

Les futurs du métro

Vus par SYSTRA et Usbek & Rica



SYSTRA

Prochain arrêt : le présent

Le métro dépasse son siècle et demi d'existence en 2020. SYSTRA ayant contribué à mettre sur les rails la moitié des métros automatiques en circulation dans le monde, nous avons vu dans cet anniversaire l'occasion d'une pause et d'une prise de hauteur. C'est avec cette ambition en tête que nous avons imaginé et conçu ce cahier : pour retracer les évolutions successives du métro et envisager les possibilités offertes par les prochaines décennies.

Mais se lancer dans la prospective en pleine pandémie, quelle aventure ! Indépendamment de notre volonté, la rédaction de cet ouvrage se sera ainsi faite à cheval sur deux mondes : celui de l'avant-covid-19 et celui que l'on surnomme dorénavant « le monde d'après ». Comment produire un écrit pérenne dans une période aussi incertaine ? Comment envisager le futur du transport en commun quand la distanciation physique devient la nouvelle norme ? Mais c'est peut-être son contexte qui fera la force de ce document. Ce cahier – à l'image de son objet, le métro – a été pensé pour s'adapter à toute situation et pour encaisser tout type de futur. Pour se plier à la réalité, sans jamais rompre.

Et puis, n'est-ce pas quand tout vacille que l'on distingue le mieux les éléments les plus stables ? Partout, la crise a fait l'effet d'un révélateur en braquant ses projecteurs sur les fonctions vitales de nos sociétés : soigner, se nourrir, éduquer. Mais aussi se réunir.

En contraignant la moitié de la planète au confinement, la crise a rappelé l'extrême mobilité de nos quotidiens professionnels et personnels. En nous privant momentanément de leur usage, elle a fait la preuve, en creux, de l'importance des transports en commun dans le vivre-ensemble. Car le métro appartient à l'infra-ordinaire, à « *ce qui se passe chaque jour et qui revient chaque jour, le banal, le quotidien, l'évident, le commun, l'ordinaire, l'infra-ordinaire, le bruit de fond, l'habituel* », comme disait l'écrivain français Georges Perec.

Demain, quand le métro aura repris pleinement sa course coutumière, nous nous émerveillerons peut-être de cette machine robuste et résistante, fluide et sans friction. Nous réaliserons peut-être brièvement tout ce qu'elle a d'innovant, avant de la réintégrer au familier, jusqu'à oublier sa présence. Mais d'ici là, et à partir de maintenant, le métro va devoir apprendre à vivre dans un monde marqué par des crises de plus en plus fortes et répétées. Il va devoir s'habituer à réagir à celles-ci, mais aussi à y apporter des réponses. Il va enfin devoir affirmer sa place au sein d'un écosystème et, pourquoi pas, contribuer à structurer la collaboration des uns avec les autres. De cette manière, il pourra continuer ce qu'il sait faire de mieux : être la colonne vertébrale de nos quotidiens, assez rigide pour construire le vivre-ensemble, mais aussi assez souple pour se plier à tous les futurs possibles.

●
Pierre Verzat,
Président du directoire
de SYSTRA

Jérôme Ruskin,
Directeur général
d'*Usbek & Rica*

**Des chiffres
qui parlent**
p. 7



**Le métro, entre
crises et
opportunités**
p. 12



**Le métro dans
sa beauté
ordinaire**
p. 20

**Les questions
qui tuent**
p. 24



**Itinéraire
à ciel ouvert**
p. 10



**Un métro virtuel
au service du réel**
p. 18



**Métro en 2035 : trois
scénarios pour une
station du futur**
p. 26

**Une brève histoire
du métro**
p. 8



**Rencontre
avec
Philippe Rahm**
p. 16



**Le métro
dans la SF**
p. 28

Des chiffres qui parlent

Familier et quotidien, le métro recèle pourtant de nombreux secrets. Petit tour d'horizon en quelques chiffres de ses prouesses discrètes et de ses exploits grand format.

1863

C'est la date de la première sortie de The London Underground qui devient le 1^{er} métro au monde. Un vrai « Tube » planétaire.

25 à 40 km / h

C'est la vitesse moyenne à laquelle le métro transporte ses passagers. Une célérité bien supérieure à celle de la voiture dans les plus grandes agglomérations mondiales (13 km/h à Paris, 16 km/h à Londres).

180 villes

Environ 180 villes au monde ont leur réseau de métro. Cela représente en tout plus de 11 000 stations.

14 000 km

C'est la longueur totale de l'ensemble des lignes de métro dans le monde.

40 ans

C'est la durée de vie technique moyenne d'une rame de métro. Soit presque 4 fois plus que la durée de vie moyenne d'une voiture en Europe (11 ans).

105 mètres

C'est la profondeur de la station Arsenalna, la plus insondable du monde, à Kiev.

90 sur 100

C'est le nombre de stations de métro de Stockholm qui sont habillées d'œuvres. Ce travail, mené par 150 artistes, a commencé dès 1950.

3,64 millions

La station la plus fréquentée au monde, celle de Shinjuku (Tokyo), voit défiler 3,64 millions de passagers chaque jour, soit l'équivalent de la population entière de l'Uruguay.

1 métro sur 2

SYSTRA a contribué au développement de la moitié des métros automatiques en circulation dans le monde.

Une brève histoire du métro

TEXTE
Éric Senabre

Le métro fait à ce point partie du quotidien des grandes villes qu'on se le donne pour acquis. Pourtant, son histoire est déjà longue, et jalonnée d'innovations, dont on ne mesure plus l'aspect révolutionnaire.

1863

Succès instantané

Si l'histoire du métro commence dès la deuxième moitié du XIX^e siècle, elle s'est bâtie sur des impératifs encore valables aujourd'hui. Ainsi, quand le chantier du métro londonien débute, pour une inauguration le 10 janvier 1863, c'est avant tout pour soulager la congestion en surface. Pas de voitures à moteur en ce temps, certes, mais la circulation « hippomobile », dans une ville qui comptait déjà plus d'habitants que Paris intra-muros aujourd'hui, posait strictement les mêmes soucis d'engorgement... et même de pollution (le crottin de cheval était considéré comme un fléau). Mission accomplie, avec 30 000 passagers transportés entre la gare de Paddington et Farringdon dès la première journée d'exploitation.

1890

L'électrification

Jusqu'en 1890, le métro londonien fonctionne à la vapeur. Malgré la rapidité avec laquelle cette solution s'impose (40 millions de voyageurs par an dès 1880), on imagine sans peine les désagréments engendrés par cette énergie dans un espace couvert. Aussi, plutôt que de recourir à la traction par câble retenue par le métro de New York, Londres préfère l'électricité, plus moderne et véritable star de l'Exposition universelle de 1881, devançant ainsi le chemin de fer classique de 3 ans. Quand Paris se dote à son tour d'un métro en 1900, c'est

l'électricité qui s'impose devant des alternatives parfois étonnantes (coussin d'eau, plan incliné, propulsion pneumatique, etc.). Trois sociétés indépendantes se chargent de fournir l'électricité, en attendant qu'une usine de production dédiée soit terminée, quai de la Râpée. Indépendamment du confort qu'elle apporte aux voyageurs et de la réponse donnée aux difficultés d'avitaillement, l'électricité rend pérenne l'idée d'un réseau souterrain, alors que d'autres villes ont fait le pari de la surface.

1903

La sécurité en question

En 1903, une rame prend feu au niveau de la station Ménilmontant, à Paris. Les fumées dégagées asphyxient 84 passagers sur le quai de la station Couronnes. Les deux responsables de cette catastrophe sont, d'une part, le bois utilisé dans la conception des caisses et, d'autre part, l'absence de sorties alternatives au niveau des stations. On abandonne donc le bois pour le métal. Cela donnera naissance à la mythique Sprague-Thomson, en 1908, dont le modèle restera en service jusqu'en 1983! Et bien entendu, les stations se mettent à la page pour la sécurité de toutes et tous.

Air comprimé

Après l'ouverture du métro de Londres, il a rapidement été établi que le charbon et la vapeur ne pourraient pas être des solutions sur le long terme. Pourtant, avant que l'on ne se fixe sur l'électricité, un certain nombre de projets ont vu le jour. Parmi les alternatives : l'air comprimé. Si des moteurs à air comprimé ont bel et bien été mis en service (sur les tramways nantais jusqu'à la fin de la Première Guerre mondiale, notamment), il a aussi existé des systèmes (comme à Londres, puis à New York, dès 1864) où un train était « aspiré » dans un tunnel tubulaire.



1906

Signalisation

Aux États-Unis, le système de signalisation Hall par « sémaphores » est largement utilisé dès la fin du XIX^e siècle. Adopté par la France, il est rapidement remplacé par un dispositif électrique automatique dès 1906. Il faudra attendre les années 1960 pour que l'électronique et l'informatique, encore balbutiantes, prennent le relais. Le métro bénéficie aujourd'hui d'une signalisation dont la complexité et l'efficacité n'ont rien à envier à celles des grandes lignes de chemin de fer.

1952

1956

Articulation et pneus

Pour répondre aux besoins importants durant les heures de pointe, Paris se dote en 1952 de son « matériel articulé » (ou MA 1951). Techniquement plus abouti que les anciennes Sprague-Thomson, il permet de coupler des éléments de trois voitures par deux ou par trois selon l'affluence, montrant une réelle volonté de s'adapter à l'intensité des flux de voyageurs. Toutefois, le succès est mitigé, et la RATP concentre donc ses efforts sur le « matériel sur pneus » (MP). Les rames sur pneu autorisent des freinages et des accélérations beaucoup plus forts, ce qui a pour conséquence de réduire l'intervalle entre deux trains. Une autre façon de régler le problème de l'affluence, sans même parler de la disparition des crissements, pas toujours agréables pour les usagers.

1980

2000

Pilotage automatique

Avec la ligne Nankō Port Town, la ville d'Osaka, dès 1981, introduit le monde entier au concept de métro automatique. Deux ans plus tard, la ville de Lille va plus loin encore dans l'automatisation



Stations fantômes

Le métro de Paris comporte pas moins de 16 stations fantômes. Si certaines ont en réalité fusionné avec la station voisine (comme Martin Nadaud avec Gambetta), et demeurent de facto accessibles sous une forme différente, d'autres sont purement et simplement abandonnées (comme la fantomatique station Saint-Martin de la ligne 9, dont on distingue encore le quai quand on passe de Strasbourg-Saint-Denis à République) ou, plus étrange, n'ont jamais ouvert malgré la réalisation des quais – à l'image de Haxo, dans le 19^e.

avec son projet de Véhicule Automatique Léger circulant sur ses lignes 1 et 2 sans conducteur. L'Allemagne ne tardera pas à suivre dès 1984 avec deux lignes du métro de Nuremberg, suivie par le Canada et Vancouver. Encore assez sporadique dans les années 1990, le phénomène s'étend à toute la planète dans les années 2000 avec des villes comme Budapest, Barcelone, Sao Paulo, Dubaï... et amène à l'automatisation de lignes existantes (Paris ligne 1 en 2013).

2003

Adieu le ticket ?

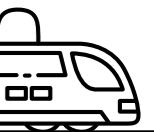
La Oyster Card londonienne voit le jour en 2003. Fonctionnant sur le principe de la technologie RFID, elle simplifie grandement les transactions billettiques, tant pour l'opérateur que pour le passager. La carte Navigo parisienne existait déjà sous une forme « expérimentale », mais ce n'est qu'entre 2005 et 2006 que son usage s'est généralisé. Aujourd'hui, alors que certains smartphones permettent déjà de jouer le rôle de « super-tickets », des solutions applicatives/matérielles plus universelles sont à l'étude.

2010

2020

Expérience voyageur et développement durable

Dès la fin des années 2000, le métro mise à la fois sur un confort accru pour ses passagers et l'écologie. Le wi-fi fait petit à petit son apparition dans les rames (dès 2009 pour le métro de Séoul), tandis que la 4G se déploie dans le métro (à Singapour, 4G et Wi-Fi couvrent l'ensemble du réseau). En Asie, le paiement sans contact s'accélère, hébergé sur des applications mobiles. Dès 2017, la ligne S1 du métro de Beijing se dote de trains à sustentation magnétique. Dans le même temps, d'autres villes passent au vert. À Lausanne ou à Toronto (la station Victoria Park), la végétalisation extérieure des stations, façon canopée, bat son plein. Et à l'intérieur ? À Paris, la station Gare de Lyon de la ligne 14 a déjà ouvert la voie. Et si la tentative chinoise de végétaliser la rame elle-même à Hangzhou, en 2016, aura été de courte durée, elle montrait néanmoins le cap que le métro s'efforcera probablement de tenir dans les décennies à venir.



Itinéraire à ciel ouvert

TEXTE

David Attié

ILLUSTRATION

Nelson Goncalves

2035, le métro du futur n'a pas fait de révolution. Il continue à sédimenter les innovations discrètes, à peaufiner son fonctionnement et à organiser sa résilience.

Sans forcer, Billie file tout droit sur son vélo. Un regard sur son téléphone lui confirme qu'elle est en avance. L'écran de veille lui indique le passage du prochain train à la seconde près et le nombre exact d'emplacements disponibles dans le «multi-park». Ce garage réservable en ligne est maintenant à l'entrée de toutes les stations, il offre des espaces adaptables aux différentes micro-mobilités. La station à ciel ouvert apparaît, sur une petite place animée. Billie continue sur la piste cyclable qui descend en pente douce jusqu'au niveau inférieur, où l'on trouve des boutiques et l'accès aux trains. Dans l'herbe, des chanceux profitent du soleil, mais elle n'y fait pas attention. Son vélo accroché entre un hoverboard et une trottinette électrique, elle s'éloigne du multi-park et s'avance immédiatement vers le comptoir d'Abel, qui l'accueille avec un grand sourire. Depuis que la billettique est dématérialisée, les stations ont libéré pas mal de mètres carrés en enlevant les lignes de contrôle. Abel a créé une association qui installe des mini-fermes bio dans des locaux techniques dégagés.

- « Ah te voilà, c'est le grand jour aujourd'hui? »
 — Ouais, je passe juste te faire un coucou et je fonce! Tu me mets de côté quelques champignons? Je les récupère ce soir.
 — Yes, j'ai des pleurotes frais de ce matin... »

Pendant quelques secondes, les LED du stand se mettent à briller et à scintiller de toutes leurs forces. Billie fronce les sourcils: « Ouah, c'est quoi ça? » Abel plisse les yeux mystérieusement et indique du regard le métro qui est arrivé. Billie s'engouffre dans la rame.

Un rayon de soleil tombe pile sur un siège vide, c'est l'heure à laquelle l'astre est aligné avec la pente de la station. Elle s'assoit et rédige un message. « Sérieusement, t'as mis un éclairage disco ou quoi? » En relevant la tête, elle observe autour d'elle. Grâce aux nouvelles surfaces auto-nettoyantes et aux mini-balayeuses autonomes, la rame est impeccable. Spacieuse et lumineuse, elle se déplace sans bruit, ni vibration. Un grand-père et ses trois petits-enfants sont installés à côté avec plusieurs sacs de courses. Le plus jeune des trois est retourné et épie un groupe d'adolescents en cosplay quelques rangées plus loin. Billie sourit d'un air entendu. Ils vont à la station UbiDream, cela ne fait aucun doute. Son téléphone vibre, c'est Abel qui répond.

« Ha ha. Non mais figure-toi, hier, un technicien est venu vérifier l'installation électrique du stand. Apparemment, ils ont mis au point un système qui permet de récupérer l'énergie du freinage des rames pour alimenter en électricité le quartier. Il se trouve que quand un métro arrive en gare et freine, on peut récupérer l'énergie produite (une énergie gratuite !) pour alimenter tout un



tas d'équipements extérieurs, comme le chauffage électrique, l'éclairage, la ventilation des espaces publics et les logements environnants.
 — Ah bien joué! Ça donne un côté magique.»

Plus loin, les adolescents font des selfies avec leurs déguisements. Ils vont à l'arrêt des Peupliers, que tout le monde appelle UbiDream, du nom de la célèbre entreprise de jeux vidéo. C'est une des rares stations du réseau qui a été cofinancée par un promoteur immobilier, dans une approche poreuse entre le tunnel et la surface. Non seulement les déblais de la ligne ont servi pour la construction du bâtiment, mais il existe une continuité physique entre les deux. Un des escalators accède directement à l'immeuble que partagent UbiDream et l'École 404, spécialisée dans les métiers vidéoludiques. Aménagé en salle d'arcade ouverte au public, le rez-de-chaussée de l'immeuble permet de tester différents jeux, de découvrir les dernières technologies et d'assister à des rencontres. Professionnels, étudiants, joueurs et simples voyageurs s'y croisent toute l'année dans une joyeuse effervescence.

Alors que le métro sort momentanément du tunnel, l'éclairage s'adapte à la lumière du jour et les vitres athermiques régulent la chaleur du soleil. Moins énergivore que la climatisation, la ventilation mécanique forcée et réfrigérée a

été généralisée. Elle offre une température optimale à l'intérieur.

Une conception plus frugale a permis d'alléger le poids des rames qui maintenant consomment moins et dégagent moins de chaleur. Elles utilisent des matériaux nouvelle génération à fort albédo et plus isolants. Billie se remémore l'été dernier, quand le métro était devenu un refuge de fraîcheur pendant la canicule. Aujourd'hui, la plupart des stations sont conçues comme des oasis climatiques. Elles tirent profit notamment d'éléments biosourcés, comme l'argile et le bois, qui améliorent la qualité de l'air et réduisent le stress. Juste avant que la rame ne replonge sous terre, Billie reconnaît les peupliers et l'immeuble UbiDream. Conformément aux concepts de Transit-Oriented Development, la station a été construite au milieu d'un quartier populaire enclavé. Un travail de concertation entre la collectivité, les habitants et le promoteur a permis d'endiguer la hausse des prix, et aux riverains de rester. Grâce à la piétonnisation, des commerces se sont installés et le quartier a retrouvé un second souffle.

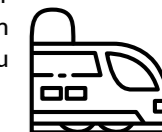
Alors que les adolescents au fond commencent à chanter, le grand-père se penche vers Billie.

« Ils sont surexcités, vous savez ce qui se passe aujourd'hui? »

- C'est le lancement du dernier jeu UbiDream, tout le monde en parle.
 — Vous y allez aussi? Vous n'êtes pas déguisée!
 — En fait, j'anime un atelier. J'ai travaillé sur le jeu, on a développé une technologie auditive en 3D super-immersive.»

D'un même mouvement, les enfants écarquillent les yeux et se tournent vers leur grand-père, qui éclate de rire. Il leur donne le feu vert, mais à condition de l'aider d'abord à monter les courses. En une seconde, ils se retrouvent tous debout, les bras chargés.

Suivant le guidage intelligent proposé par leur smartphone, les adolescents en cosplay se sont agglutinés devant la porte la plus proche de l'escalator UbiDream. Les quelques secondes qui précèdent l'ouverture s'écoulent dans un silence fiévreux. Billie leur lance un clin d'œil et, dans un bip enchanteur, les portes du métro s'ouvrent déjà.



Le métro, entre crises et opportunités

Christelle Chichignoud,
directrice développement durable
du groupe SYSTRA.

Maud Bernard,
directrice de projet études mobilité
et solutions innovantes du groupe SYSTRA.



TEXTE
Millie Servant

ILLUSTRATION
Marine Benz
& Jan Siemen

Penser le métro au cœur d'un projet de transition écologique, c'est aussi envisager sa place à travers les dynamiques sociales et économiques de nos zones urbaines. L'occasion d'un exercice de prospective « grand angle » avec la directrice de projet études mobilité et solutions innovantes du groupe SYSTRA, Maud Bernard, et la directrice développement durable, Christelle Chichignoud.

→ **Nos sociétés vont connaître des événements naturels de plus en plus imprédictibles. Comment le métro peut-il s'y préparer ?**

Maud Bernard Chez SYSTRA, nous avons déjà une culture de la gestion des risques qui nous permet de faire face à des événements connus, comme les séismes... Lors



Total luxe

Le métro de Moscou n'est pas seulement le plus fréquenté d'Europe, avec ses 365 km de lignes et 232 stations : il a aussi la réputation d'être le plus beau. En 1935, Moscou n'a pas encore de métro et Staline a envie d'en faire un autre exemple de « rayonnement soviétique » mondial. Le projet est colossal et de nombreuses stations vont porter la marque de ces ambitions démesurées : Arbatskaya avec ses lustres, son marbre, Elektrozavodskaya avec sa voûte ornée de cercles lumineux et Barrikadnaya dont le décor est en roche polie.



Sans arrêt

La Première Guerre mondiale aura certes limité l'activité du métro parisien, mais elle n'en sera pas venue à bout : en moyenne, entre 1914 et 1918, 30% du trafic est assuré. Avec la Deuxième Guerre mondiale, le chiffre remonte à 40% malgré la fermeture de nombreuses stations. Toutefois, compte tenu de la difficulté à s'approvisionner en essence (et en pneus), le métro demeure le plus sûr moyen de locomotion pour les Parisiens. Finalement, la crise de la Covid aura été plus sévère pour la fréquentation du métro que les conflits armés, avec un trafic parfois réduit de -80%.

du tremblement de terre de Mexico de 1985, l'essentiel du réseau métro a résisté aux secousses et l'exploitation a pu reprendre rapidement, sans travaux majeurs. Les conséquences d'une crue centennale peuvent être intégrées dès la conception pour protéger les équipements sensibles des installations fixes, moyennant des adaptations. Ces risques peuvent également faire l'objet de mesures organisationnelles pour agir en situation de crise (ex.: obstruction du tunnel du métro par la construction rapide d'un mur provisoire). Le défi auquel nous nous préparons aujourd'hui est de réussir à penser l'imprévisible pour pouvoir s'adapter dans l'instant, mais aussi après coup, à une situation inédite. À l'heure actuelle, on parle beaucoup de résilience, un concept malléable, qui désigne « la capacité d'un système à faire face à un choc ». Selon son degré d'intensité, la résilience est associée à la capacité de résistance du système (absorbative), à la mise en œuvre de changements pour adapter le système et le rendre plus résistant (adaptative) ou encore à la transformation radicale du modèle dominant (transformative).

Christelle Chichignoud Que ce soit pour un ouvrage existant ou pour un nouvel ouvrage, adapter le métro aux enjeux climatiques de demain nécessite une conception et un management environnemental spécifiques. Nous intégrons très tôt dans la conception du projet d'infrastructures une analyse de risques liés aux contextes climatiques exceptionnels et nous proposons des dimensionnements d'ouvrages et des adaptations en fonction de cette analyse. C'est également tout un management de l'événement exceptionnel en soi qui doit être pensé. De l'alerte au suivi en temps réel, toute la chaîne doit être anticipée, planifiée et partagée entre les différents acteurs.

→ **Le métro peut-il devenir une solution face au risque ?**

M.B. Le métro en tant qu'ouvrage peut jouer un rôle protecteur. Il peut, par exemple, être conçu pour protéger de températures extrêmes, pour résister aux incendies ou à de fortes précipitations. Le métro de Moscou a notamment été conçu pour que ses stations deviennent des abris en cas de guerre. Mais pour que le métro endosse pleinement ce rôle, il faut également garder en tête que le système à bâtir doit être le plus économe possible en ressources, tant dans la phase de construction que d'exploitation. Il y a là tout un champ à explorer : on peut par exemple jouer sur l'architecture des stations ou leur implantation pour réguler la température sans avoir recours à l'air conditionné.

C.C. Le métro est à la fois un objet de performance et un objet utile, au service des commu-
nautés. L'innovation ne
consiste pas seulement →

à regarder au travers de projets futuristes comme l'Hyperloop ou les voitures volantes. Nous pouvons faire évoluer le métro vers un modèle d'innovation incrémentale: une innovation profitable et vertueuse.

→ Quel sera l'impact sur la vie de la cité si le métro perd une partie de sa capacité de transport ?

M.B. La crise sanitaire de la covid-19 a occasionné une perte de capacité de 80 %, qui correspond à la fois à la baisse du niveau de services et à la diminution de la capacité des véhicules à respecter les règles de distanciation physique. Dans une situation comme celle-ci, il faut aplatir la courbe des transports en dé-densifiant les déplacements et en évitant les pics de fréquentation. Cela implique une coordination de tous les acteurs pour modifier les horaires de travail, éviter les heures de pointe, reporter les flux sur d'autres modes de transport, etc. On voit bien ici que la résilience nécessite l'activation de systèmes multi-échelles, combinant la force de chacun pour faire réseau. Cette crise sanitaire contraint à imaginer un « système global » et à accélérer certaines mutations qui étaient doucement à l'œuvre ou qui étaient encore à l'état de gestation. Cela oblige à repenser les villes pour le vélo, la marche et les micro-mobilités, et à reconnaître ceux-ci comme des modes de déplacement à part entière.

C.C. Que ce soit à l'occasion d'une crise ou, plus largement, dans le cadre du réchauffement climatique et d'une stratégie zéro émissions, il faut adopter une approche écosystémique et rompre avec l'approche en silos. On ne



raisonne pas seulement sur le métro lui-même, mais sur sa place dans un ensemble et sur la manière dont il s'intègre dans un environnement urbain. Il faut adopter un effet de zoom et de dézoom en permanence. Plus que jamais, la capacité du métro, sa plus-value au service de communautés et de territoires est à envisager en articulation et en complémentarité d'autres services et d'autres modes de transport.

→ Faudrait-il songer à mieux répartir les passagers sur les différents modes de transport en fonction de leurs temps de trajet ?

M.B. Il y a un gisement énorme pour les déplacements de courte distance. Les opérateurs privés de micro-mobilités l'avaient d'ail-

leurs bien compris. Dans les zones urbaines, une majorité de trajets courts (500 m à 10 km) sont encore réalisés en voiture, et l'autosolisme (*utilisation en solo de son auto, ndlr*) bat son plein. Aux États-Unis, 50 % des déplacements réalisés en voiture font moins de 10 km et en France, seulement 3 % des déplacements sont réalisés à vélo, alors que c'est un mode de transport qui a un débit très élevé.

Le problème en cas de perte de capacité de transport du métro, c'est que son débit de passagers est difficilement égalable: un métro peut véhiculer 60 000 personnes par heure. La Direction de la voirie et des déplacements de la Ville de Paris a ainsi estimé que si seulement 5 % des 600 000 voyageurs quotidiens de la ligne 13 prenaient leur voiture, il faudrait 4 voies automobiles supplémentaires. Reporter les déplace-

ments des transports en commun vers la voiture n'est pourtant ni viable ni souhaitable. La crise ne doit pas être un frein, un retour en arrière dans le cadre de la transition énergétique.

→ Comment faire alors pour que les transports en commun soient des mobilités plus désirables ?

M.B. Il s'agit en premier lieu d'apporter de la simplicité, de la fluidité et du confort. Il faut qu'il soit agréable de se rendre d'un point A à un point B. Cela passe par la fiabilité et la robustesse du système, son bon dimensionnement, la prise en compte des usages et l'interconnexion du métro avec les autres modes de transport (on parle d'intermodalité).

Mais on peut aller plus loin: l'anthropologue urbaine Sonia Lavadinho disait à juste titre que « quand nous pourrons dire que notre temps passé dans la rue et les transports est une heure pleine, une heure bien vécue, nous aurons répondu aux enjeux de la mobilité ». Les espaces du métro peuvent être des lieux où la notion du temps s'efface, grâce au design, au beau et au ludique.

→ Le métro a aussi des externalités négatives: comment les limiter, voire en tirer parti ?

C.C. Chez SYSTRA, nous envisageons les potentialités, mais aussi les impacts dans leur globalité, à l'échelle du projet et sur la durée de vie totale de l'infrastructure. Nous sommes très attachés à optimiser le cycle de vie de l'infrastructure et ses interactions avec l'environnement. Par exemple, nous suivons de près

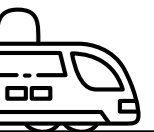
l'empreinte carbone de nos différents scénarios de conception, nous encourageons auprès de nos clients, dès que cela est possible, les solutions techniques (choix de matériaux, méthodes constructives) qui permettent de limiter les impacts. Sur certains projets, nous sommes, par exemple, capables de proposer une économie de 10 % de béton sur un viaduc de 20 km, ce qui peut éviter d'émettre 6 000 t de gaz à effet de serre, soit l'équivalent des émissions de 600 individus sur 1 an (11,9 t d'équivalent CO₂ par personne et par an, selon les chiffres du gouvernement français sur l'année 2016). Nous veillons également à tirer parti du potentiel du système, de sa conception à sa maintenance, en passant bien sûr par son exploitation, mais aussi par le fonctionnement des stations et des bâtiments administratifs. L'ambition est de pouvoir, demain, construire un métro en maîtrisant l'ensemble de ses besoins énergétiques. Nous pourrions également proposer des fonctions annexes qui génèrent une plus-value pour l'environnement et les villes. C'est grâce à cette approche que le métro ne sera bientôt plus seulement une ligne, mais une brique essentielle de nos villes et du vivre-ensemble.

→ Les temps de trajet risquent d'évoluer dans la ville du futur: quel peut être l'impact sur les usages du métro ?

M.B. Il n'y a pas de transport que parce qu'il y a une activité. Si nous modifions la manière dont nous localisons nos activités, nous modifierons alors la façon dont nous construisons nos villes. Il est beaucoup question aujourd'hui de concepts de ville des courtes distances: la ville du quart d'heure, la ville poly-

centrique... Cela ouvre un champ intéressant sur l'usage de la ressource foncière et le recyclage de l'espace urbain (multiplication des usages, réversibilité des espaces). Ces futurs possibles posent des questions de distance, de proximité, mais aussi de connectivité (*des liens entre les différents lieux, ndlr*). Plus que de courtes distances, c'est de la composition des échelles dont nous avons besoin et de penser la planification urbaine en lien avec l'offre de transport. Dans leur travail académique sur la « ville cohérente », les chercheurs Emre Korsu, Marie-Hélène Massot et Jean-Pierre Orfeuill ont montré, sur le cas de l'Île-de-France, que si l'on rapprochait les actifs à moins de 30 minutes de leur bureau, on pouvait faire baisser la circulation automobile due au travail de 10 % et celle en transport public de 47 %. Si cette vision reste utopique, l'étude a soulevé les difficultés liées à la spécialisation des zones et à une trop forte concentration de l'emploi.

Comme le relève Jean-Marc Offner dans son ouvrage *Anachronismes urbains*, l'avenir est à l'établissement d'un système de mobilité fondé sur trois piliers: la marche à pied et les EDP (engins de déplacement personnel) pour les déplacements courts; les transports en commun pour les déplacements massifs, et les transports à la demande et l'autopartage pour les autres déplacements. Dans un tel système, les réseaux s'alimentent les uns les autres et s'entraident pour apporter des réponses sans faille aux attentes des usagers.



Éloge du vide

TEXTE
Éric Senabre

→ Alors que l'architecture renvoie spontanément à l'image de matériaux, de masses, de surfaces, de volumes pleins, vous défendez une vision centrée sur l'idée de vide. Que représente-t-il dans votre démarche ?

Philippe Rahm La mission première de l'architecture, on l'oublie trop souvent, c'est justement de créer un espace, un vide, dans lequel il ne va pas pleuvoir quand il pleut dehors, où il y a moins de soleil quand il y en a trop à l'extérieur. Ce sont des portions du monde, de l'atmosphère du monde, que l'on va transformer pour que le climat à l'intérieur soit plus habitable pour l'homme. Les murs extérieurs sont là pour délimiter ce vide. Ce qui m'a intéressé, c'est de me dire « ce vide n'est pas neutre, c'est une matière ». Et cette matière, on peut la définir selon des paramètres réels de température, d'humidité et de qualité de l'air, de quantité de lumière, de rayonnements. Il y a une aussi une part chimique, électromagnétique... L'architecte travaille sur des briques, du béton, de l'acier, mais pourquoi ne pas y intégrer la pollution de l'air, la température, le type de lumière ? C'est ainsi que j'envisage mon travail : en considérant le vide comme la matière première de l'architecte.

L'architecte suisse Philippe Rahm promeut une expérience de l'architecture où le physiologique et le météorologique occuperaient une place centrale. Il a accepté de réfléchir avec nous à ce que pourrait être, à l'avenir, un métro plus en phase avec les besoins naturels, aussi bien en matière de climat que d'individus.

→ Justement, dans le vide créé par les espaces du métro, comment penser la question du confort climatique et de l'efficacité énergétique ?

P.R. À Paris, il suffit de descendre à 5 m sous la terre pour avoir la température annuelle moyenne de la ville, entre 11 et 12 °C. Un peu comme les caves à Reims, où l'on fait mûrir le champagne. Les églises de la Renaissance, comme les basiliques romaines, avaient justement une valeur thermique. Le métro, aujourd'hui, est avant tout fonctionnel : des tubes qui relient des stations les unes aux autres. Mais il pourrait être intéressant de lui penser une valeur « urbaine », comme les shopping mall canadiens à demi-souterrains. Cette valeur thermique pourrait avoir un rôle public. Reste qu'en hiver, actuellement, il y a des déperditions énormes de chaleur en provenance du métro. On devrait pouvoir récupérer l'air à la sortie des bouches de métro pour éviter ce gaspillage.

→ Pensez-vous que la végétalisation du métro soit une piste à suivre en matière de régulation thermique ? Ou, a minima, une manière de faire un trait d'union entre surface et sous-sol ?

P.R. La végétation dépend de la qualité de l'air, de la lumière, du taux d'humidité. Or, il y a une part de dépendance technique qui rend tout cela difficile à gérer, à commencer par l'arrosage. Et puis, les effets seraient certainement plus psychologiques qu'autre chose. Un humain a besoin en moyenne de 300 arbres pour compenser son empreinte carbone annuelle de CO² : avec des milliers de personnes dans le métro, quelques arbustes ne feront pas grand-chose. Cela ne changera pas radicalement la fraîcheur de l'air, du moins, pas davantage qu'avec un bassin ou une fontaine.

→ Quels autres leviers d'action est-il raisonnable d'envisager pour rendre le métro plus résilient, ou, du moins, plus agréable ?

P.R. Avant tout, la qualité de l'air et la lumière. Les spectres émis par les tubes du métro sont standard, mais on devrait les choisir pour être plus en phase avec les besoins métaboliques de lumière des passagers, et pourquoi pas les faire varier en fonction du moment de la journée. Pourquoi ne pas imaginer que la lumière devient jaune le soir pour ne pas bloquer les cycles circadiens ? La question de la qualité de l'air, elle, est encore compliquée à traiter. Dans l'absolu, ces deux notions pourraient même revêtir une qualité esthétique : et si la beauté du métro résidait avant tout dans sa lumière et son air ?

→ Le hic, c'est qu'aujourd'hui la crise de la covid-19

a mis en porte-à-faux le concept même de « circulation de l'air »...

P.R. On ne sait pas encore parfaitement comment le virus circule. Des études montrent que si Milan a été à ce point touchée, c'est à cause de la pollution de la ville et des particules fines sur lesquelles se fixerait le virus. Dans le cas du métro, bien sûr, il est légitime de craindre une circulation plus active du virus puisqu'il y a une concentration très forte de particules fines. Mais la solution pourrait être de diluer cette concentration, comme on peut déjà le faire pour la pollution à la surface.

→ Vous évoquez la fraîcheur des églises de la Renaissance. Dans le même ordre d'idée, y a-t-il un travail à effectuer sur les matières utilisées dans le métro ?

P.R. Oui, ce sont des questions d'émissivité et d'effusivité très importantes. Un matériau en face de nous qui aurait une haute émissivité absorberait notre chaleur puisque, dans le même temps, il serait constamment refroidi par les 11°C de la terre. Dans le métro, tout ce qu'on touche devrait être des maté-

riaux à haute effusivité, et les matériaux en face de nous devraient être à haute émissivité.

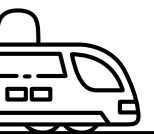
→ Quel rôle la géothermie pourrait-elle jouer dans la manière de penser le métro futur ?

P.R. Je pense que l'on peut largement utiliser la géothermie pour venir rafraîchir l'air en été quand il est soufflé dans le métro. Un peu à la manière des puits canadiens. S'il est soufflé directement dans les tubes du métro depuis l'extérieur en période de canicule, il va être brûlant. Mais si on le fait circuler sous l'air dans des serpentins, il aura eu le temps de se refroidir. Bien sûr, c'est un peu compliqué de faire bouger l'air naturellement, mais... c'est possible ! En utilisant des cheminées solaires, qui sont noires dans leur partie supérieure et vont surchauffer afin de créer des dépressions. Ces cheminées thermiques pourraient permettre de se passer d'une ventilation mécanique.



De profundis

La station de métro Arsenalna, à Kiev, a la drôle d'idée de se situer au sommet d'une vallée. En conséquence, les quais se trouvent 105 m plus bas et nécessitent un long voyage sur les escalators : on y passe en général 5 minutes. Bien sûr, il ne s'agit pas de cruauté gratuite de la part des ingénieurs : la station suivante se trouve bel et bien dans la vallée, et il aurait été beaucoup plus compliqué de faire gravir une pareille dénivellation au train lui-même.



Un métro virtuel au service du réel

TEXTE
Benoît Zante

ILLUSTRATION
Julie Guillem

Le métro du futur sera aussi virtuel ! La création de son double numérique offrira une modélisation multidimensionnelle exacte du réseau, évoluant en temps réel grâce aux capteurs connectés déployés sur le terrain. Des bureaux d'études jusqu'à la maintenance, en passant par les chantiers de construction et l'exploitation des infrastructures, ce métro virtuel aura des impacts bien réels et permettra une continuité digitale... À la clé : gain de temps, économies d'énergie, meilleure fiabilité et expérience réinventée pour l'utilisateur.



Une maintenance réinventée par l'intelligence artificielle

Les capteurs se font progressivement une place sur les équipements entre les stations et dans le matériel roulant, pour un suivi au millimètre : associées à des algorithmes d'intelligence artificielle, les données qu'ils collectent ouvrent la voie à une maintenance prédictive et préventive plutôt que corrective ou planifiée. On parle alors d'Asset Management.

« Grâce à l'exploitation des données, la maintenance prédictive vise à réduire les risques de pannes les plus critiques en même temps que le nombre d'interventions. Le matériel peut ainsi rouler plus longtemps chaque jour, avec un temps d'immobilisation réduit, ce qui permet d'augmenter les fréquences avec une meilleure fiabilité » explique Jessica Smith, chargée d'études mobilité chez SYSTRA Scott Lister, Australie.

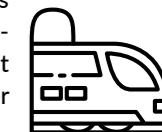
Le jumeau numérique permet également de bien préparer les opérations de gros entretiens et renouvellements (renouvellement voie ballast, changement de rail, circuits de voie...) en réduisant l'impact sur l'exploitation.

Pour l'utilisateur, une expérience améliorée

Le centre de contrôle virtuel assure également une plus grande réactivité au réseau et garantit une meilleure expérience au quotidien pour ses usagers. Gestion des flux, de la température ou de la luminosité peuvent être optimisés en temps réel.

« Des capteurs à l'intérieur et à l'extérieur de la station peuvent servir à analyser la température, la luminosité ou le nombre de personnes présentes, afin d'optimiser la lumière, le niveau sonore, la climatisation ou les informations à destination des passagers comme le positionnement dans les rames » explique Alan Trestour, directeur général, conseil, SYSTRA Australie & Nouvelle-Zélande.

Qu'il s'agisse des dernières lignes sorties de terre ou de réseaux plus anciens, l'installation progressive de ces capteurs vient fournir de précieuses données sur l'utilisation des infrastructures. Éclairés par ces informations inédites, les gestionnaires des réseaux peuvent optimiser l'existant... et planifier les prochaines extensions.



La virtualisation du réseau, ce n'est plus de la science-fiction

La virtualisation du métro est déjà bien engagée : les concepteurs des métros de demain travaillent déjà à partir de maquettes numériques en utilisant une plateforme BIM (pour "Building Information Modeling") agrégeant toutes les données du projet. Cet outil est déterminant pour la coordination des différentes parties prenantes, afin de limiter les risques d'erreurs et de retard sur les chantiers. Dès la phase de conception, ces outils de virtualisation permettent déjà et permettront encore plus à l'avenir de simuler, organiser et planifier efficacement les activités de construction, d'exploitation et de maintenance.

« En travaillant dans un environnement virtuel, il est possible d'identifier des problèmes qui étaient invisibles jusqu'ici. En consacrant davantage de moyens au design, on peut mieux anticiper la suite : passer plus de temps à réfléchir en conception coûtera toujours moins cher que corriger des erreurs lors de la construction. » ajoute Sandra Lang, directeur technique chez SYSTRA Scott Lister, Australie.

Modéliser pour mieux collaborer et maîtriser les impacts

Le BIM s'avère tout aussi utile sur le terrain, lors de la phase de construction, en facilitant la collaboration des différents corps de métiers qui doivent travailler ensemble, dans des espaces souvent contraints.

Thomas Juin, directeur du digital, SYSTRA

« Le métro est un système complexe à dompter et nous avons besoin d'une conception rigoureusement déterministe pour assurer la sécurité des voyageurs. L'émergence de nouvelles sources de données apporte des outils d'observation et de mesure du comportement réel qui nous aident à mieux caler nos modèles déterministes de simulation. Ces données nous invitent à l'humilité en mettant en lumière des phénomènes non prédictibles ou dont l'explication nous échappe encore. Il ne faut pas faire de l'exploitation des données une révolte des statistiques dans une dictature déterministe. Statistiques et déterminisme doivent travailler main dans la main au service d'un métro plus économe en énergie, plus sûr, plus efficace. »

« Avant, chacun arrivait dans les réunions avec ses propres outils. Aujourd'hui, grâce au cloud, on peut tous accéder ensemble à la même maquette, tester, échanger et choisir les meilleures solutions » explique Vladana Darras, Responsable du déploiement du BIM au sein du Groupe SYSTRA.

Ces maquettes numériques ouvrent également la voie à des gains non négligeables à plus long terme, sur toute la durée de vie du réseau, en simulant virtuellement les performances de l'ensemble du système de transport dès la phase de conception, en amont des essais. En simulant virtuellement les infrastructures, il est aussi possible de modéliser leur impact environnemental et de déterminer à l'avance leur bilan carbone, ce qui s'avère particulièrement utile pour identifier les configurations les plus économes en énergie.

Des capteurs pour un suivi en temps réel

BIM et maquettes numériques ne sont d'ailleurs pas la seule incursion du digital sur les chantiers : drones, images satellite, capteurs IoT fournissent

de précieuses données qui servent, en fonction des cas, à surveiller les capacités de stockage sur le site, garantir la sécurité des ouvriers ou s'assurer du respect des plannings en suivant l'avancée des travaux au jour le jour, entre autres.

« On complète désormais les traditionnels relevés topographiques par une captation des données bien plus précise, avec des drones, des capteurs ou des satellites » explique Eric Pruvost, directeur plan transformation BIM chez SYSTRA.

Une fois l'infrastructure livrée, les plans numériques, capteurs connectés et maquettes virtuelles ne sont pas abandonnés, au contraire : ils commencent une nouvelle vie, au service de la maintenance et de l'exploitation des infrastructures. Le réseau peut même s'enrichir d'un « jumeau numérique », véritable centre de contrôle virtuel.

Le jumeau numérique facilite l'intégration d'évolutions futures d'une ligne de métro existante : extension, adaptation du plan de voie, arrivée d'un nouveau matériel roulant, automatisation en cours de vie... et de son environnement direct (bâtiments, autres systèmes de transport).

Marc Seffacene, directeur des opérations, SYSTRA, Dubaï

« Dans les villes tropicales, la quantité d'énergie dédiée aux stations devient équivalente à celle consommée par les rames. L'enjeu d'optimisation énergétique est réel. Tous ces systèmes se doivent de fonctionner avec une parfaite fiabilité, et de s'adapter aux flux de passagers, grâce à une supervision constante qui est devenue de plus en plus fine au fil des progrès technologiques : dans les métros les plus modernes, des centaines de milliers de points de mesure de température, de tension, de luminosité, de bruit, sont collectés chaque seconde. »

Le métro dans sa beauté ordinaire

Acheter un ticket, descendre (ou monter) quelques marches, attendre sur le quai, se glisser dans la rame... En apparence, le potentiel d'émerveillement d'un trajet en métro est bien faible. Mais l'illusion de la simplicité est en réalité sous-tendue par une foule d'innovations discrètes, parfois anciennes, parfois très récentes, dont on ne soupçonne pas toujours l'existence – et, a fortiori, le caractère exceptionnel.

TEXTE
Éric Senabre

ILLUSTRATIONS
Jan Siemen
& Kouzou Sakai



Trains sans conducteur

Un métro automatique, sans conducteur et sans personnel à bord, cela n'étonne plus grand monde aujourd'hui. Pourtant, le déploiement des trains entièrement automatisés n'est pas une mince affaire. Cinq niveaux, de 0 à 4, sont définis en matière d'automatisation ; le premier désigne un système qui ne gère automatiquement que les aiguillages, tandis que le niveau 4 s'applique à l'exploitation de trains sans aucun personnel à bord. Les premiers pas en matière d'automatisation ont été faits dès les années 1970, avec des lignes de niveau « 2 » qui soulageaient tout de même significativement le conducteur. Avec le développement de l'électronique, puis de l'informatique, il a été possible d'atteindre, dès les années 1980, le niveau 4. Par ailleurs, si certaines lignes « historiques » sont capables d'accueillir des trains tout automatiques et des trains à conduite classique (c'est le cas de la ligne 1 parisienne qui accueillait simultanément les deux types de trains pendant la phase de migration),



Façades mystérieuses

Aux premières heures du métro européen, les lignes étaient généralement peu profondes : on creusait une tranchée dans la chaussée et on y « fonçait » un caisson fabriqué depuis la surface avant de refermer le tout... ou pas ! Les maisons situées au 23-24 Leinster Gardens à Londres sont a priori semblables à leurs voisines mais, en réalité, il s'agit de simples façades, sans épaisseur, dressées là pour dissimuler la ligne « ouverte » aux yeux du public.

Faiçal Chaabane, directeur général adjoint – directeur opération international ouest et directeur SYSTRA Egypt

« Le métro du futur ne devra plus être perçu uniquement comme un moyen de transporter les individus d'un point à un autre, car il sera développé de façon à refléter les nouveaux modes de vie des communautés urbaines en termes de sécurité et de respect de l'environnement, de confort des passagers, de simplicité d'usage et de recours au digital. Le métro du futur fera partie intégrante des grandes transformations de nos modes de vie. »

d'autres, plus récentes, ne sont conçues que pour la circulation des trains 100 % automatiques.

Sur la plupart de ces lignes automatiques, il a été décidé, dans le but de supprimer les intrusions sur la voie, de mettre en place un système de portes palières qui empêchent l'accès à la voie même quand le train n'est pas à quai. L'idée est de réguler le flux des voyageurs et de prévenir les incidents. Une personne sur la voie, c'est un risque d'accident mortel, avec des retards en cascade pour conséquence.

Des risques ? Le 18 septembre 2019, un train automatique de la ligne 1 parisienne a occasionné une peur bleue à ses passagers, sautant plusieurs arrêts avant de mettre un terme à sa course à Palais-Royal. L'incident – résultant d'une série de dysfonctionnements techniques et de réactions inappropriées des opérateurs – a été l'occasion d'illustrer que chaque train « automatique » bénéficie d'une sorte de « bulle invisible » rendant impossible le rattrapage du métro précédent. La collision avec un autre train était donc, de facto, irréalisable.

Infrastructures : reculer l'impossible

À l'exception de villes très récemment sorties de terre (à l'échelle de la civilisation industrielle, du moins), les métros du monde entier ont été construits au sein de tissus urbains préexistants, présentant d'innombrables défis pour les ingénieurs en charge de l'infrastructure. Aussi, ce que l'on considère pour acquis – relier un point A à un point B de façon transparente – dissimule parfois de véritables casse-tête pour les ingénieurs d'hier et d'aujourd'hui.

Ainsi, très récemment, la ville de Kolkata s'est lancée dans des travaux pharaoniques pour faire passer sa ligne de métro East West sous le lit de la rivière Hooghly. En surface, en effet, le terrain ne présentait plus les conditions requises pour l'extension de la ligne, à commencer par le manque d'espace que l'on peut imaginer dans une ville dont l'aire urbaine rassemble 14 millions d'individus. Au total, la section souterraine devrait cou-





rir sur plus de 10 km de longueur, avec 520 m sous la rivière elle-même. Une première pour le pays, qui se finalisera en 2021.

De tels exploits techniques n'ont cependant rien de nouveau, même si, pour beaucoup d'usagers d'ailleurs ou d'ici, ils font en quelque sorte partie du paysage. À Paris – dont le sol, comme celui de toute ville « historique », ne manque ni de surprises ni de trous – la station Danube repose sur sa partie centrale sur d'immenses piliers de plus de 30 m de haut, eux-mêmes enfoncés dans des remblais. Entre le sol de la station et ces remblais, hormis les pylônes, c'est le vide. Qui y penserait lors de son trajet quotidien ?

Dans des constructions plus récentes, comme le métro de Dubaï, d'autres trouvailles structurelles ont été mises en œuvre. Plutôt que de recourir à des structures métalliques et rivetées pour les parties aériennes, comme on en trouve à New York, Paris ou Londres, des viaducs en béton préfabriqué « en U » ont été mis en place. Le béton ouvre la voie à des architectures plus audacieuses, plus modernes, visuellement mieux intégrées dans le paysage urbain et limitant l'occupation au sol (recours à des monopiles plutôt qu'à des paires de piliers).

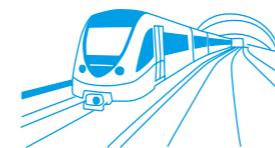
Freiner, c'est produire !

Un métro qui freine, qu'il s'agisse d'un matériel sur pneu ou sur roues fer, c'est banal. Dans les deux cas, pourtant, ce freinage comme il y en a des dizaines de milliers par jour, cache une pe-

tite prouesse technique. Au départ, le freinage d'un métro se faisait comme avec quasiment n'importe quel véhicule : des « patins » en fer exerçaient une pression sur les roues pour ralentir la course du train. Depuis les années 1980, cependant, il en va autrement : le moteur devient une sorte de dynamo (comme sur un vélo) qui non seulement va agir sur le freinage, mais en plus va convertir l'énergie mécanique perdue en électricité. Cette électricité est alors réinjectée dans le système électrique par le rail latéral pour alimenter (par exemple) un autre train... pourvu qu'il soit à proximité. Si cette condition n'est pas remplie, l'énergie est dissipée sous forme de chaleur, et donc perdue. En effet, réinjecter de l'électricité dans le rail d'alimentation provoque une surtension, qui doit de fait soit être utilisée, soit régulée (le stockage n'étant pas encore possible de façon satisfaisante).

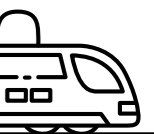
En septembre 2015, pourtant, le métro londonien a fait une immense avancée en employant cette électricité pour faire fonctionner non pas un train proche, mais une station tout entière (éclairages, etc.) En pratique, une station comme Holborn pourrait être alimentée deux jours par semaine de cette manière. Quotidiennement, c'est 1 MWh d'énergie qu'il serait possible de récupérer, soit la consommation électrique annuelle de 104 foyers.

Derrière cet exploit se cache un dispositif astucieux. Il consiste en des sous-stations d'alimentation « réversibles » capables de récupérer 99 % de l'énergie de freinage et de la réinjecter dans le réseau électrique sans provoquer de surtensions. Outre le métro de Londres, ceux de Milan, Riyad, Panama, Dubaï, ainsi que les tramways de Sydney en sont déjà équipés.



Vision future

Le métro de Dubaï, aux Émirats arabes unis, est quasiment un rêve de science-fiction devenu réalité. Lancé en 1997, le projet n'a été inauguré que 12 ans plus tard, le 9 septembre 2009 (à 9 heures, 9 minutes et 9 secondes, ça ne s'invente pas !). À l'époque, il constituait le métro automatique le plus long au monde, aujourd'hui détrôné par Vancouver et Singapour. Mais sa ligne rouge, avec 52 km, reste la plus longue ligne de métro sans conducteur au monde.



Les questions qui tuent

TEXTE
David Attié

Le métro se ment-il à lui-même ? Nous avons posé trois questions qui tuent à Maud Bernard, Directrice de projet études mobilité et solutions innovantes, Hervé Mazzoni, Expert transport, et Tristan Vandeputte, Directeur de l'innovation, chez SYSTRA.



Maud Bernard



Hervé Mazzoni



Tristan Vandeputte

Ashish Kumar, directeur des opérations – infrastructure, SYSTRA Inde

« Le terme "métro" est relativement nouveau en Inde dans la mesure où le premier système de transport de masse rapide a été inauguré à Kolkata, en 1984. Il a fallu près de 23 ans pour construire la première ligne. Puis, en 1998, Delhi se fixa l'objectif ambitieux de mettre en place un réseau de plus de 300 km en l'espace de 15 ans. Aujourd'hui, l'Inde a environ 700 km de métro opérationnels et 600 km supplémentaires sont en construction, tandis que le gouvernement réfléchit à d'autres modes de transport alternatifs et complémentaires. Avec plus de 50 villes en Inde dont la population dépasse le million d'habitants, le besoin de systèmes de transport urbains est immense. Trouver le bon système et le meilleur moyen de l'implémenter est donc la nécessité du moment. »

Frédéric Bana, directeur général adjoint, SYSTRA USA, West Coast

« Le métro doit être intégré dans une politique transport plus vaste. La multimodalité s'appuyant sur une colonne vertébrale structurante comme un réseau métro permettra de répondre aux besoins en mobilité des urbains. De par l'étalement urbain de certaines mégapoles avec des centres-villes multiples telles que Los Angeles, Lagos ou Sao Paulo, l'offre de transport doit s'adapter en conséquence et doit à la fois cibler les déplacements ponctuels, courts et non planifiés/planifiables, pour lesquels les services de mobilité individuelle sont pertinents, tout autant que les déplacements récurrents (trajets domicile-lieu de travail) pour lesquels les réseaux métro offrent une réponse idéale avec une capacité de transport élevée et une très forte intégration dans le tissu urbain sans créer de barrières entre quartiers. »

Un futur sans grandes infrastructures de mobilité est-il envisageable ?

Transport collectif capacitair par excellence, le métro est aujourd'hui appelé à composer avec de nouvelles mobilités point à point. Pourront-elles le rendre obsolète ?

Ces dernières années les constructeurs automobiles et le grand public se sont enthousiasmés pour les progrès des voitures autonomes. Laissant présager un futur de mobilités porte-à-porte débarrassé des parkings, les robots-taxi ont fait miroiter de grandes transformations. Faut-il y voir la fin des infrastructures de transports urbains au profit de flux individualisés ? C'est peu probable, en tout cas dans les grandes villes. Car l'infrastructure du métro est synonyme de capacité : « Une file de circulation automobile de 3,5 m de large, c'est un débit de 1 000 personnes par heure. Un métro, c'est 50 000 personnes par heure. Même en augmentant le taux d'occupation, on ne joue pas du tout dans la même cour », assène Maud Bernard.

À l'échelle de la ville, le réseau de métro fait converger les voyageurs vers des corridors de déplacements majoritaires et agit comme un système dorsal. Cette performance a un prix que toutes les villes ne peuvent pas se payer : à défaut, certaines mettent en place un réseau de BRT (Bus Rapid Transit). Moins capacitair que le métro, il rend tout de même service à la population et permet de désenclaver certains quartiers.

L'exemple de Bogota est emblématique. Faute de moyens pour construire des lignes de métro, la ville a investi dans un BRT. Victime de son succès, celui-ci est aujourd'hui saturé et découpe la métropole en boulevards infranchissables et en stations bondées de 100 m de long. La volonté de reproduire le débit d'un métro avec des bus a provoqué de lourdes externalités négatives sur le tissu urbain.

Aussi structurant soit-il, le métro n'a pas vocation à faire du porte-à-porte, mais à répondre à une problématique de volume de voyageurs. À commencer par la marche, il s'accompagne nécessairement d'autres modes de déplacement qui lui sont complémentaires.

La mobilité a-t-elle encore besoin de grandes innovations disruptives ?

Les systèmes Hyperloop, les véhicules volants (eVTOL), les PRT nouvelles générations ou autres systèmes à grande vitesse sur coussin d'air. Ces projets de systèmes de transports innovants continuent à mobiliser la recherche et les imaginaires. Pourtant, peu d'entre eux auront le privilège d'un déploiement à grande échelle.

« Dans le domaine de l'innovation et en cas de rupture technologique, bien malin celui qui peut dire ce que va coûter la réponse aux problématiques de sécurité et de disponibilité », explique Hervé Mazzoni. Autrement dit, un concept technologique ne se suffit pas à lui-même, il faut anticiper les infrastructures, la logistique, les pannes, etc. À poursuivre la performance, certains projets perdraient de vue le réel. Après tout, le rail tient la route. D'aucuns rêvent aujourd'hui de supprimer le contact rail/roue. En témoignent les initiatives des trains à sustentation magnétique, sur coussins d'air ou dans un tube à pression réduite. « Quelle qu'en soit l'issue, il y aura toujours des dérivés technologiques intéressants à exploiter », éclaire Maud Bernard. En mobilisant l'imaginaire, ces totems fédèrent des volontés et des capitaux qui leur permettent de renverser certaines barrières. Les innovations cachées dans la voiture autonome ou le véhicule volant trouveront à terme application dans un système de transport.

Le métro est d'ailleurs passé par là. Depuis les premières locomotives à vapeur, il a bénéficié de nouveautés technologiques venues d'ailleurs, qu'il s'agisse de systèmes de freinage, de contrôles d'accès sans contact ou de techniques de congélation des sols. « Si le métro a profité d'un environnement favorable à son développement, un tel environnement semble plus difficile à réunir pour les projets innovants actuels, bien que le domaine de pertinence d'un certain nombre d'entre eux soit réel », remarque Tristan Vandeputte.

Quoi qu'il en soit, l'innovation doit se poser la question de son horizon. À l'heure de la crise environnementale, peut-on concilier un imaginaire de vitesse avec celui de sobriété ?

Le métro est-il un colosse aux pieds d'argile ?

Système complexe, le métro a été forgé par le temps pour être robuste. Mais n'est-ce pas là son point faible ? Trop lourd, trop technique et trop coûteux, survivra-t-il aux crises de demain ?

Depuis plus d'un siècle, le métro plie, mais ne rompt pas. Conçu pour durer, il façonne sa résilience, c'est-à-dire sa capacité à absorber un choc, à s'adapter et à se transformer. « On respecte des normes de construction qui correspondent à une ambition de robustesse », résume Hervé Mazzoni.

Absorber un choc, c'est envisager la défaillance. « Le concept global de notre système prévoit des fonctionnements en mode dégradé ». Chaque dispositif anticipe plusieurs redondances pour garantir la continuité du service. Les rames automatiques sont équipées d'un pupitre de pilotage manuel de secours.

L'adaptabilité du métro consiste à ajuster le service aux besoins. L'automatisation, par exemple, permet d'augmenter l'offre quasiment en temps réel. Elle contribue ainsi à encaisser de grosses variations de flux de voyageurs, comme pour l'évacuation d'un stade.

Enfin, le métro se transforme : il accueille en permanence les matériaux et les technologies qui l'améliorent et le perpétuent. Le remplacement du bois par le métal pour la construction des rames a d'abord réduit les risques d'incendie ; puis le passage à l'aluminium a offert de meilleures performances à la compression en cas de collision, tout en réduisant le poids des rames.

Mais le métro ne peut pas tout faire, ni tout prévoir. « Il a son rôle à jouer, on peut le préparer à certaines situations mais il n'est pas seul, il fonctionne en réseau. » Maud Bernard rappelle que les systèmes locaux sont une donnée majeure de résilience, dans le sens où les solutions à mobiliser en cas de crise sont surtout organisationnelles. Une approche systémique doit prendre en compte l'offre complémentaire de mobilité et, à plus large échelle, elle doit aussi pouvoir être articulée avec la question de la planification urbaine, la localisation de nos activités et l'occupation des sols.



Métro en 2035 : trois scénarios pour une station du futur

Le métro est appelé à demeurer un pilier de la mobilité urbaine. Moyen de transport commode et rapide, il constitue la meilleure option de desserte susceptible de soutenir le développement des grandes agglomérations, a fortiori au-devant des défis climatiques. Vecteur de déplacement en commun alimenté par l'énergie électrique, il apporte la réponse la plus évidente à l'engorgement automobile générateur de pollution aux particules et d'émissions de gaz à effet de serre. Dans son principe même, il cadre avec l'objectif majeur de développement durable. L'attractivité du métro, présente et future, doit beaucoup à l'amélioration de son accessibilité, ainsi que de sa signalétique et de ses systèmes d'information, enrichis grâce aux nouvelles technologies et plus apte à faciliter le trajet des voyageurs. De même, une exploitation et une maintenance plus performantes garantissent aujourd'hui une meilleure disponibilité des équipements. Or le métro n'est pas qu'un mode de transport. Il est aussi cet espace qui donne corps à une ville et porte une partie de son identité. À l'horizon 2035, des stations au diapason des évolutions de l'urbanisation et des changements des rythmes de vie pourraient modifier le visage du métro, voire sa définition. Illustration en trois scénarios.

TEXTE
Benoît Hervieu-Léger

ILLUSTRATION
Nelson Goncalves

1. De la station au hub multimodal

En 2035, les stations souterraines font peau neuve. Les traditionnels tourniquets disparaissent. La signalétique personnalisée se généralise grâce à la connectivité en temps réel. Une information encore affinée sur la densité des rames, assortie de recommandations de trajets alternatifs, favorise une meilleure régulation des flux. L'usager craint moins le spectre de la thrombose à l'heure d'affluence. L'accessibilité des personnes à mobilité réduite se renforce au moyen de rampes aménagées, de couloirs de circulation réservés et surtout grâce à un agencement intérieur des rames adapté à ce public. Les passagers s'attardent plus volontiers dans des stations où le déploiement de culture et de commerces est devenu systématique. Certaines acquièrent une envergure multiservices, en incorporant des supports de diffusion culturelle (bibliothèques, expositions), quand d'autres se convertissent en galerie d'art, sur le modèle du métro de Stockholm, dans un souci de confort physique et psychologique de qui l'emprunte. La station comme hub multimodal devient la norme, véritable vecteur de connexion et de fluidité entre le métro et d'autres moyens de transport, qu'ils soient verticaux (ascenseurs, véhicules volants) ou horizontaux. Aucun hub ne va sans sa borne de deux-roues, sans moteur ou électriques. Pilotant ce nœud d'échanges, les systèmes de management coordonnent à la perfection toutes les flottes des différents services de mobilité.

2. La station bio-inspirée, marqueur d'un changement d'ère

L'année 2035 signe l'entrée dans une nouvelle ère. Aussi souvent annoncée que freinée ou retardée, la transition écologique et énergétique a enfin scellé l'urbanité verte. La station de métro devient l'un des symboles du paradigme décarboné et de l'économie circulaire. Envisagée comme une ville dans la ville, sa conception illustre la démarche « cradle to cradle ». Les matériaux sont tous recyclés et recyclables et la fonctionnalité même de la station peut être modulée sur le

Paola Arellano,
responsable pôle architecture, SYSTRA, France

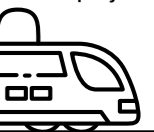
« Dans le futur, les personnes n'auront plus besoin de se mobiliser au jour le jour et suivant une routine. Les déplacements se feront davantage par envie que par besoin. Ainsi, le succès du métro du futur, comme de tout transport, dépendra de sa capacité à offrir une expérience enrichissante au voyageur. Les stations, première interface entre le passager et le système, devront ainsi répondre à toutes les attentes du voyageur en termes de société et de développement durable. Pour y arriver, elles devront être plus flexibles et s'adapter aux nouveaux usages qui sont encore à inventer. »

long terme. Devenue le point de départ de la mise en œuvre de la ville innovante, la station porte à une autre échelle la traduction d'un nouveau métro éco-conçu. Elle prolonge la recherche de l'efficacité énergétique instaurée sur la ligne avec la récupération de l'énergie de freinage et sa réutilisation systématique pour alimenter ses activités.

Désormais, la station de métro allie esthétique, qualité technique et ambitions écologiques élevées. Le zéro déchet fait partie de son ADN, tant dans le fonctionnement que la conception. La végétalisation n'est plus là pour le seul verdissement visuel, mais pour partager un accès à la biodiversité sur de nouveaux espaces. La station bio-inspirée se caractérise également par un système de ventilation naturelle optimisé, qui permet de solutionner l'épineux problème des particules dans les stations et de leur impact sur la santé. L'exigence d'une bonne hygiène partagée a atteint le rang de priorité. La dématérialisation des contrôles d'accès et l'automatisation des ouvertures de portes des rames a réduit les interactions tactiles. Des matériaux antibactériens entrent dans les normes de construction. La station bio-inspirée est connectée à l'ère du digital. L'empreinte numérique des services est intégrée à la recherche de la neutralité carbone. La volonté politique consentira-t-elle à une refonte aussi ambitieuse ?

3. Accès et arrêts : la fin des stations

En 2035, la station-ville s'est imposée comme pilier du maillage métropolitain. Le développement d'un tel modèle marque un pas plus radical encore que le déploiement d'emplacements multiservices. L'espace souterrain s'est mué en monde souterrain, selon une formule inspirée du sous-sol tokyoïte aux 63 000 sites (et dont 40 % de la surface est reliée au métro) ou du célèbre RESO de Montréal, dégroupé sur 32 km de tunnel. Déjà, à Paris, l'extension de l'emprise souterraine de la station Hôtel-de-Ville avait donné le ton avec son accès direct au sous-sol du BHV Rivoli. Le métro épouse la ville qu'il dessert. La traditionnelle césure entre espace de vie urbaine et espace de transport s'est abolie d'elle-même. Les voyageurs modulent leur trajet entre marche souterraine et emprunt du métro selon leur temps. Le concept de station en tant que tel se trouve remis en cause par la multiplicité des accès offerts par un même ensemble. Là encore, la perspective soulève la question d'un investissement financier important... Un tel projet redéfinirait, de surcroît, la place du sous-sol urbain indépendamment du métro qui lui donnait sa raison d'être. Le voyageur s'y reconnaîtra-t-il ?



Le métro dans la SF

La science-fiction, après les années 1920, se sera sans doute davantage intéressée aux véhicules spatiaux qu'aux trains souterrains. Malgré cela, que ce soit comme symbole matriciel ou alternative élégante à d'autres types de transports terrestres, le métro n'a pas cessé de stimuler l'imagination des créateurs de mondes alternatifs.



L'Âge de Cristal, Michael Anderson (1976)

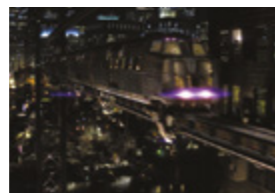
À la fois utopie et dystopie, ce film situé au ^{XXIV} siècle dépeint une société vivant une existence idyllique (jusqu'à l'âge de 30 ans, du moins) dans un monde sous cloche. On y circule dans une sorte de métro de type monorail, comportant des sections aériennes tubulaires et transparentes, et préfigurant quelques réalisations bien réelles, comme le métro de Dubaï. Toutefois, il ne s'agit pas d'un transport en commun : sur ce réseau, les « mazecars » demeurent des capsules à deux places plutôt que des trains.



Les Cavernes d'acier, Isaac Asimov (1954)

Ce roman du maître de la SF évoque un monde souterrain où les humains vivent désormais en majorité dans la peur de ce qui peut se trouver en surface. Leur mode de déplacement privilégié, curieusement, n'est pas le métro tel qu'on

se le représente, mais ce qui nous permet, dans la « vie réelle », de faire nos changements plus vite à Montparnasse ou Châtelet : des tapis roulants très sophistiqués dotés de plusieurs vitesses, dont la maîtrise devient vite une seconde nature pour les usagers.



Batman Begins, Christopher Nolan (2005)

Dans ce « reboot » de la saga du super-héros de Gotham, une scène en flash-back nous montre le milliardaire Thomas Wayne et son épouse en compagnie de leur jeune fils Bruce – futur « Chevalier Noir » de la ville – à bord d'un métro aérien rétro-futuriste. « C'est toi qui l'as construit, papa ? », demande le garçonnet. « La ville a souffert et elle avait besoin de quelque chose pour la réunifier », lui explique le philanthrope. En réponse ironique, le métro devient la matrice du mal – en tous les cas, d'un malaise social – dans le récent *Joker*.



A Subway Named Mobius, Armin Joseph Deutsch (1950)

On doit cette très intrigante nouvelle à l'astronome Armin Joseph Deutsch. Elle relate l'étrange disparition d'un train du métro de Boston après qu'une nouvelle interconnexion a été inaugurée. Impossible de retrouver le train, même si celui-ci continue à tirer de l'électricité du réseau et à activer la signalisation. Et si la complexité topologique du réseau avait généré une « interconnexion infinie », au-delà des règles connues de l'espace-temps ? Un très beau postulat, transposé à Buenos Aires dans le film *Moebius*, en 1996.



Trilogie Matrix, Les Wachowski (1999-2003)

La trilogie des sœurs Wachowski a su introduire d'habiles décalages dans un environnement en apparence ordinaire pour suggérer

le glissement dans un monde virtuel. Durant la saga, on fait la connaissance du Trainman, qui règne en quasi-dieu dans une station de métro appelée Mobil Avenue. La station apparaît alors comme une sorte de palier, d'intermédiaire, entre plusieurs mondes, dont on ne peut ressortir que si le Trainman le décide. Le choix d'un métro pour introduire cette idée d'interconnexion de l'espace-temps n'est probablement pas fortuite !



Série Quadrail, Timothy Zahn (2005-2012)

Cette série de romans s'éloigne considérablement du concept de métro tel que nous le connaissons, mais lui rend un hommage plutôt sympathique. Le « Quadrail » qui donne son nom à la saga est un dispositif de transport sur rails, qui permet à des trains de voyager dans des tubes où règne le vide (presque) absolu : on retrouve, dans les très grandes lignes du moins, le concept du métro à air comprimé des débuts. Toutefois, ici, le Quadrail permet d'effectuer des voyages interstellaires. Il s'agit d'un métro à l'échelle d'un univers, en quelque sorte.

Nous souhaitons remercier tout particulièrement...

L'équipe projet

Les rédacteurs en chef

Alban Agnoux, U&R
Maud Bernard, SYSTRA
Hervé Mazzoni, SYSTRA
Tristan Vandeputte, SYSTRA

Les directrices de production

Gaëlle Cornibert, U&R
Marie Pfund, SYSTRA

Le contributeur externe

Philippe Rahm

Les contributeurs SYSTRA

Jean-Alexis Schuster
Christelle Chichignoud
Paola Arellano
Philippe Arnaud
Frédéric Bana
Annelise Baudouin
Clément Benko
Faïçal Chaabane
Vladana Darras
François Gravil
Loïc Guignot
Thomas Juin
Ashish Kumar
Mathieu Pochat
Sébastien Lacroix
Sandra Lang
Jean-Philippe Majorcryk
Delphine Martinez
Éric Pruvost
Lován Pushparatnam
Vincent Riquier
Frédérique Rouquette
Marc Seffacene
Jessica Smith
Alan Trestour
Henri Vergnaux

Les contributeurs Usbek & Rica

Les journalistes

David Attié
Benoît Hervieu-Léger
Éric Senabre
Millie Servant
Benoit Zante

Les illustrateurs

Marine Benz
Nelson Goncalves
Julie Guillem
Kouzou Sakai
Jan Siemen

Les directrices artistiques

Marine Benz
Anne-Lise Bachelier

Les secrétaires de rédaction

Sophie Loubier
Ubiquis

L'imprimeur

Aubin

Les traducteurs

Rebecca Asthalter, U&R
Peter Barter, SYSTRA

Et un remerciement spécial aux relecteurs et au Département Communication Groupe SYSTRA

...pour avoir imaginé ensemble le futur du métro

Contact

Tristan Vandeputte
tvandeputte@systra.com

Le futur entre les lignes du métro

Il s'en est passé des choses depuis le premier métro, il y a 150 ans. Et il y a fort à parier que le meilleur reste à venir. L'occasion d'essayer de lire le futur entre ses lignes, entre surprises anecdotiques et évolutions majeures.

2022



Généralisation du télétravail, grand retour du vélo et de la marche, chrono-urbanisme et lissage des horaires de bureau : les pics de fréquentation et les trajets collés-serrés sont désormais de l'histoire ancienne. Après avoir souffert de l'épidémie, le métro redevient *santé-friendly*.

2023



Paiement sans contact et gratuité des transports généralisent l'accès sans contact au métro. S'amorce un élan de transfiguration des stations, désormais ouvertes sur l'extérieur. S'inspirant des termitières, de grands architectes zimbabwéens aident les ingénieurs européens à inviter air et lumière naturelle sous la terre. *The Guardian* titre « *Subway: not light-speed, but light (&) speed* ».

2027



Lancement au World Metro Congress d'une nouvelle gamme de rames à base de super-matériaux pour faire face aux aléas climatiques enregistrés dans les pays du Sud. Parmi les caractéristiques phares, une carapace organique ultra-légère résistante à la nappe phréatique salée, un dispositif d'évacuation de la boue et du sable, ainsi qu'un système de gyroscope king size garantissant une circulation « zéro vibration » en cas de séisme.

2029



Le freinage régénératif est généralisé et optimisé dans la quasi-totalité des métros et le trop-plein d'énergie restitué en électricité en faveur des quartiers riverains.

2030



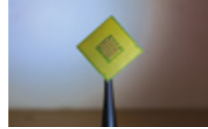
160 ans après sa création en réponse aux embouteillages hippomobiles, le métro accélère partout son expansion pour éradiquer la pollution automobile. Les grandes métropoles limitent petit à petit l'accès aux véhicules motorisés. *Le Monde* titre : « *Quittez votre voiture pour celles du métro* », et le *New York Times* : « *The underground goes mainstream* ».

2034



Dans le contexte du dérèglement climatique, les souterrains du métro deviennent des lieux de refuge. Grâce à un système de géothermie à basse énergie, ses parois en béton libèrent de la fraîcheur en temps de canicule et de la chaleur par grand froid.

2045



S'inspirant de l'initiative brésilienne des « Tickets Books », ces romans dotés de puces RFID faisant office de ticket de métro, les marques rivalisent d'ingéniosité pour être le nouvel objet star du métro. Après les tickets-sneakers, l'arrivée des tickets-tattoos remet la question des implants et des empreintes biométriques sur le devant de la scène.

2060



Glissant de station en station sur de fins viaducs de métal, les mini-rames du métro aérien donnent aux villes des allures futuristes dignes des plus grands récits de science-fiction. Et si les voitures volantes dont on nous avait tant parlé étaient en fait les voitures du métro ?

SYSTRA