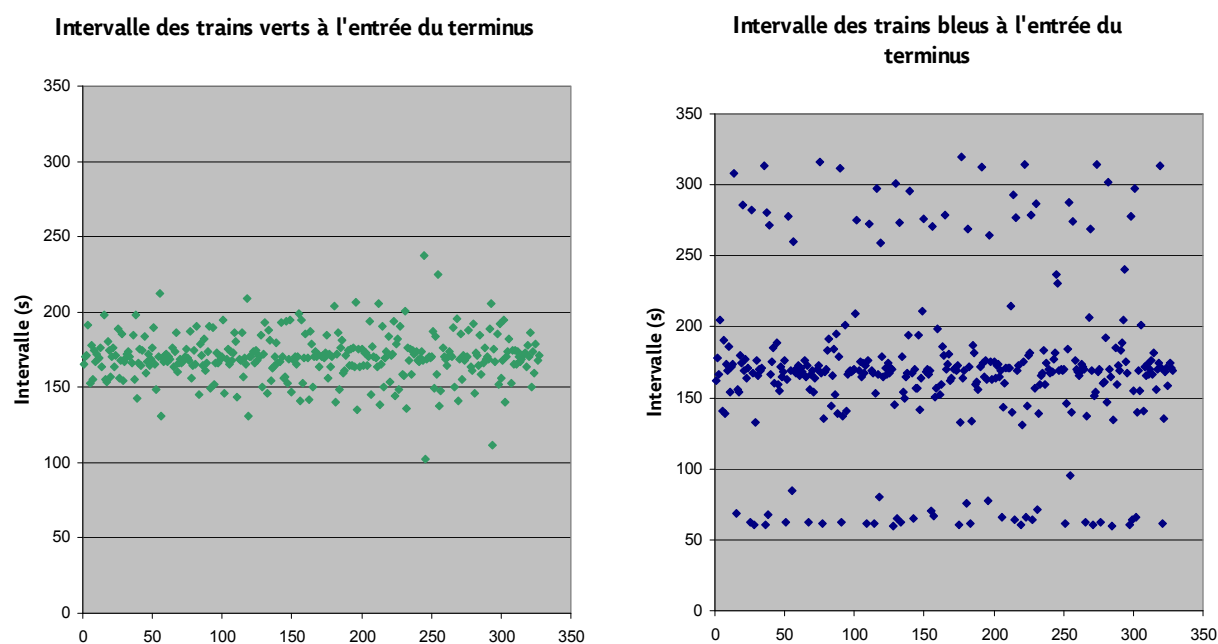


Figure 13 – Intervalle des trains bleus et verts à l'entrée du terminus

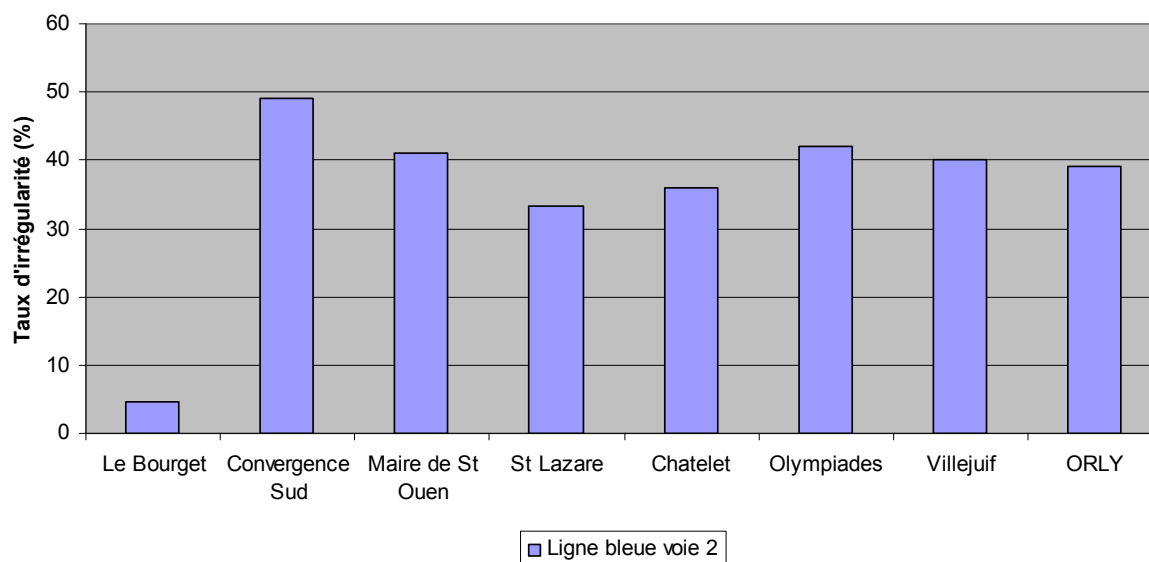


Figure 14 – Evolution du taux d'irrégularité sur la voie 2 de la ligne bleue

Concernant la voie 2 l'allure des courbes est également similaire par rapport à la simulation d'intervalle à 90 secondes. Le niveau de l'irrégularité est également plus important. A Orly on retrouve bien cette fois une convergence avec un taux qui redescend légèrement.

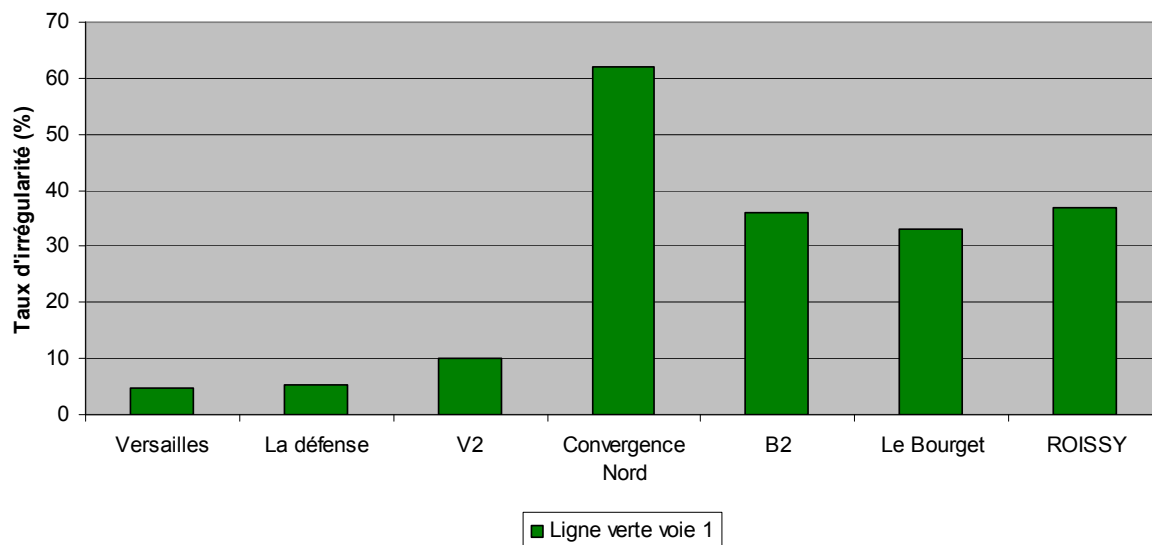


Figure 15 – Évolution du taux d'irrégularité sur la voie 1 de la ligne verte
La partie tronc commun avec la ligne bleue est considérée figure 12.

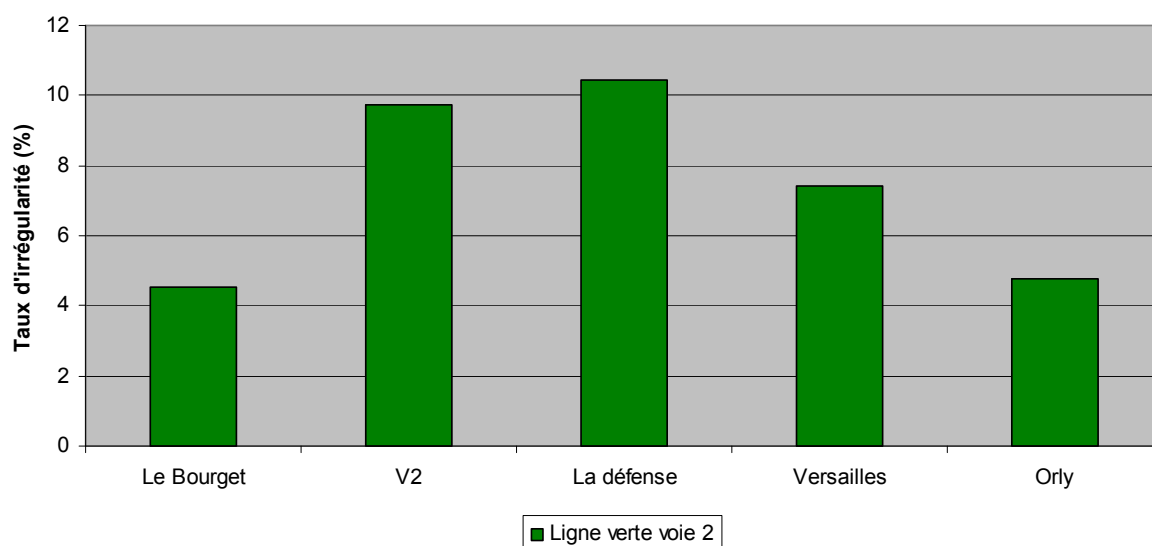
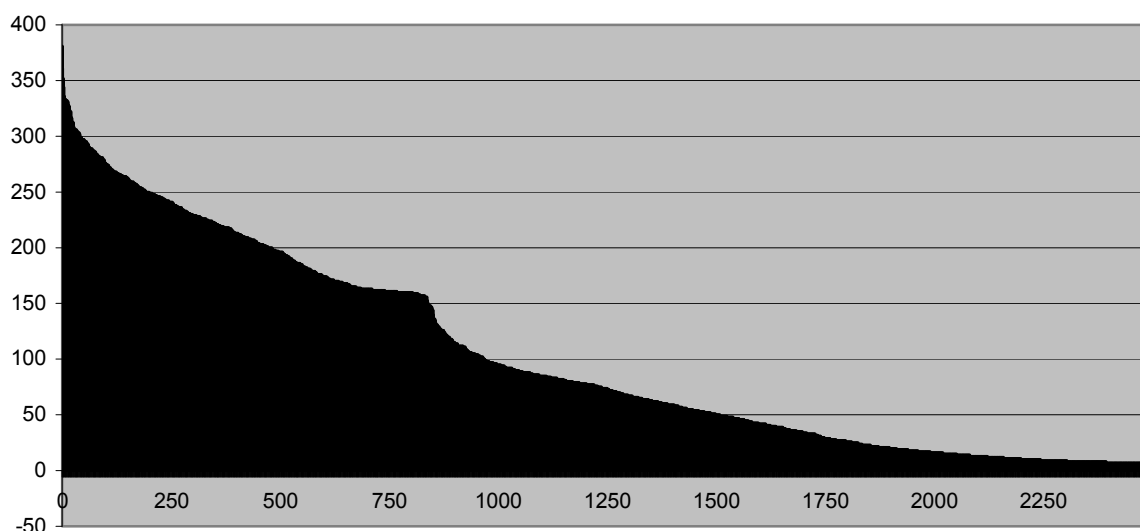


Figure 16 – Evolution du taux d'irrégularité sur la voie 2 de la ligne verte

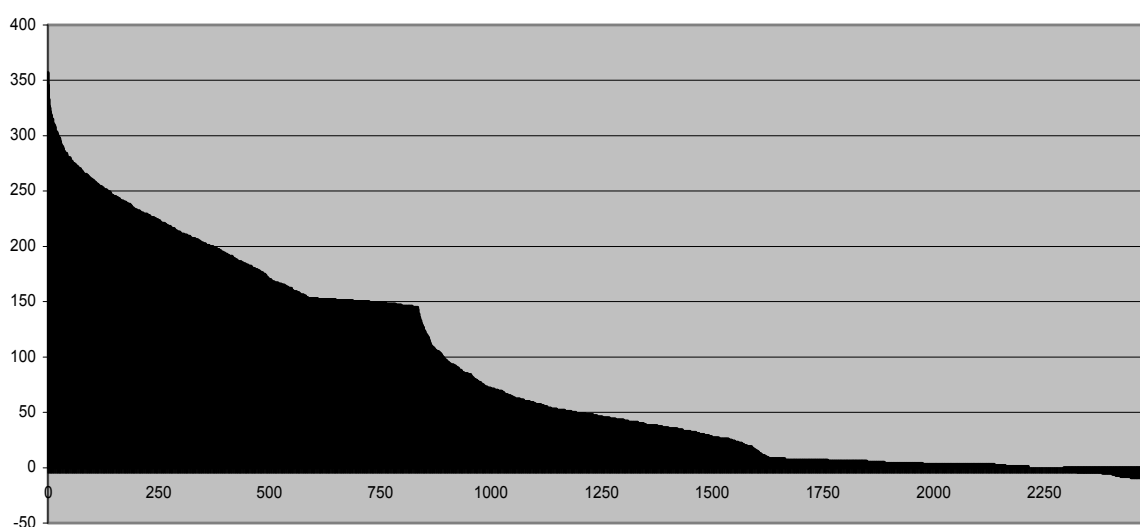
Ces deux figures montrent que la ligne verte n'est pas impactée par cette réduction d'intervalle. En effet, pour cette ligne l'intervalle d'exploitation passe à 170 secondes ce qui laisse une marge d'exploitation très importante. De plus la ligne verte ayant les intergares les plus longues la majorité des retards sont absorbés en ligne.

5.2. Distribution du retard

Retard maximal des trains moyenne = 102,2 secondes



Retard final des trains moyenne = 83,4 secondes



Les deux graphiques ont la même allure que pour la simulation à 90 secondes. Par contre le taux moyen de retard maximal est doublé et plus de 30 % des trains ont un retard de plus de 150 secondes. L'amplification des perturbations est donc plus importante du fait de la perte d'une partie de la marge d'exploitation. Concernant le retard final il reste assez important les microperturbations sont toujours absorbé par le système. On constate par contre une performance moins importante de la marge de régulation. Les trains ayant accumulé beaucoup de retard sont en majorité en marche accélérée et ont donc plus de mal à revenir à un intervalle régulier (amplification des perturbations).

A taux de perturbation égal, on augmente de 20 % le retard final que l'on peut qualifier de conséquent. Il sera donc plus complexe au niveau des terminus d'absorber un tel taux de retard et de

ne pas le propager sur la voie suivante. Cela milite donc pour la conception de terminus de capacité convenable afin de maximiser la possibilité battement. Le besoin portera également pour des terminus souples avec une grande capacité d'absorption de trains arrivant à intervalle dégradé et d'une facilité de manœuvre en arrière gare.

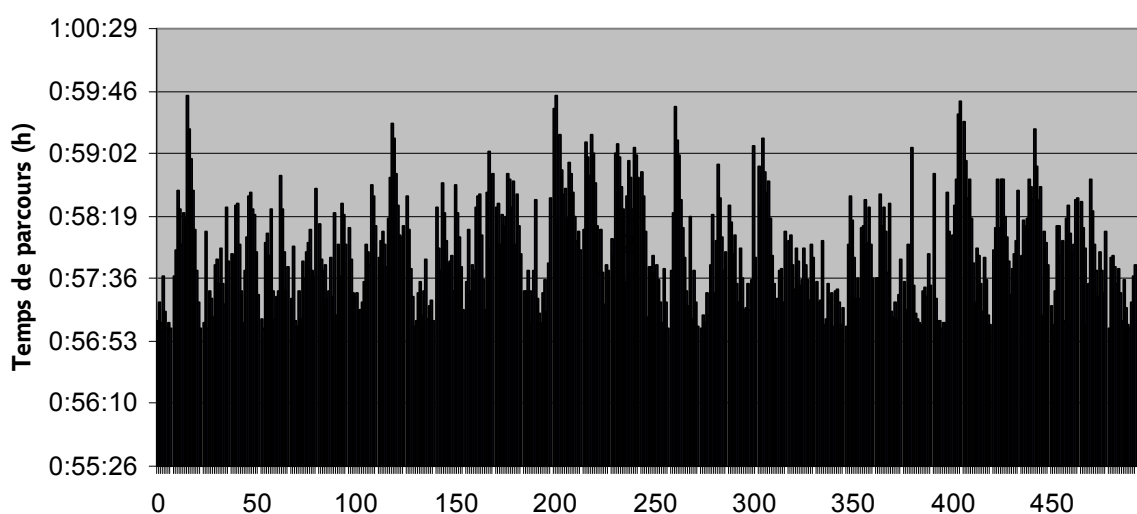
A l'expédition des trains, il ne suffit pas de renvoyer les trains à intervalle constant mais aussi d'être très proche de l'horaire théorique. Car, comme les lignes sont à fourche (dans les deux sens) il y a un point de « rendez-vous » à respecter au niveau de la convergence.

5.3. Temps de parcours

Mission	Augmentation du temps de parcours
Bleu clair → Nord	+ 3,8 %
Bleu clair → Sud	+ 4,2 %
Bleu foncé → Nord	+ 2,1 %
Bleu foncé → Sud	+ 3,2 %
Vert → Nord	+ 0,78 %
Vert → Sud	+ 0,67 %

L'augmentation moyenne des temps de parcours est assez faible par rapport à l'augmentation du taux de retard. Cela est dû au fait que la majorité des trains sont en marche accélérée. La partie des trains les plus retard ont bien sur un temps de parcours plus important. Le graphique ci-dessous illustre la disparité des temps parcours pour les trains ayant pour mission Roissy → Orly.

Temps de parcours des trains ayant pour mission Roissy → Orly



5.4. Indicateurs d'exploitation

Les deux graphiques suivant illustrent comme pour la simulation à 90 secondes les résultats sous la forme d'indicateur IGT. On note, comme pour les graphiques d'irrégularité une légère diminution de la performance des lignes, mais qui ne remet pas sensiblement en cause la stabilité de l'exploitation. Le retard des trains ne rentre pas en compte dans cet indicateur.

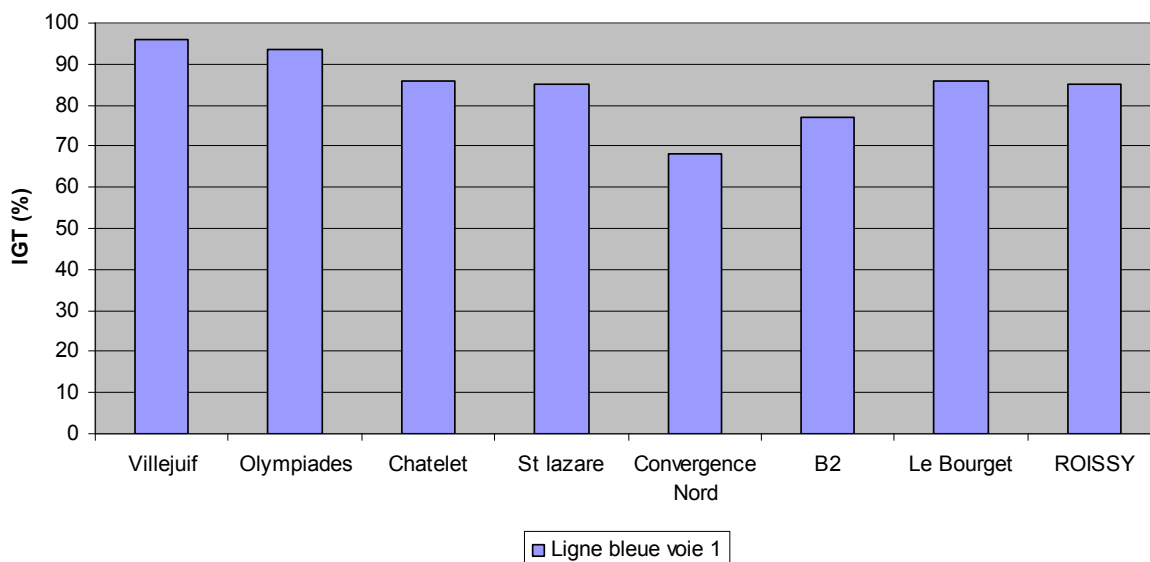


Figure 17 – Evolution de l'IGT sur la voie 1 de la ligne bleue

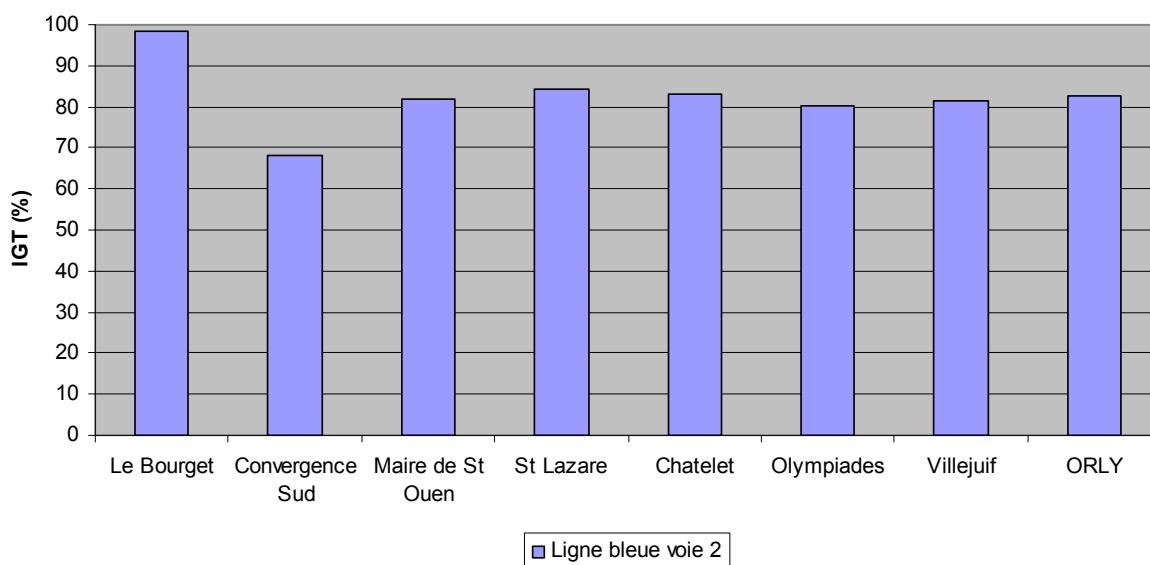


Figure 18 – Evolution de l'IGT sur la voie 2 de la ligne bleue

5.5. Conclusion

Si l'on compare la simulation à l'intervalle de 85 secondes par rapport à celle à 90 secondes, l'aspect le plus marquant concerne le retard des trains. En diminuant la marge d'exploitation, les perturbations se propagent plus et le retard s'accroît. On observe de ce fait une diminution de l'effet de la marge régulation en ligne. **C'est d'autant plus de retard que les terminus vont devoir absorber.**

L'autre effet marquant concerne l'augmentation du déséquilibre entre les trains bleus et les trains verts. En effet, la diminution de l'intervalle d'exploitation ayant essentiellement un effet significatif sur le tronç commun, l'intervalle et le retard entre les trains bleus et verts n'est plus homogène à Pleyel où ils convergent (les trains verts sont beaucoup moins déstabilisés que les trains bleus). Cet aspect milite vraiment pour une conception adaptée de ce nœud ferroviaire avec un quai dédié offrant plus de marge d'exploitation, ainsi que des algorithmes de régulation spécifiques pour ces deux convergences (nord et sud).

Concernant l'intervalle d'exploitation, le taux d'irrégularité n'augmente pas considérablement. En mettant en place une régulation plus performante que celle utilisée dans la modélisation, le taux de performance devrait donc être acceptable. Par exemple aux gares, où la régularité serait trop faible il peut être envisageable d'augmenter la marge de régulation tout en la diminuant dans les intergares ou elle n'est pas utile (comme en sortie de terminus). Il semble qu'on atteigne là la limite en-deçà de laquelle le système perd toute stabilité.

Comme pour la simulation à 90 secondes, il est important de noter que les conclusions relatives à la stabilité de l'exploitation ne sont en aucun cas détachables de tous les éléments mentionnés ci avant y compris dans les notes connexes (terminus, fonctionnement de Pleyel, performance du système de conduite).

6. Synthèse

Dans le cadre des choix techniques relatifs à la topologie de l'infrastructure et aux principes d'exploitation qui ont été rappelés dans cette note. La présente étude démontre que l'exploitation des lignes bleue et verte du Métro Grand Paris avec la programmation de circulations à 90 secondes d'intervalle entre Pleyel et Roissy, présente un niveau de stabilité et de robustesse satisfaisant. Les principaux facteurs de stabilité résident dans la conception des terminus, l'existence d'une marge de vitesse pour régulation, la longueur de l'intergare à la convergence des lignes bleue et verte offrant une large marge de régulation et la maîtrise des temps de stationnement grâce aux automatismes et aux portes palières.

Le passage à un intervalle d'exploitation de 85 secondes dans le tronç commun dégrade légèrement la qualité de service sans toutefois remettre en cause l'exploitabilité du réseau. Les scénarios testés n'intègrent pas la possibilité d'améliorer encore la résistance de la ligne aux perturbations en optimisant la vitesse d'entrée en gare pour augmenter les marges d'exploitation.