

Analyse et amélioration d'un système de transport urbain : Santiago du Chili

- Rapport final -

CARBONARI Paula

LATORRE Juliette

LHERM-SOULAS Victor

TANGRE Laure

REMERCIEMENTS

Nous aimerions remercier chaleureusement Griselda Ahumada qui nous a énormément apporté dans la recherche des données de notre projet et leur exploitation. Ce projet n'aurait pas été possible sans son aide. Merci à elle pour sa disponibilité, sa passion pour la géomatique et sa bienveillance !

Merci également à notre professeur Hipolito Martell qui nous a suivi tout au long de notre avancée en apportant son regard expert sur le thème des transports.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	1
SOMMAIRE	2
INTRODUCTION	3
RÉSUMÉ DU DIAGNOSTIC	4
Diagnostic socio-démographique	4
Diagnostic de l'offre	8
Diagnostic de la demande	9
DÉFINITION D'UN TRACÉ DE METRO	11
PLACEMENT DES STATIONS	13
INTÉGRATION AU TISSUS URBAIN	15
DIMENSIONNEMENT	17
Matériel roulant	17
Vitesse commerciale	18
Fréquence de passage	19
Coût d'investissement	20
Matériel roulant	20
Coût d'infrastructure	20
Charges d'exploitation	20
CONCLUSION	21
Points positifs	21
Points d'amélioration	22
BIBLIOGRAPHIE	23

INTRODUCTION

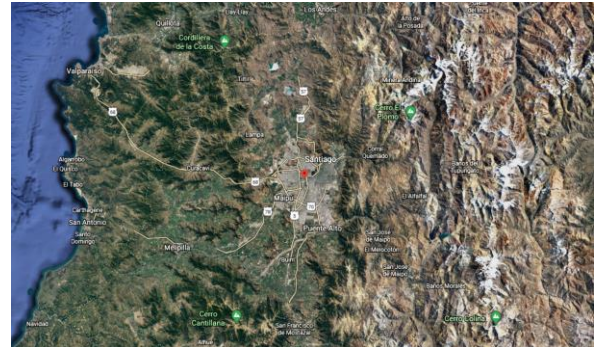
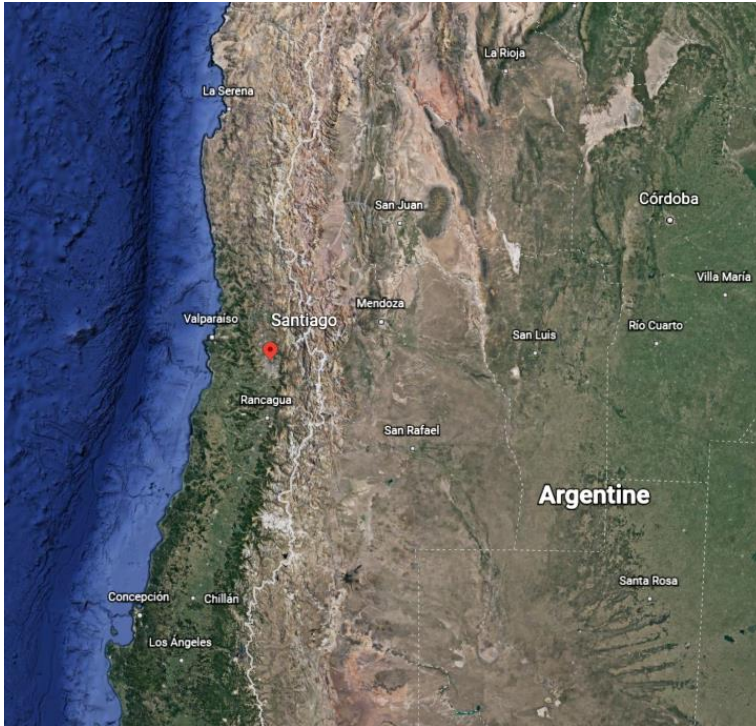
Ce rapport fait suite au diagnostic des transports précédemment effectué sur la ville de Santiago du Chili. Il présente un projet de ligne de métro permettant de relier les communes de Maipu et La Cisterna. Cette liaison permet de créer une liaison plus directe entre Maipu et San Bernardo, un trajet sur lequel les diagnostics ont révélé à la fois une demande importante, et un manque d'offre de transports en commun performants, résultant en une forte congestion lors des heures de pointe.

La nouvelle ligne prolonge ainsi la ligne 4A existante de 11 km vers l'ouest, et se raccorde au Metrotren Nos, à la ligne 6 prévue pour 2026, et à la ligne 5 existante. L'idée de l'extension de la ligne 4A est d'ailleurs envisagée par la métropole, mais elle est absente des plans à l'horizon 2026, car elle est jugée insuffisamment rentable économiquement pour le moment - critère décisif dans le pays néo-libéral -, en raison de la faible densité de population et du faible niveau de vie des quartiers qu'elle traverse.

Nous avons pourtant choisi de traiter ce projet en priorité, car l'analyse des flux à l'échelle de la métropole montre au contraire qu'une forte demande est présente en raison du pôle d'emplois industriels situé entre ces deux communes. D'autre part, un moyen de transport performant dans une portion de la ville où les revenus sont moyens à bas (soit les classes sociales les plus susceptibles d'emprunter les transports en commun), pourrait contribuer à l'enrichissement de la population, voire à la densification attendue des communes traversées par la ligne.

RÉSUMÉ DU DIAGNOSTIC

Diagnostic socio-démographique



Santiago est la capitale du Chili. C'est une métropole de 4 912 500 habitants située non loin de l'océan Pacifique, mais pourtant entourée de montagnes.

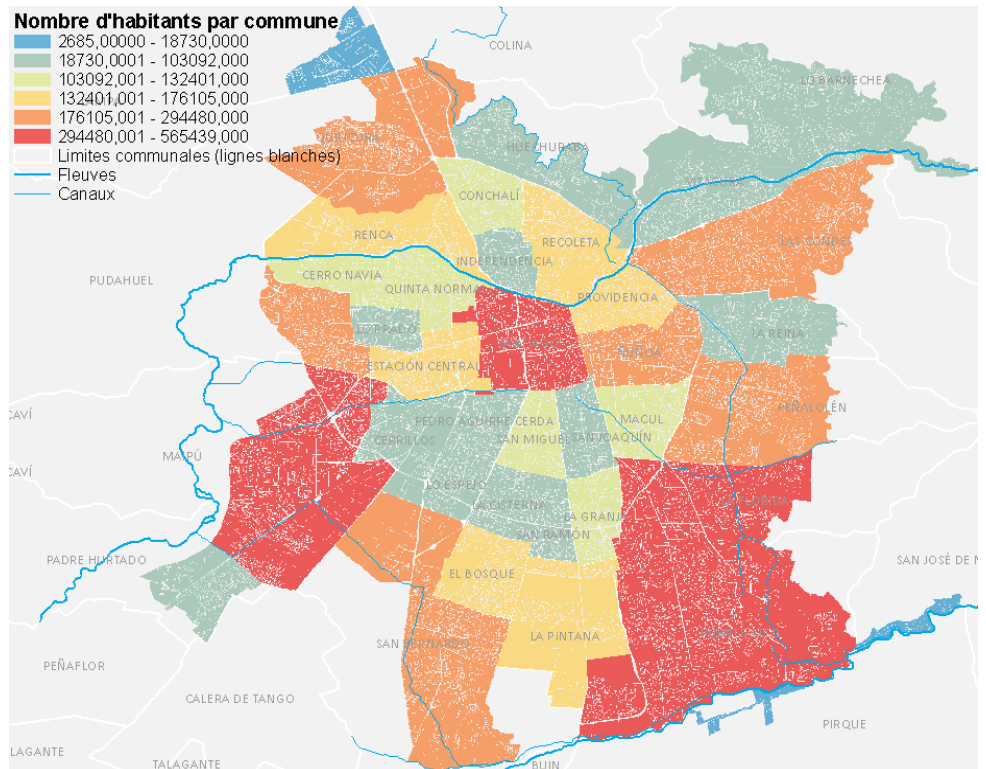
Sa population, de densité moyenne d'environ 7700 hab/km², est très contrastée. En effet, le pays, du fait de son histoire, est marqué de fortes inégalités qui se reflètent dans sa capitale.

Situation géographique de Santiago du Chili.
Source : Google Maps

Les densités de population dans l'agglomération sont très faibles dans toutes les communes sauf dans la commune centrale de Santiago où elle monte en flèche.

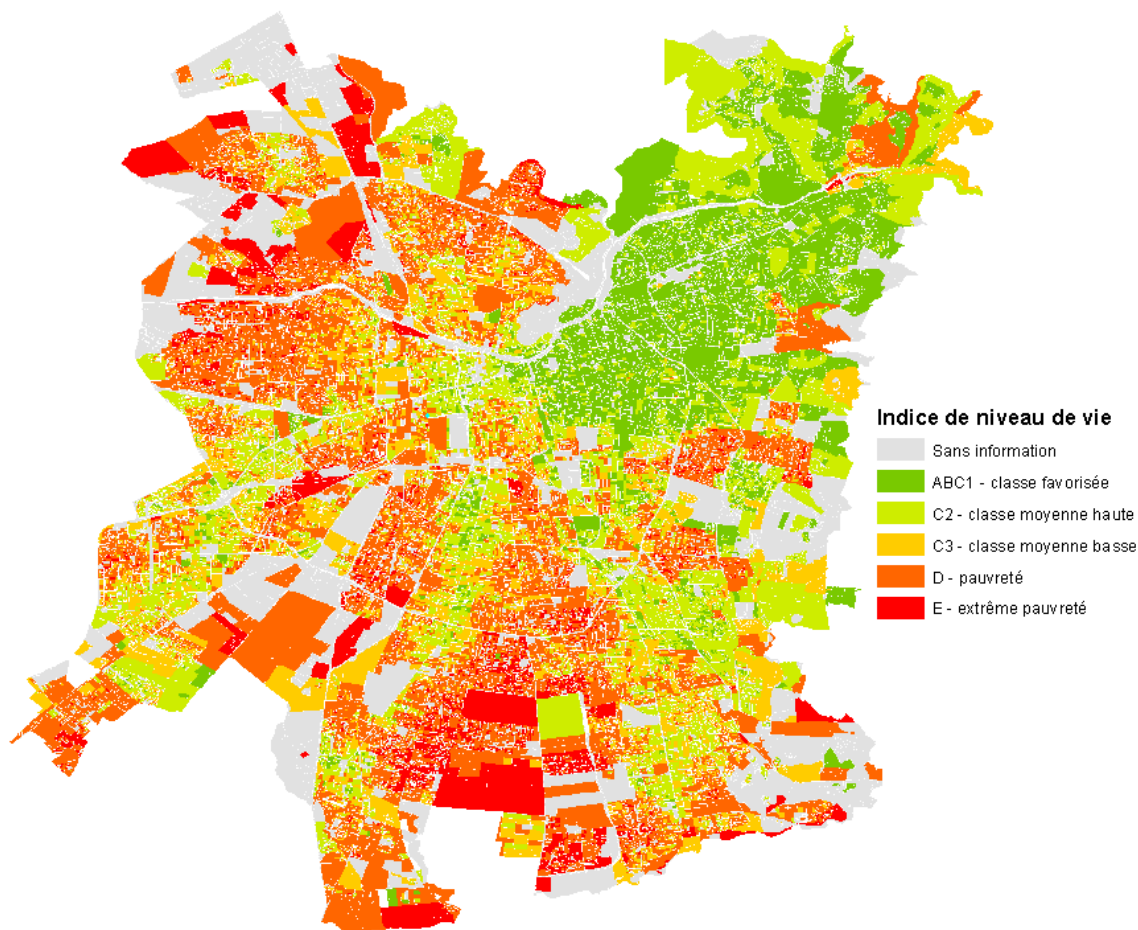
Certaines communes très grandes et très peuplées se démarquent cependant, notamment Maipú, à l'ouest, et la Florida, au sud-est.

On constate par ailleurs une fracture sociale entre les communes du nord-est et le reste de l'agglomération, qui est en moyenne bien plus pauvre que ces dernières.



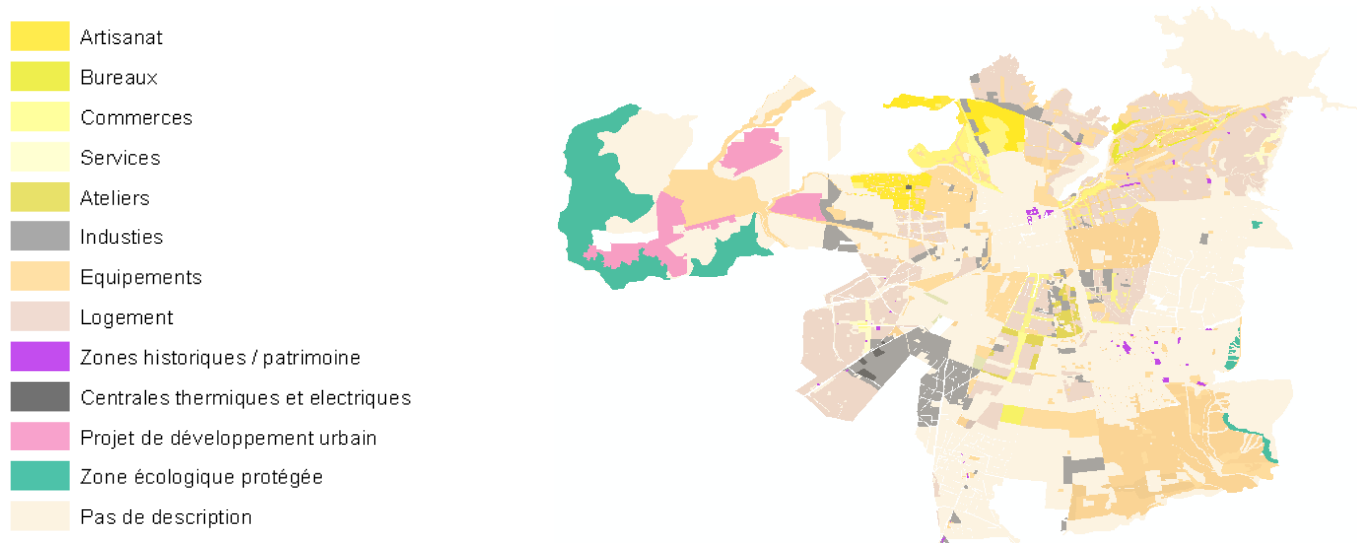
Carte du nombre d'habitants par commune.

CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, Université de Technologie de Compiègne, 2020.



Carte des disparités sociales au sein de l'agglomération de Santiago.

CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, UTC, 2020.



Carte des fonctions urbaines de la métropole de Santiago.

CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, UTC, 2020.

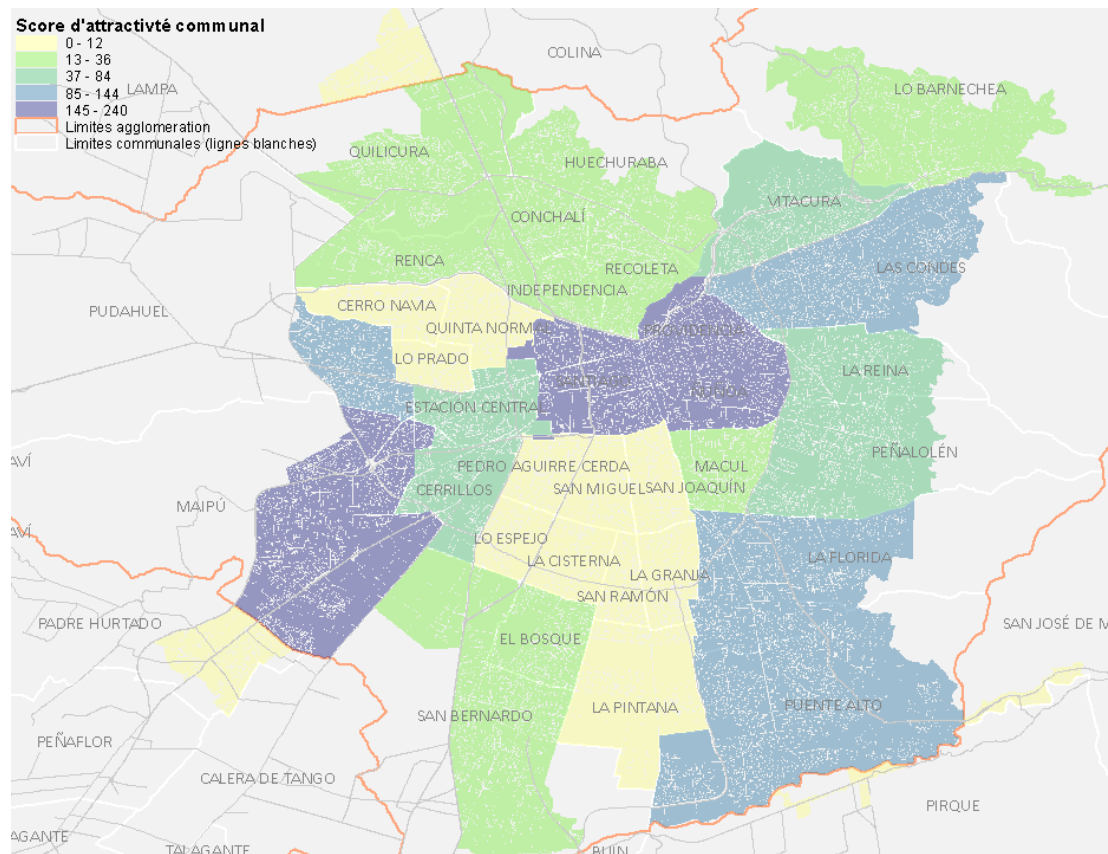
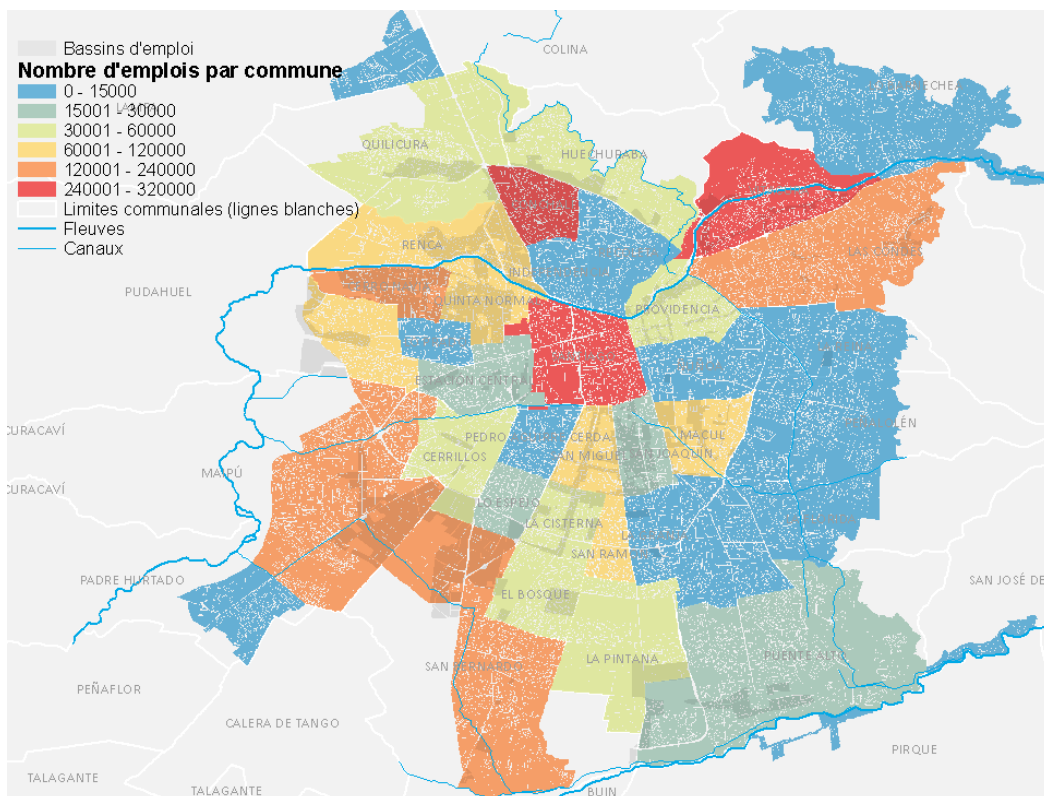
Cette fracture sociale se retrouve au niveau des fonctions urbaines, où on constate une concentration des bureaux et des fonctions de cadre dans le quart nord-est de l'agglomération, tandis que les autres bassins d'emploi sont répartis dans d'autres zones de l'aire urbaine, comme l'artisanat (au nord), les industries (au sud-ouest) et les ateliers (au centre-sud).

Pour mieux se rendre compte de l'attractivité des différentes communes, on calcule deux indicateur :

- Le nombre d'emplois par communes
- Le score d'attractivité (basé sur la présence de commerces, de grandes surfaces, de centres commerciaux, de marchés et de lieux de culte).

Carte du nombre d'emplois par commune dans la métropole de Santiago.

CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, Université de Technologie de Compiègne, 2020.



Carte du score d'attractivité communal dans la métropole de Santiago.

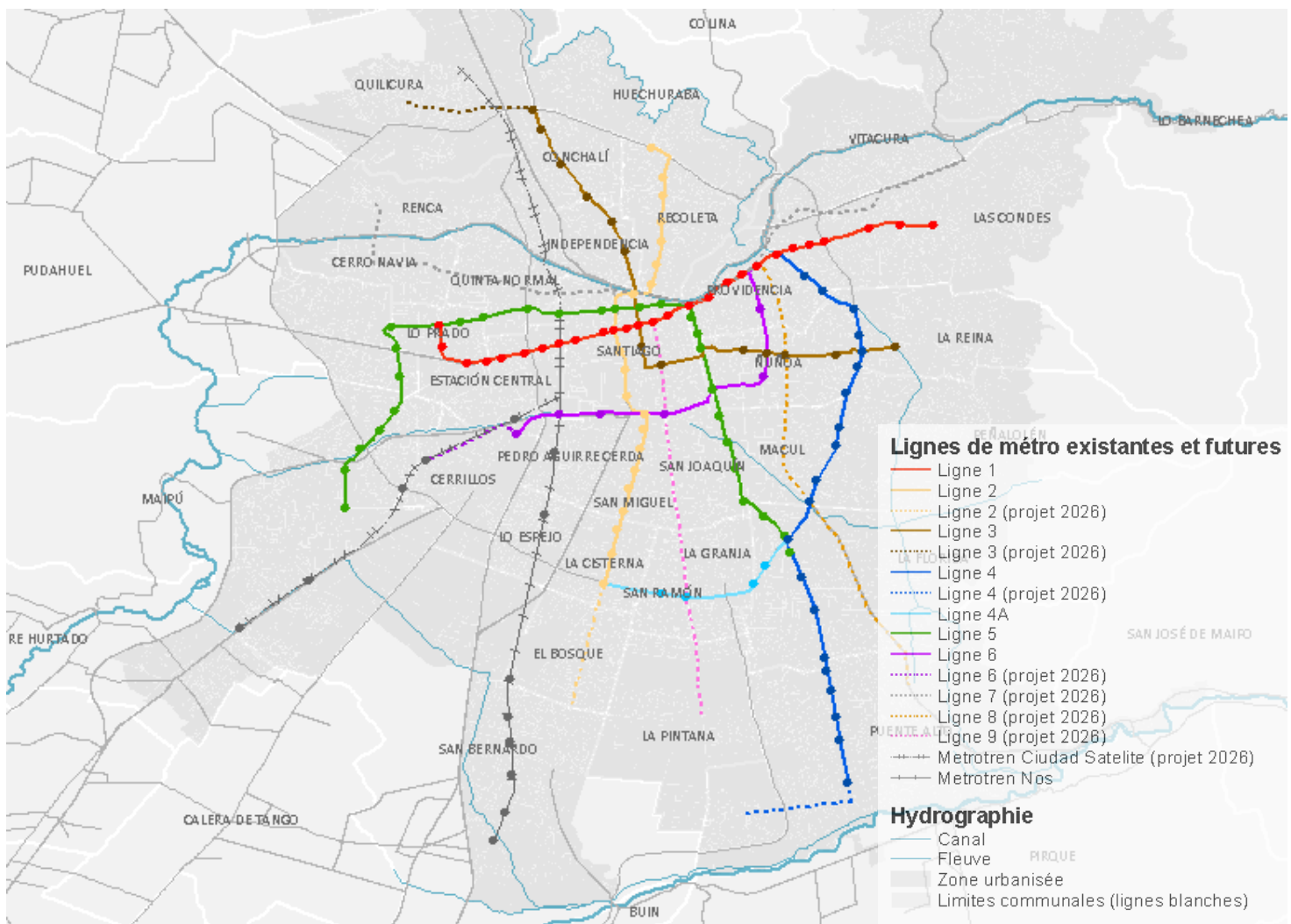
CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, Université de Technologie de Compiègne, 2020.

En résumé, on peut décrire l'organisation sociodémographique de Santiago comme suit :

- Les **communes du nord-est** sont de faible densité de population. Elles concentrent les habitats des classes sociales les plus aisées ainsi que les centres d'affaires de la ville. On y trouve des immeubles modernes, des gratte-ciels (dont Costanera Sur, le plus grand d'Amérique du Sud!), ou des villas.
- Le **centre de l'agglomération** est très attractif. Sa population est très dense, les commerces, emplois et lieux culturels y sont nombreux.
- La **petite couronne** autour du centre est peu dense et hétérogène en fonctions urbaines. Elle ne présente pas de fonction dominante.
- La **périphérie nord-ouest** est peu dense et assez pauvre. Elle concentre les quartiers d'artisanat.
- La **périphérie est et sud-est** est très attractive, en particulier la commune de Maipu. Elle a un niveau de vie moyen-bas, mais est fortement peuplée de par sa surface importante, un score d'attractivité très élevé, et un grand nombre d'emplois industriels.
- La **périphérie sud** est extrêmement pauvre et est marquée par l'installation de bidonvilles.
- La **périphérie sud-ouest** est une banlieue dortoir de classes moyennes, comprenant quelques équipements culturels, de santé, d'éducation et quelques commerces, mais sans pôle d'emplois.

Diagnostic de l'offre

Le moyen de transport le plus largement développé au Chili est le bus, sous bien des formes. Santiago, en revanche, fait exception à cette règle. La capitale comporte certes d'innombrables lignes de bus urbains et de micros qui desservent chacun de ses recoins, à l'exception des quartiers extrêmement pauvres ; mais la véritable force de son système de transport urbain est son réseau de métro en étoile à sept lignes, et sa ligne de train de banlieue (le Metrotren Nos).



Plan des lignes de métro et métrotren actuelles et prévisionnelles de Santiago.

CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, Université de Technologie de Compiègne, 2020.

Ce réseau de métro en étoile répond très bien à la demande qui se concentre vers le centre de l'agglomération. On remarque cependant le manque de desserte des quartiers nord-ouest, sud-ouest et de la zone sud de l'agglomération. Les projets en cours vont remédier à ce manque dans le quart nord-ouest, mais pas dans les autres zones. Cette constatation est d'autant plus surprenante que l'on a démontré d'attractivité des communes du sud-ouest.

D'autre part, on note que des lignes reliant les communes de la périphérie sans passer par le centre sont en développement, mais que cette tendance n'est pas décisive dans les lignes en projet.

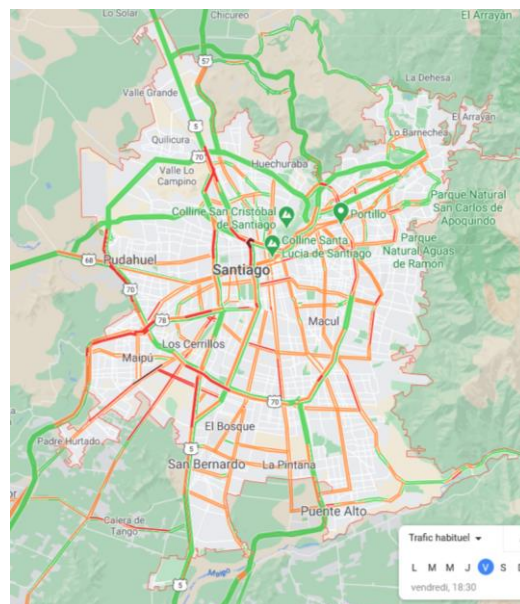
Diagnostic de la demande

La demande a été évaluée de deux manières. Premièrement, nous avons observé la congestion du trafic routier en temps réel chaque jour d'une semaine, à plusieurs heures stratégiques. Puis nous avons estimé les flux de déplacement de personnes dans toute la métropole avec la méthode gravitaire, pour quatre types de flux : les flux de santé, les flux universitaires, les flux d'activité non professionnelle, et les flux pendulaires professionnels.

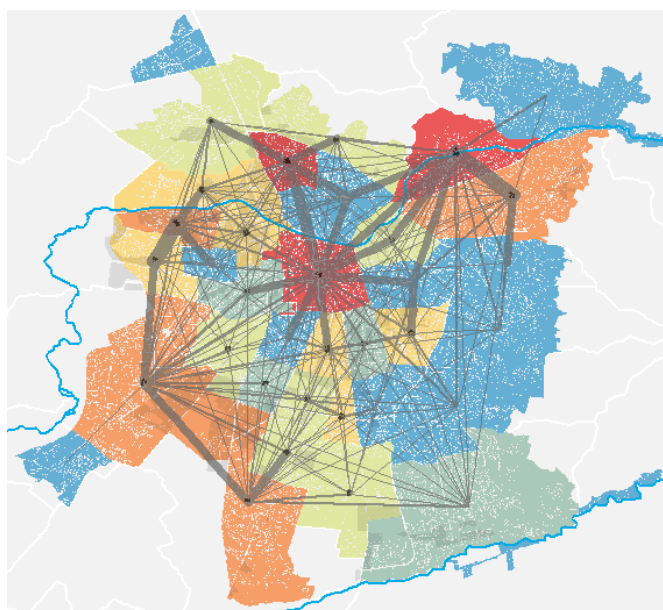
L'observation de la congestion en temps réel montre que le trafic est similaire tous les jours du lundi au vendredi : le trafic est **plus dense et congestionné aux heures de pointe** (8h et 18h30) surtout **au sud-ouest**, sur les axes sortant de la ville et sur les axes reliant les communes de la périphérie. On note aussi que le vendredi le trafic est plus dense que les autres soirs de la semaine, surtout à 18h30 où des tronçons sont complètement bouchés.

Le week-end, le trafic est relativement fluide dans toute l'agglomération.

Ci-contre, plan de l'intensité du trafic dans Santiago le Vendredi à 18h30.
Source : Google Maps.

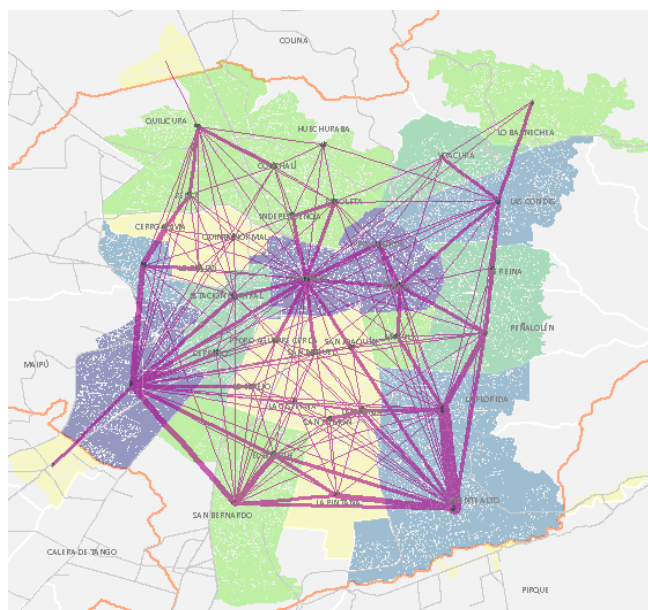


Les calculs de flux montrent que les flux universitaires et de santé sont négligeables devant les flux d'activité professionnelle et non-professionnelle. Ces deux types de flux dominants font apparaître des polarités entre les communes, qui régissent les grands déplacements quotidiens au sein de la métropole.



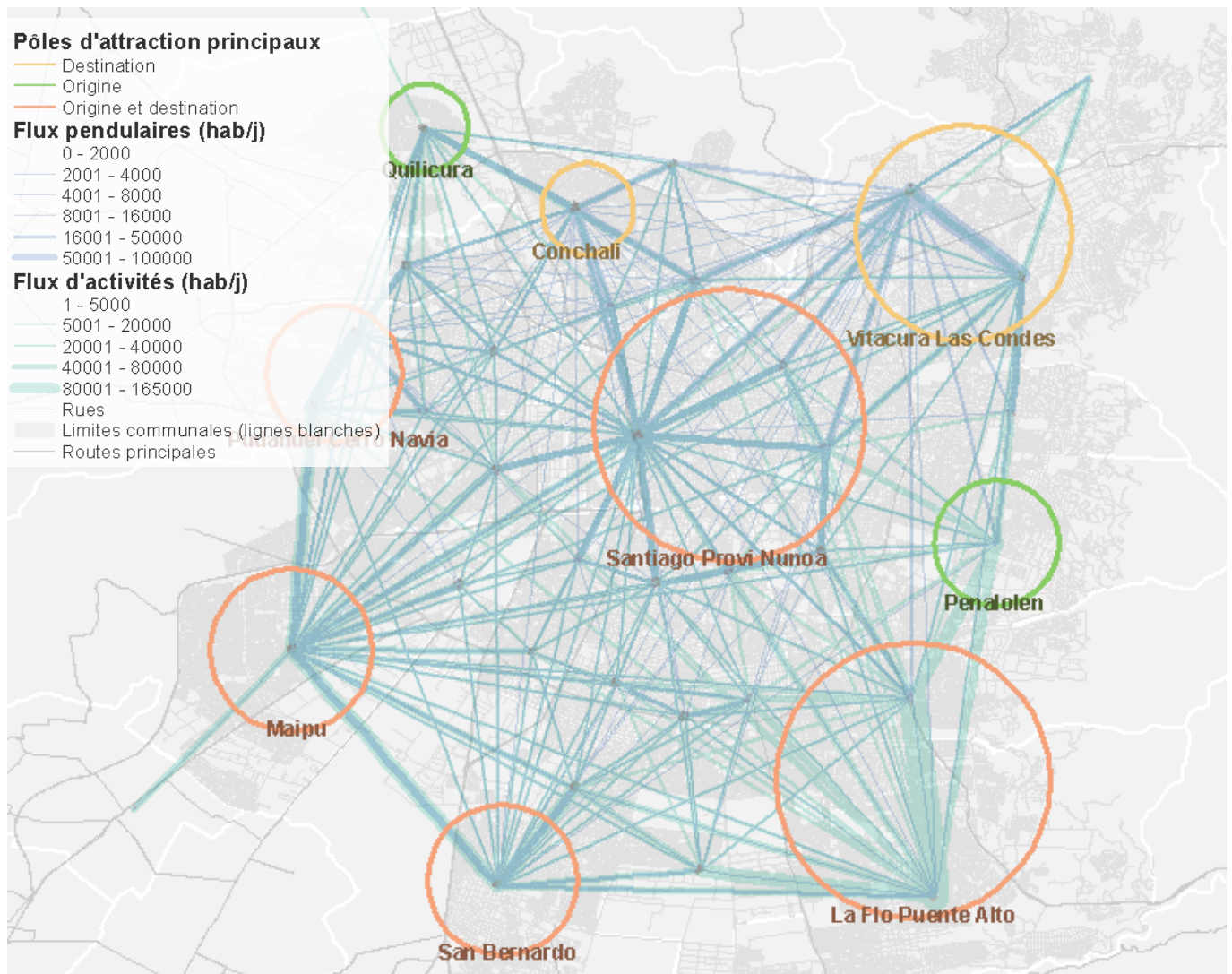
Carte des flux pendulaires et nombre d'emplois par commune.

CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, Université de Technologie de Compiègne, 2020.



Carte des flux d'activités non professionnelles et score d'attractivité communale.

CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, Université de Technologie de Compiègne, 2020.



Cartes représentant les polarités génératrices de flux humains.

CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, Université de Technologie de Compiègne, 2020.

Le diagnostic de la demande aboutit à cette carte des polarités. On remarque d'importants flux vers le centre de l'agglomération qui est un pôle de départs et d'arrivées majeur, mais le demande vers cette zone est déjà bien présente. En revanche, on note la présence de pôles origine/destination dans les communes du **sud et de l'ouest** de la périphérie, entre lesquels les flux sont importants, et qui ne sont pourtant pas reliés par des lignes de métro.

Lors de cette analyse, on a particulièrement remarqué la commune de Maipú qui, bien qu'en périphérie, soit l'un des **pôles les plus attractifs de l'agglomération**, qui gagnerait à être reliée aux communes du sud, en passant par San Bernardo et jusqu'à Puente Alto.

La densité de population sur ce trajet est faible, car on borde la zone industrielle la plus importante de la métropole, qui est l'un des **premiers bassins d'emplois industriels**, et qui concentre donc les flux en heure de pointe.

C'est donc sur cette liaison que nous avons décidé d'élaborer un tracé de métro, en l'incorporant au réseau existant.

DÉFINITION D'UN TRACÉ DE METRO

L'analyse des données et des flux calculés nous pousse à proposer une solution en priorité pour résoudre les problèmes de congestion des **communes du sud-ouest**, car l'offre n'y rencontre pas la demande.

De nombreuses solutions ont été envisagées pour améliorer l'offre de transport en commun dans cette zone. Parmi elles, le développement d'un réseau de bus entre la commune-dortoir de Padre Hurtado (qui en est dépourvue) et Maipu ; ou bien l'installation de parkings relais à des points stratégiques en périphérie du réseau pour limiter les flux automobiles pendulaires en provenance de l'arrière pays de la métropole.

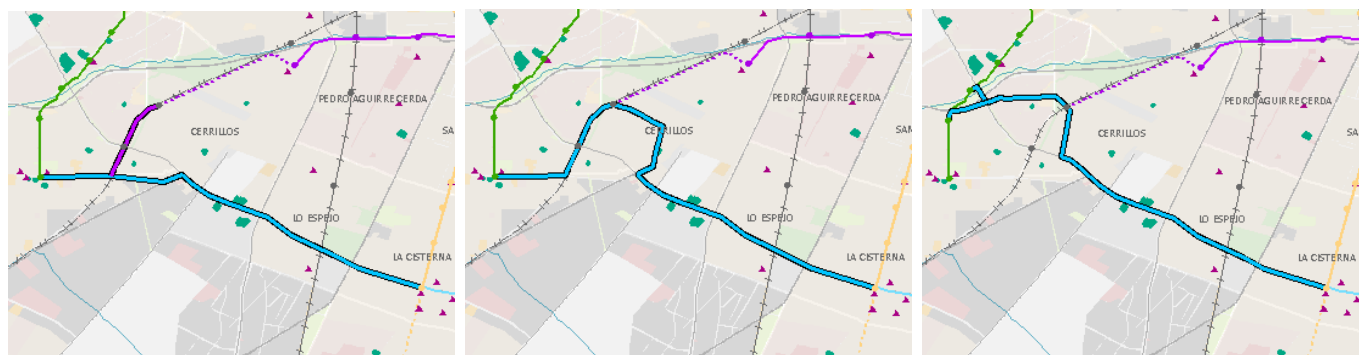
Pour s'aligner avec la direction que prend la ville de Santiago (développer de plus en plus son réseau de métro), et en considérant la taille des flux en jeu à l'intérieur de la ville, nous avons préféré proposer un tracé de **ligne de métro permettant de relier les communes périphériques du sud et de l'ouest**, sans devoir passer par le centre.

Dans le rapport précédent, les trois tracés suivants étaient proposés pour **prolonger la ligne 4A vers l'ouest jusqu'à la ligne 5**.

Tracé 1 : Le tracé 1 relie le terminus ouest de la ligne 5 (verte) au terminus ouest de la ligne 4A (bleu clair). Ce tracé pourrait être un prolongement de la ligne 4A. Le tracé est le plus direct possible. Nous proposons de le raccorder au projet de prolongement de la ligne 6 (violet) en prolongeant cette dernière d'une station, ou bien de le raccorder au projet de Metrotren Ciudad Satélite en modifiant l'emplacement d'une de ses stations. Ces deux options peuvent être envisagées ensemble dans un troisième scénario.

Tracé 2 : Le tracé 2 relie le terminus ouest de la ligne 4A à la ligne 5, en passant par le terminus de la ligne 6 planifiée. Ce projet pourrait arriver à plusieurs stations de la ligne 5. Deux solutions sont proposées. L'une est plus courte mais nécessite de passer sous un canal, la seconde est plus longue mais contourne cet obstacle.

Tracé 3 : Le tracé 3 relie le terminus ouest de la ligne 5 au terminus ouest de la ligne 4A, en passant par le terminus de la ligne 6 planifiée. Il a l'avantage de relier tous les points essentiels en une seule ligne, mais son tracé est plus long.

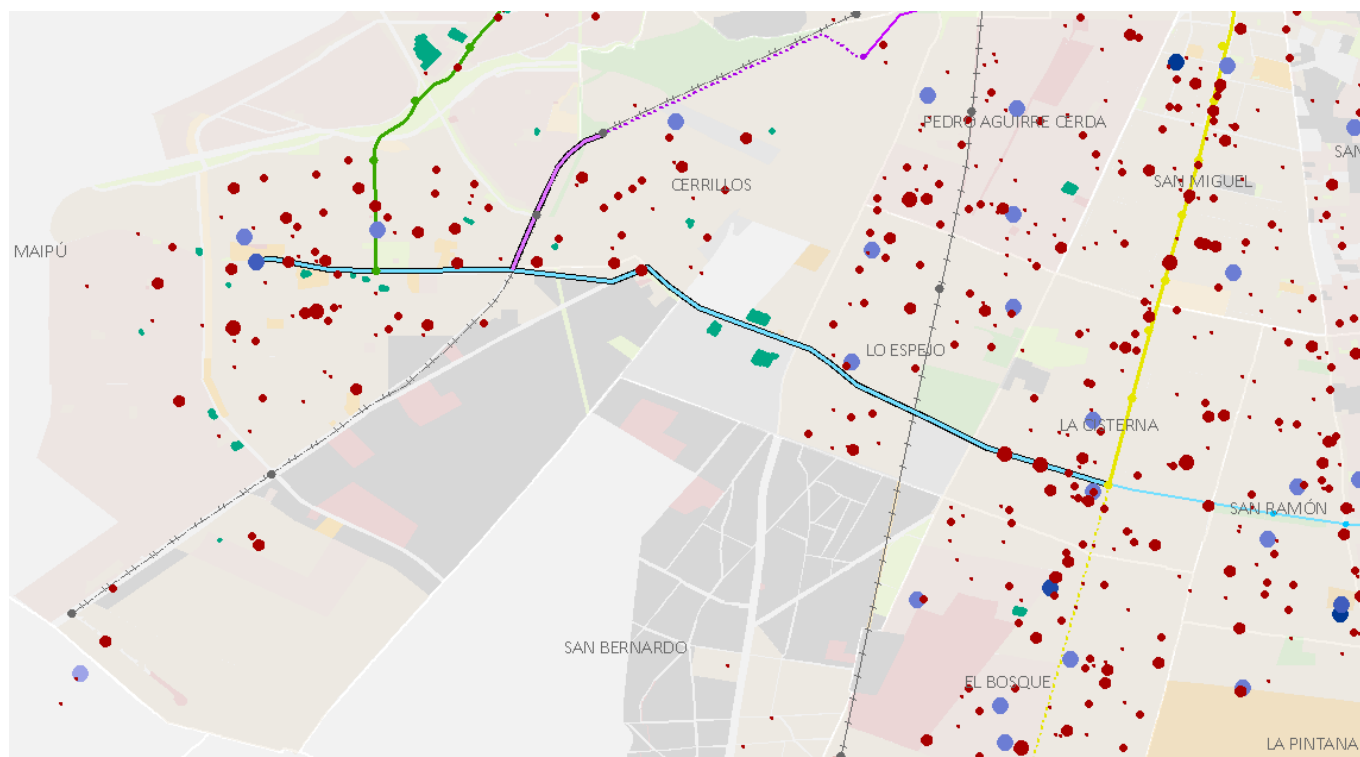


De gauche à droite, carte des tracé 1, tracé 2, et tracé 3.

CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, Université de Technologie de Compiègne, 2020.

Nous choisissons de garder le **tracé 1**. En effet, c'est le plus direct, c'est donc le plus court, ce qui minimise les coûts. D'autre part, il passe par de grandes avenues, ce qui facilite les travaux. L'avenue Vespucio Sur Express que la ligne créée suit sur environ 6,3 km a même été aménagée avec de la place supplémentaire justement en prévision du passage d'une future ligne de métro. De plus, nous choisissons de prolonger légèrement le tracé vers l'ouest pour relier des zones attractives de Maipu au métro.

**Le tracé final de prolongement de la ligne 4A fait 11 km,
et la ligne 4A totale ainsi obtenue mesure 18,3 km.**



students

- 0,000000 - 406,000000
- 406,000001 - 1070,000000
- 1070,000001 - 2327,000000
- 2327,000001 - 5726,000000
- 5726,000001 - 15500,000000
- <all other values>

tipo

- POSTA RURAL
- CONSULTORIO RURAL
- CONSULTORIO URBANO
- CENTROS DE SALUD
- SERVICIOS DE URGENCIA
- HOSPITAL

Lignes de métro et projets

- Ligne 2
- Ligne 2 (projet 2026)
- Ligne 4A
- Ligne 5
- Ligne 6
- Ligne 6 (projet 2026)
- Metrotren Ciudad Satellite (projet 2026)
- Metrotren Nos

Lieux d'activités nécessaires

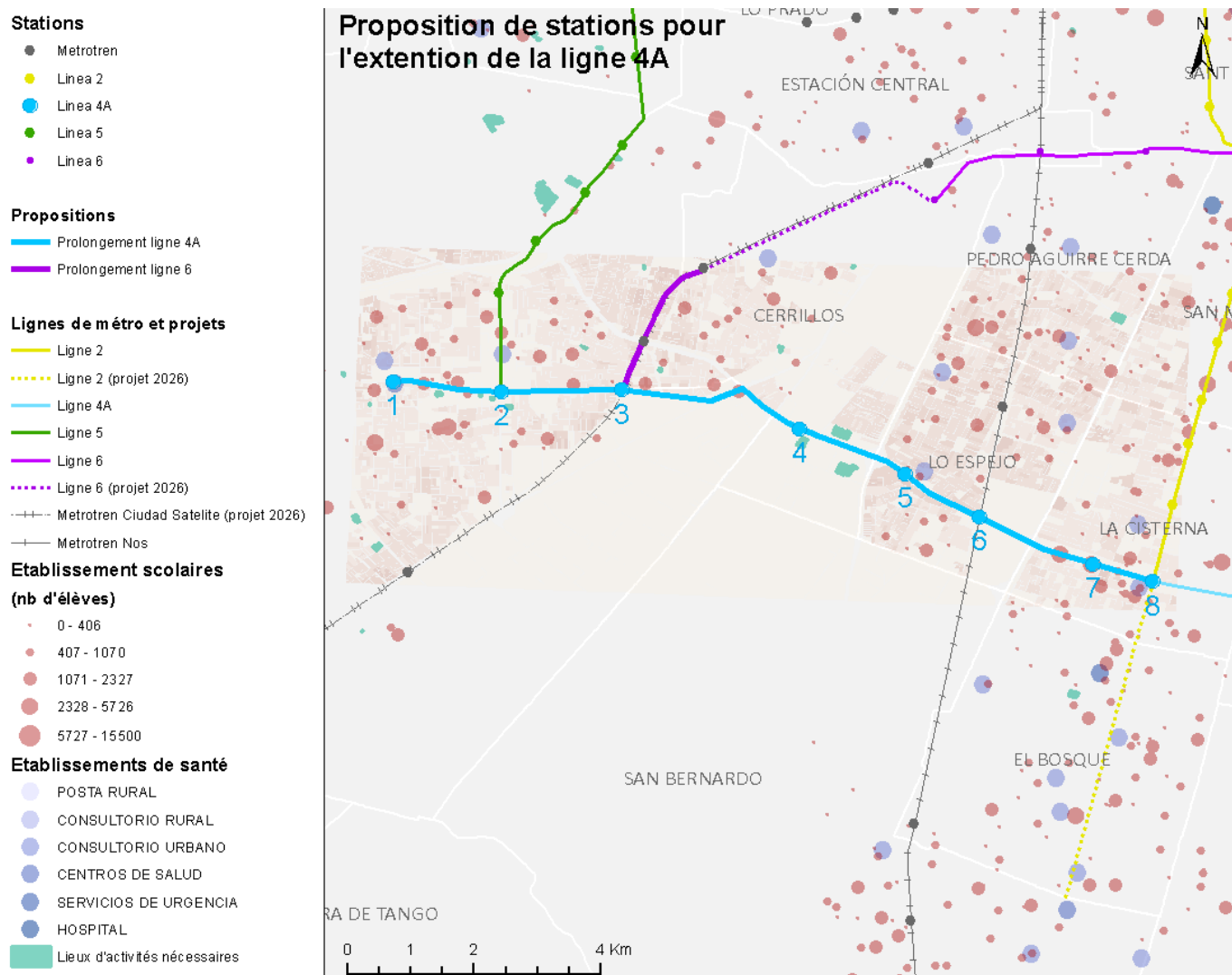
- PLU
- Données absentes
- Activités productives et de service
- Zone restreinte ou exclue du développement urbain
- Zone verte
- Equipements
- Equipements exclusifs
- Equipements métropolitains
- Industrie
- Infrastructure métropolitaine
- Résidentiel
- Résidentiel mixte
- Restriction
- Réseau métropolitain d'aires vertes et récréatives
- Zone d'habitation mixte

Propositions

- Prolongement ligne 4A
- Prolongement ligne 6

Carte du tracé de la ligne 1

CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, Université de Technologie de Compiègne, 2020.



CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, Université de Technologie de Compiègne, 2020.

Les stations sont placées en priorité pour assurer la connectivité avec les autres lignes. C'est le cas des stations 2, 3, 6 et 8.

Les stations 4, 5 et 7 sont placées grâce aux projections orthogonales des centres de gravité des polygones sur la ligne créée. Leur position est parfois légèrement ajustée en fonction des centres d'intérêt le long de la ligne. Ainsi, la station 4 qui se trouve dans une zone très peu dense mais qui dessert de grands pôles industriels où les employés affluent pendant les heures de pointe, est légèrement décalée vers l'est pour se rapprocher des supermarchés le long de la ligne.

Le terminus 1 dessert deux centres médicaux, dont un service d'urgences, ainsi que de nombreuses écoles et des zones commerciales attractives de Maipú.

Les 7 stations ainsi créées sont espacées d'en moyenne 1,375 km.

La méthode gravitaire permet également de déterminer la charge par station en heure de pointe. Pour les polygones desservis par la ligne créée uniquement, on considère que 40% de la population prend le métro pendant une plage de deux heures le matin et le soir. Pour les polygones qui sont également proches d'une autre ligne, on considère que 20% de la population prend l'autre ligne (en direction du centre-ville), et que 20% de la population rejoint les autres communes de la périphérie en prenant la ligne nouvellement créée. C'est le cas des polygones A, D, G, I, U, P et T.

On remarque que les polygones partagés entre deux lignes sont souvent ceux dont le centre de gravité est le plus éloigné de la ligne créée, ce qui appuie notre décision de considérer une plus petite fraction de la population venant de ces zones. On remarque que les stations 1 et 5 sont celles qui nécessitent les infrastructures les plus conséquentes, car ce sont celles où les gens affluent le plus en heures de pointe.

Quartier	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	Σ
Pop [hab]	43387	28698	25921	24080	12628	2034	26737	8217	23800	9826	257	10201	15956	5436	66596	42562	17172	11	19385	27748	37775	448427
Pax [hab]	8677,4	11479	10368	4816	5051,2	813,6	5347,4	3286,8	4760	3930,4	102,8	4080,4	6382,4	2174,4	26638	8512,4	6868,8	4,4	7754	5549,6	7555	134153
1	8677	11479	10368																			30525
2				4816	5051,2																	9867
3						814	5347	3287	4760													14208
4										3930,4	102,8	4080,4										8114
5													6382,4		26638							33021
6														2174,4		8512,4	6868,8	4,4				17560
7																			7754	5549,6	7555	20859

Tableau des charges par station en heure de pointe.

CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, Université de Technologie de Compiègne, 2020.

Quartier	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	1115	966	2320,6																		
2				1175,4	757,8																
3						1703	1638	771	1736												
4										1718,6	1665,9	1125,5									
5													584,09		1511,7						
6														884,87		3107,1	1343,2	501,5			
7																			379,63	899,26	3068,8
8																					

Tableau des distances centre de gravité/station en mètres.

CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, Université de Technologie de Compiègne, 2020.

INTÉGRATION AU TISSUS URBAIN

La ligne A4 existante est une ligne de métro de surface (hors sol). Le tracé proposé suivant des avenues larges, pour bien se raccorder à la ligne existante et pour minimiser les coûts, on choisit de construire l'intégralité de la ligne hors sol.



Vue satellite du tracé de prolongement de la ligne 4A.

Source : Google Earth.

En étudiant le tissu urbain sur la vue satellite, on distingue trois tronçons :

- Sur le tronçon en **bleu**, la ligne suit la Vespucio Sur Express, qui est l'une des grandes artères de la périphérie, et qui a été aménagée en prévoyant de la place pour l'implantation d'une ligne de métro hors sol. Cette section de la ligne ne pose **aucun problème d'intégration** au tissu urbain.
- Sur le tronçon **jaune**, la ligne suit une avenue composée d'une deux fois deux voies, avec de l'espace sur les côtés et parfois entre les voies. **Une réduction de la place attribuée aux voitures sur la chaussée est envisageable sans pour autant gêner le trafic à double sens.** À l'ouest du tronçon, de larges espaces autour de la chaussée permettent de conserver les quatre voies.
- Le tronçon **vert** pose plus de problèmes. Bien que le tracé suive toujours des avenues, la route est constituée d'une voie simple à double sens, et le bâti est plus dense. Néanmoins, ce tronçon est court, les hauteurs de bâti restent basses, et une grande place borde la route sur plus de la moitié du tronçon. On peut donc imaginer qu'en **faisant l'acquisition de quelques terrains** en bord de chaussée sur l'extrémité ouest du tracé, on puisse y faire passer une ligne de métro hors sol.

Aucun problème d'intégration des stations ne se pose le long du tronçon bleu. La station n°2 également ne pose pas de problème puisqu'elle existe déjà, au terminus de la ligne verte. Les images satellites ci-dessous montrent les sites potentiels d'implantation des stations 1 et 3.



Vues satellite autour des stations 1 (à gauche) et 3 (à droite).
Source : Google Earth.

On identifie la présence de terrains non construits juste à côté des urgences, où le terminus (station n°1) pourrait être construit.

La station 3 quant à elle a la place de s'implanter dans le carrefour où se croisent avenues et Metrotren, ce sont plutôt des enjeux de signalisation qui se posent, et la construction de passages souterrains ou de passerelles pour permettre aux passagers de rejoindre les trottoirs.

DIMENSIONNEMENT

Matériel roulant

Pour notre projet de transports, nous utiliserons les rames de métro Alstom Metropolis AS-2002 ou AS-02, déjà en circulation sur les lignes 4 et 4A.

Cette dénomination est un sigle pour *Acero Santiago*, s'agissant d'un train urbain et suburbain, évoluant sur des roues acier et non pneumatiques [1], et 2002, l'année où le contrat a été conclu [2].

La largeur de voie nécessaire à leur circulation est de 1,435 m. Chaque rame pèse 261 t [1]. La durée de vie moyenne de ce matériel est de 35 ans.

Dimensions AS2002 (m)	
Largeur d'un wagon	2,9
Longueur d'un wagon	22,75
Nombre de wagons par module/rame	3
Longueur d'une rame	68,25
Surface d'une rame (m2)	197,925
Capacité max (4 pers/m2)	791,7
Capacité confort (1 pers/m2)	197,925

Tableau des dimensions du matériel roulant :
Alstom Métropolis AS-02.

CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, Université de Technologie de Compiègne, 2020.



Rame AS-02 RF444.
Source : Railpictures

Le réseau de transport métropolitain de la ville de Santiago a fait l'acquisition de 60 rames en 2002 pour US\$ 201,9 M et 12 rames supplémentaires en 2009, pour US\$ 84 M [2], après que 2 rames aient été endommagées par une collision en 2008. En 2019, 6 rames ont été vandalisées lors de l'agitation et les violences qui ont saisi le pays après l'augmentation du prix des transports dans la capitale, catalyseur d'un mécontentement provoqué par les fortes inégalités sociales qui marquent le pays [3]. 72 rames (RF4401 à RF4472) ont donc été produites à ce jour, dont 66 seulement sont encore en circulation sur les lignes 4 et 4A.

Le coût moyen d'une rame est donc US\$ 3,97 M soit 3,3 M€¹.

Ces rames modulaires conçues et produites par Alstom Brésil sont constituées de 3 wagons de 3,6 m de haut, 2,9 m de large et 22,75 m de long [1], deux voitures *motrices* avec cabine de pilotage au milieu desquelles est intercalée une voiture *remorque*. Une rame totalise donc 68,25 m de long. En considérant une densité moyenne de 4 passagers au m², on peut donc loger dans une rame $2,9 \times 22,75 \times 3 \times 4 = 791,7$ Pax, que l'on arrondit à **792 Pax**. La conception modulaire des rames rend possible d'accoler deux rames pour doubler la capacité de transport d'un train aux heures de pointe. Cependant, la ligne 4A desservant des quartiers de relativement faible densité de population, il a été fait le choix de **n'utiliser que des trains composés d'un module**, les quais ne sont donc pas suffisamment longs pour accueillir deux modules. Il ne sera donc pas tenu compte de cette possibilité dans les calculs de fréquence.

**La vitesse maximale de l'AS-02 est de 100 km/h,
ce qui autorise une vitesse opérationnelle jusqu'à 80 km/h [4].**

¹ Les valeurs en euros sont converties à partir de la valeur moyenne du US\$ sur les 90 derniers jours au 04/01/2021.

Vitesse commerciale

La portion déjà existante de la ligne 4A comprend 6 stations étendues sur 7,3 km soit une longueur inter-stations moyenne de 1 217 m. Elle est de 1 375 m sur le nouveau tronçon prévu dans ce projet, long de 11 km pour 8 stations (en incluant l'ancien terminus de la Cisterna), ce qui est cohérent et tient compte des densités de population respectives tout au long de chacun des 2 tronçons.

Sur la ligne 4A totale (existante et nouvelle), la distance inter-station est de 1 331 m, avec 13 stations réparties sur 18 km de réseau.

Aucune donnée n'est disponible concernant la vitesse commerciale des lignes 4 ou 4A actuelle. Un rapprochement sera donc effectué avec les lignes 14 du métro parisien et la ligne A du RER. La ligne 14 a une vitesse commerciale de 39 km/h [5] qui peut être considérée comme proche, mais néanmoins légèrement inférieure à celle de la ligne 4A prolongée, avec 80 km/h de vitesse opérationnelle maximale et seulement 1 075 m de distance inter-stations. Le RER A, avec entre 90 et 120 km/h de vitesse maximale autorisée sur des inter-stations de 2 369 m en moyenne [6] a une vitesse commerciale de 49 km/h qui sera estimée supérieure à celle de la ligne 4A. Étant donné que des inter-stations plus longs et une vitesse opérationnelle plus élevée permettent d'augmenter la vitesse commerciale, on décide que :

La vitesse commerciale sur l'ensemble de ligne 4A est estimée à 42 km/h, soit un temps de parcours de 0,44 h ou 26 min.

Par conséquent, la durée du tour est de $0,4 \times 2 \times 1,1 = 0,96$ h soit 58 min.

Fréquence de passage

Les périodes de la journée, sont, les jours ouvrables :

- heures de pointe ("Punta") de 7h à 8h59 et de 18h à 19h59.
- heures normales ("Valle") de 9h à 17h59 et de 20h à 20h44.
- heures creuses ("Bajo") de 6h à 6h59 et de 20h45 à 21h (23h en temps normal)

Notre fréquence dimensionnante pendant les **heures de pointe** est celle de la station 1 : 3,1 min en fréquence min et 0,8 en fréquence confortable pendant les horaires de pointe. Il n'est pas réaliste de vouloir opérer à une fréquence de 0,8 min. On choisira donc une moyenne entre ces deux valeurs, plus réaliste : 1,9 min que l'on arrondira à **2 min**.

**Pendant les heures normales et les heures creuses,
on choisit une fréquence de respectivement 5 et 10 min.**

Les horaires de service du métro [7] sont:

- Jour ouvrable : 6h à 23h.
- Samedi : 6h30 à 23h (considérés comme heures normales sur toute la journée)
- Dimanche et jours fériés : 8h à 22h30 (considérés comme heures normales sur toute la journée).

On a chaque année, en considérant que les jours fériés ne tombent pas de samedi ou dimanche :

- 240 jours ouvrables
- 52 samedi
- 73 dimanches et jours fériés [8].

En faisant une moyenne pondérée des fréquences selon les amplitudes horaires des différentes périodes par type de jour et le nombre de jours de chaque type dans l'année, on obtient une **fréquence de passage moyenne de 5,2 min**.

Horaires d'opération	Période	Début (h)	Fin (h)	Amplitude horaire (h)	Total quotidien	Fréquence (min)	Coeff de passage (jours/an)	Fréq annuelle moyenne
Jours ouvrables		6	23	17	17	5,25	240	5,164383562
Heures de pointe	matin	7	9	2	4	2		
	soir	18	20	2				
Heures normales	après-midi	9	18	9	9,75	5		
	soir	20	20,75	0,75				
Heures creuses	matin	6	7	1	3,25	10		
	soir	20,75	23	2,25				
Dimanches et jours fériés								
Heures normales	journée entière	8	22,5	14,5	14,5	5	73	
Samedi								
Heures normales	journée entière	6,5	23	16,5	16,5	5	52	

Tableau de calcul de la fréquence moyenne annuelle.

CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, Université de Technologie de Compiègne, 2020.

Coût d'investissement

Matériel roulant

Le nombre de rames à acquérir pour le nouveau tronçon est de 7 soit **23,27 M€** d'achat de matériel roulant. De plus, le matériel roulant étant moins cher lorsqu'il est acheté en plus grand volume, il serait bon de remplacer par le même achat les 6 rames incendiées lors des émeutes provoquées par la crise sociale en 2019, pour un montant de **19,95 M€**.

Au total, le coût d'investissement dans du matériel roulant serait de 43,22 M€.

Coût d'infrastructure

Le coût de l'infrastructure par kilomètre peut être estimé à partir du coût de la ligne 4. En 2002, le coût d'investissement pour la ligne 4, qui utilise le même matériel roulant donc vraisemblablement des infrastructures similaires, est de US\$ 1004 M [2], dont US\$ 201,9 M de matériel roulant (60 rames AS-02), et par déduction, US\$ 802,1M de coût d'infrastructure soit US\$ 32,5 M/km.

Ainsi, la construction du nouveau tronçon générerait un coût d'infrastructure équivalent à 299,2 M€.

Charges d'exploitation

Le nombre de km parcourus chaque année sur la ligne agrandie est de **2 551 430 km**. Le coût d'exploitation est de 9€/km [9] les charges d'exploitation annuelles sont donc de **23 M€**.

	Capacité (4pers/m²)	Coût d'achat (M€)	Coût d'investis- sement (M€/km)	Coût d'exploitation au km (€/km)	Durée de vie (ans)
Metro AS-2002	197,925	3,3245	27,2	9	35

Tableau récapitulatif des coûts principaux.

CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, Université de Technologie de Compiègne, 2020.

Ligne Metro	Ligne unifiée	Troncon existant	Nouveau troncon	
Fréquence de passage (min)	5,2			
Nb de passages par heure	11,6			
Longueur de la ligne (km)	18	7	11	
Vitesse moyenne (km/h)	42			
Temps de parcours par sens (min)	26	10	16	
Durée du tour (min)	58	23	Non pertinent	
Nombre de kilomètres parcourus par le métro chaque jour, deux sens confondus	6990	2789	4201	
Nombre de kilomètres parcourus par le métro chaque année, deux sens confondus	2551430	1018148	1533281	
				Rames à remplacer
Nombre de rames de métros à acquérir	12	5	7	6
Coût d'un véhicule de matériel roulant (M€)	3,32			
Coût d'achat du parc de matériel roulant (M€)	39,89	16,62	23,27	19,95
		Total	43,22	
Coût d'exploitation par kilomètre parcouru (€/km parcouru)	9			
Charges d'exploitation annuelles (M€)	23	9,2	13,8	
Coût d'infrastructure par kilomètre de ligne construite (M€/ km construit)	27,2			
Coût d'infrastructure (M€)	497,9	198,7	299,2	

Tableau de calcul des coûts de construction du projet de prolongement de la ligne 4A.

CARBONARI P., LATORRE J., LHERM-SOULAS V., TANGRE L., « Les Systèmes De Transport Urbain De Santiago Du Chili », UB02, Génie Urbain, Université de Technologie de Compiègne, 2020.

CONCLUSION

Suite à un diagnostic poussé sur la métropole de Santiago du Chili, nous avons décidé de construire une ligne de métro reliant différentes communes du Sud-Ouest de la métropole, afin de décongestionner le trafic et répondre à la demande : nous avons proposé de **prolonger la ligne de métro 4a jusqu'à la commune de Maipu**. Nous proposons la construction d'un prolongement de 11 km de ligne souterraine à la ligne 4a, avec l'ajout de 8 stations, pour une ligne de longueur totale de 18 km, et 13 stations.

Nous estimons que ce projet nécessitera un **investissement total de 342,42 M €** (coût d'infrastructure et coût du matériel roulant) ainsi que des **charges annuelles de 23 M €** par an.

Points positifs

Suivant notre diagnostic, la réalisation d'un tel projet devrait **accélérer la densification et l'amélioration du niveau de vie des communes du sud-ouest**, qui sont dans des conditions propices pour accueillir une ligne de transport en commun et l'utiliser. Cette ligne doit aussi permettre une **fluidification du trafic**, en particulier des migrations pendulaires. Elle doit **améliorer l'accès aux emplois** ouvriers des populations défavorisées du sud en ouvrant un couloir direct vers les zones industrielles, et **dynamiser les transferts de passagers vers Maipu**, pôle attractif grandissant de la métropole.

Peu après la fin de notre diagnostic, nous avons été agréablement surpris et fiers d'apprendre que le gouvernement chilien avait voté la construction d'une ligne de métro qui desservira le sud-ouest de la métropole jusqu'à la commune de Padre Hurtado et au-delà, solution que nous avons évoquée suite à notre diagnostic [10].

La métropole chilienne est en pleine évolution au niveau de ses transports en commun : des constructions et améliorations sont attendues dans les prochaines années, dans un contexte socio-économique difficile. Notre proposition d'extension pourrait bien se concrétiser :

"On s'attend à ce que la ligne [4A] soit étendue à l'avenir par l'autoroute Vespucio Sud, car la construction de cette autoroute a laissé le tracé ferroviaire prêt pour la construction de la ligne une fois que la densité de la population, la rentabilité sociale, en plus des ressources financières permettent de la concrétiser. Les options vont de l'extension la Station Del Sol sur la Ligne 5, ou jusqu'à la Route 68 ou l'Aéroport Arturo Merino Benitez à Pudahuel. Si elle était construite, elle bénéficierait au secteur ouest de la commune de La Cisterna, et particulièrement à Lo Espejo, commune qui ne dispose pas de métro, ainsi qu'à Cerrillos, Maipú et Pudahuel." [11] (traduit de l'espagnol)

Ce projet a été très enrichissant, et il sera très intéressant de suivre l'évolution de cette métropole. Il nous a fait prendre conscience de l'importance de comprendre un territoire en profondeur pour y proposer des projets d'aménagement pertinents.

Points d'amélioration

Pour aller plus loin, deux points principaux auraient pu être plus développés. Le premier est la comparaison chiffrée de la solution choisie (le métro) avec un autre moyen de transport, comme un tramway et/ou un TER. Une telle comparaison avec des moyens de transport de capacité plus ou moins importantes aurait permis de confirmer ce choix de manière éclairée.

Nous n'avons malheureusement pas eu le temps de mener à bien une telle étude en raison des difficultés rencontrées à récolter les données pour un seul mode de transport, le métro, dans un pays comme le Chili. D'autre part, nous disposons tout de même d'arguments forts en faveur du métro. En effet, prolonger la ligne 4A avec le même type de rails et de véhicules permet d'en faire une véritable ligne unique ininterrompue. D'autre part, les quartiers traversés seront amenés à se densifier, et encore plus avec la mise en place d'une ligne de transport en commun pour les relier. Le choix du métro, légèrement surdimensionné pour la densité actuelle, est donc un choix préventif en vue de cette densification.

D'autre part, nous n'avons pas creusé en détail la question de l'implantation des stations et de la ligne dans le tissu urbain par manque de temps. Ce travail doit faire suite à ce rapport pour concevoir un projet réellement abouti.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] « AS-2002 », *Remote Area Community Hotspot for Education and Learning*, 2002.
http://dev.worldpossible.org:81/wikipedia_es_all_2016-02/A/AS-2002.html (consulté le janv. 04, 2021).
- [2] Cooperativa.cl, « Metro hacia Puente Alto tendrá vagones más espaciosos », *Cooperativa.cl*.
<https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/metro-hacia-puente-alto-tendra-vagones-mas-espaciosos/2002-07-31/123600.html> (consulté le janv. 04, 2021).
- [3] « AS-2002 », *Wikipedia, la enciclopedia libre*. nov. 07, 2020, Consulté le: janv. 04, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=AS-2002&oldid=130717554>.
- [4] « Portada! - Los trenes del Metro de Santiago, una lectura ñoña. », *Capa9*.
<https://www.capa9.net/temas/los-trenes-del-metro-de-santiago-una-lectura-%C3%B1o%C3%B1a.1126528/> (consulté le janv. 04, 2021).
- [5] « Vitesse commerciale (Mots-Cles.Vitessecommerciale) - XWiki ». <https://encyclopedie.wikiterritorial.cnfpt.fr/xwiki/bin/view/Mots-Cles/Vitessecommerciale> (consulté le janv. 04, 2021).
- [6] « Ligne A du RER d'Île-de-France — Wikipédia ». https://fr.wikipedia.org/wiki/Ligne_A_du_RER_d%27%C3%8Ele-de-France (consulté le janv. 04, 2021).
- [7] BRchile, « Como usar o metrô em Santiago: horários e valores », *BRchile*, févr. 04, 2019.
<https://brchile.com/metro-em-santiago/> (consulté le janv. 04, 2021).
- [8] « Feriados de Chile - Año 2021 ». <https://feriados.cl/> (consulté le janv. 04, 2021).
- [9] M. Girault et M. Millot, « Référentiel pour le choix des systèmes de transports collectifs à haut niveau de service », CEREMA, 2018. Consulté le: janv. 04, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.cerema.fr/system/files/documents/2018/12/rapport_referentiel_MYC_V2_siteCerema.pdf.
- [10] « Así será el recorrido del proyecto Tren a Melipilla que pasará por Maipú », *La Voz de Maipú*.
<https://lavozdemaipu.cl/asi-sera-recorrido-proyecto-tren-melipilla-maipu/> (consulté le janv. 07, 2021).
- [11] « Línea 4A del Metro de Santiago », *Wikipedia, la enciclopedia libre*. déc. 23, 2020, Consulté le: janv. 04, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=L%C3%ADnea_4A_del_Metro_de_Santiago&oldid=131908961.